



SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CENTRADO PARA CÁMARAS DE BOROSCOPIO EN INSPECCIÓN DE SOLDADURAS

JULIÁN JOSÉ CASTAÑEDA RAMÍREZ

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERIA
BARRANQUILLA
2025**



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DEL CARIBE

SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CENTRADO PARA CÁMARAS DE BOROSCOPIO EN INSPECCIÓN DE SOLDADURAS

Julián José Castañeda Ramírez

Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el título de:
Ingeniero Mecánico

Director
Ing. Armando Robledo.
Codirector
Ing. Carlos Soto.

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Mecánica
Barranquilla, Colombia
2025



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DEL CARIBE

Agradecimientos

Quiero dedicar este trabajo, ante todo, a mis padres, Hernando Castañeda y Angélica Ramírez, por estar siempre a mi lado. Su amor incondicional, sus enseñanzas y los valores que me inculcaron han sido la base sobre la que he construido la persona y el profesional que hoy soy. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en los que yo dudaba de mis propias capacidades.

A mi pareja, Mariana Suárez, por acompañarme en gran parte de este camino, por su amor, paciencia y por confiar en mí incluso cuando ni yo mismo lo hacía. Su apoyo constante ha sido fundamental para no rendirme y continuar dando lo mejor de mí.

Extiendo también mi agradecimiento a todos los profesores que se cruzaron por mi camino académico. Cada uno, con su dedicación y conocimiento, dejó una huella en mi formación como ingeniero, contribuyendo a moldear mi pensamiento crítico y profesional.

A mis amigos Gabriel, David y Paula, con quienes compartí risas, desvelos, frustraciones y triunfos. Gracias por esos momentos que quedarán grabados en nuestros corazones y por haber sido parte de este camino lleno de aprendizajes, retos y crecimiento personal.

Y finalmente, agradezco a Dios y a la vida por haberme permitido asumir este reto académico y culminarlo con éxito. Esta etapa ha sido una experiencia transformadora que marcará para siempre mi historia.



Resumen

Este proyecto desarrolla el diseño virtual de un sistema de centrado para cámaras de boroscopia utilizado en la inspección interna de soldaduras en tuberías. Una empresa del sector de ensayos no destructivos ha identificado fallas recurrentes de desalineamiento del cabezal, lo cual afecta la visibilidad del cordón de soldadura y reduce la calidad de los ensayos no destructivos (END). Para abordar esta problemática, se llevó a cabo un análisis detallado de los requerimientos técnicos y operativos, incluyendo entrevistas con personal especializado, observación en campo, documentación fotográfica y evaluación dimensional de tuberías.

El diseño conceptual se desarrolló mediante modelado CAD paramétrico en SolidWorks®, donde se planteó una base central rígida junto con un conjunto modular de anillos flexibles, adaptables a tuberías de 4", 6" y 8". Los materiales seleccionados para su fabricación aditiva fueron PETG para la base y TPU para los anillos, elegidos por su adecuada combinación de resistencia, flexibilidad y estabilidad mecánica. El comportamiento del prototipo fue validado mediante simulaciones de movimiento, análisis de elementos finitos (FEA) y evaluación del estado tensional a través del Círculo de Mohr, evidenciando estabilidad estructural, deformación controlada y un centrado confiable con una holgura radial adecuada.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema mantiene la cámara alineada con una desviación inferior a $\pm 0,5$ mm, mejora la estabilidad del cable frente al pandeo y garantiza un desplazamiento fluido dentro de la tubería. En consecuencia, el diseño propuesto se presenta como una alternativa viable, modular y de bajo costo que contribuye significativamente a mejorar la precisión, eficiencia y calidad de las inspecciones boroscópicas en entornos industriales.

Palabras clave: *Boroscopia, inspección de soldaduras, prototipos, centrado de cámaras, ensayos no destructivos, diseño mecánico, tuberías industriales.*



Abstract

This project presents the virtual design of a centering system for borescope cameras used in the internal inspection of welded joints in pipelines. A company in the non-destructive testing (NDT) sector has identified recurring misalignment issues of the camera head, which negatively affect the visibility of the weld bead and reduce the quality of inspections. To address this problem, a detailed analysis of technical and operational requirements was conducted, including interviews with specialized personnel, field observations, photographic documentation, and dimensional evaluation of pipelines.

The conceptual design was developed through parametric CAD modeling using SolidWorks®, where a rigid central base and a modular set of flexible rings adaptable to 4", 6", and 8" diameter pipes were proposed. The selected materials for additive manufacturing were PETG for the base and TPU for the rings, chosen due to their suitable combination of strength, flexibility, and mechanical stability. The prototype's performance was validated through motion simulations, finite element analysis (FEA), and stress evaluation using Mohr's Circle, demonstrating structural stability, controlled deformation, and reliable centering with appropriate radial clearance.

The results show that the system maintains camera alignment with a deviation of less than ± 0.5 mm, improves cable stability against buckling, and ensures smooth movement within the pipe. Therefore, the proposed design represents a viable, modular, and cost-effective solution that significantly enhances the accuracy, efficiency, and quality of industrial borescope inspections.

Keywords: *Borescopy, weld inspection, prototypes, camera alignment, non-destructive testing, mechanical design, industrial pipelines.*

Contenido

Agradecimientos	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Contenido.....	VII
Lista de símbolos	XI
Lista de figuras.....	XIII
Lista de Tablas.....	XV
1 Introducción	1
1.1 Formulación del problema	2
1.2 Justificación	4
1.3 Antecedentes	7
1.3.1 Dispositivo auto centrante modular con resortes de alambre	7
1.3.2 Centrador colapsable con patas articuladas para inspección interna de tuberías	8
1.3.3 Fundamento técnico sobre centradores para videoscopios industriales.....	8
1.3.4 Sistema endoscópico impulsado por gas para inspección interna de tuberías.....	9
1.3.5 Mecanismo de centrado para boroscopios con ajuste automático (Patente US20230121496A1).....	10
1.3.6 Robot de inspección para tuberías de gran diámetro con ruedas elevadoras (Jeon et al., 2024)	11

2	Objetivos.....	12
2.1	Objetivo general.....	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	Metodología	13
3.1	Análisis de requerimientos técnicos y operativos para el diseño conceptual.....	13
3.1.1	Identificación de necesidades operativas	13
3.1.2	Definición de restricciones operativas	16
3.1.3	Estudio de soluciones existentes	16
3.2	Diseño del prototipo virtual en 3D	17
3.2.1	Proceso de Modelado CAD Paramétrico Detallado.....	17
3.2.2	Metodología de Selección de Materiales y Optimización para Fabricación Aditiva.....	18
3.3	Estudio de Diseño y Validación del Comportamiento del Prototipo en SolidWorks®.....	20
3.3.1	Análisis de Movimiento y Comportamiento Dinámico (SolidWorks® Motion).....	20
3.3.2	Análisis de Elementos Finitos (FEA) para Resistencia y Deformación (SolidWorks® Simulation).....	21
3.3.3	Análisis de Propiedades Físicas y Visualización (SolidWorks® & PhotoView 360/Visualize)	22
4	Resultados y análisis	24
4.1	Resultados del análisis de requerimientos técnicos y operativos	24
4.1.1	Matriz de requerimientos técnicos y representación funcional global	24

4.1.2	Análisis comparativo de soluciones existentes y validación funcional	27
4.1.3	Matriz de decisión	27
4.2	Resultados del Diseño del Prototipo Virtual en 3D	28
4.2.1	Resultados del Modelado CAD Paramétrico Detallado	28
4.2.2	Resultados de la Selección de Materiales y Optimización para Fabricación Aditiva.....	30
4.3	Resultados del Estudio de Diseño y Validación del Comportamiento del Prototipo en SolidWorks®	32
4.3.1	Análisis de Movimiento y Comportamiento Dinámico (SolidWorks® Motion) 32	
4.3.2	Análisis de Elementos Finitos (FEA) para Resistencia y Deformación (SolidWorks® Simulation).....	35
4.3.3	Análisis de Propiedades Físicas y Visualización (SolidWorks® & PhotoView 360/Visualize)	39
5	Conclusiones y recomendaciones	43
5.1	Conclusiones	43
5.2	Recomendaciones	43
A.	Anexo: Anillo flexible de 4".....	45
B.	Anexo: Anillo flexible de 8".....	45
C.	Anexo: Análisis estático de carga anillo de 6".....	46
D.	Anexo: Análisis estático de carga anillo de 8".....	46
E.	Anexo: Análisis estático de tensiones anillo de 6"	47
F.	Anexo: Análisis estático de tensiones anillo de 8"	47
G.	Anexo: Propiedades físicas del ensamble de la base y el anillo de 4"	48

H.	Anexo: Propiedades físicas del ensamble de la base y el anillo de 6"	49
I.	Anexo: Propiedades físicas del ensamble de la base y el anillo de 8"	50
J.	Anexo: Vista de sección del seguro del acople del ensamble de 6"	51
K.	Anexo: Vista de sección del seguro del acople del ensamble de 8"	52
L.	Anexo: Renderizado fotorrealista del ensamble de 4"	53
M.	Anexo: Renderizado fotorrealista del ensamble de 6"	54
N.	Anexo: Renderizado fotorrealista del ensamble de 8"	55
O.	Anexo: Plano de anillo 4"	56
P.	Anexo: Plano de anillo 6"	57
Q.	Anexo: Plano de anillo 8"	58
R.	Anexo: Base soporte de anillos	¡Error! Marcador no definido.
	Referencias	59

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Descripción	Unidad SI
A	Área de superficie	mm^2 / m^2
d	Diámetro de la tubería o componente circular	mm
F	Fuerza aplicada	N
L	Longitud o distancia de desplazamiento	mm / m
m	Masa del componente o ensamblaje	g / kg
P	Carga aplicada	N
t	Espesor de pared o componente	mm
V	Volumen	$\text{mm}^3 / \text{cm}^3 / \text{m}^3$
W	Peso (fuerza gravitacional sobre la masa)	N
x, y, z	Coordenadas cartesianas (posiciones espaciales)	mm

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Descripción	Unidad SI
α	Ángulo de inclinación o contacto	rad / °
δ	Deformación o desplazamiento en análisis estructural	mm
ε	Deformación unitaria	adimensional
ρ	Densidad del material	kg/m^3
σ	Tensión normal (por esfuerzo de tracción o compresión)	N/mm^2 o MPa
τ	Tensión cortante	N/mm^2 o MPa
μ	Coefficiente de fricción	adimensional
η	Eficiencia de centrado del sistema	%

Abreviaturas y términos técnicos

Abreviatura	Significado
CAD	Diseño asistido por computadora
FEA	Análisis por elementos finitos (Finite Element Analysis)
PETG	Tereftalato de polietileno con glicol
TPU	Poliuretano termoplástico
URES	Resultante de desplazamiento en análisis FEA
FDS	Factor de seguridad (Safety Factor)
END	Ensayos no destructivos
ROI	Retorno sobre la inversión (Return on Investment)
3D	Tridimensional

Lista de figuras

Figura 1-1 Soldadura de tubería de 6 pulgadas no centrada.	3
Figura 1-2 Árbol del problema para la inspección boroscópica en tuberías.	4
Figura 1-3 Tubería de 2 pulgadas perfectamente centrada la junta de soldadura	6
Figura 1-4 Dispositivo auto centrante para boroscopios (Patente US 5,365,331) [3].....	8
Figura 1-5 Kit de centradores intercambiables para cámara de inspección [5]	9
Figura 1-6 Prototipo del robot endoscópico impulsado por gas [9]	10
Figura 1-7 Vista general del mecanismo de centrado ajustable [10]	10
Figura 1-8 Prototipo del robot con ruedas ajustables [11].....	11
Figura 4-1 Diagrama de caja negra del sistema de centrado del boroscopio.	25
Figura 4-2 Caja transparente del sistema de centrado: funciones descompuestas	26
Figura 4-4 Base de la cámara del boroscopio 6"	29
Figura 4-5 Anillo flexible de 6"	30
Figura 4-6 Primer paso para el acople	30
Figura 4-7 Paso final para el acople.....	30
Figura 4-9 Modelo del prototipo con anillo de 6"	33
Figura 4-10 Graficas de desplazamiento de X e Y	34
Figura 4-11 Graficas de desplazamiento de Z	35
Figura 4-12 Análisis estático de carga base de cámara.....	36
Figura 4-13 Análisis estático de carga anillo de 4"	36



Figura 4-14 Análisis estático de tensiones base de cámara	37
Figura 4-15 Análisis estático de tensiones anillo de 4"	38
Figura 4-16 Factor de seguridad base de cámara	38
Figura 4-17 Validación de la tolerancia en SolidWorks® para el ensamble de 6".	40
Figura 4-18 Vista de sección del seguro del acople del ensamble de 4"	41

Lista de Tablas

Tabla 3-1 Restricciones técnicas y operativas del sistema de centrado.....	16
Tabla 4-1 Matriz de requerimientos técnicos para el sistema de centrado del boroscopio	24
Tabla 4-2 Descomposición funcional del sistema de centrado (Caja Transparente)	26
Tabla 4-3 Comparación de soluciones existentes para centrado en inspecciones boroscópicas.....	27
Tabla 4-4 Matriz de decisión para selección de concepto	27
Tabla 4-5 Parámetros de impresión recomendados para los componentes del sistema.....	31
Tabla 4-6 Propiedades físicas y validación geométrica de los anillos centradores en SolidWorks®	39
Tabla 4-7 Evaluación dimensional de ensamblajes funcionales adaptativos para sistemas de tuberías	41

1 Introducción

En la industria actual, los ensayos no destructivos (END) juegan un rol fundamental en la inspección y mantenimiento de estructuras, componentes y sistemas, permitiendo la detección de defectos sin causar daños o alteraciones a los materiales evaluados. Estos métodos son especialmente relevantes en sectores industriales como el petróleo y gas, donde las tuberías y otros componentes críticos deben cumplir con altos estándares de seguridad y confiabilidad. [1]

Entre las técnicas de END, la boroscopia se destaca por su capacidad de proporcionar imágenes detalladas del interior de componentes de difícil acceso, facilitando la inspección de zonas que, de otro modo, requerirían desmontajes complejos y costosos. La boroscopia es un método de inspección visual indirecta que utiliza una cámara miniaturizada unida a un cable flexible o semirrígido para ingresar al interior de tuberías, cavidades o equipos, permitiendo observar directamente el estado interno de superficies, soldaduras y uniones sin intervenir físicamente el componente. [1]

En este contexto, una empresa del sector de ensayos no destructivos ha adoptado la boroscopia como técnica para la inspección de soldaduras y otros aspectos críticos en tuberías. No obstante, durante la aplicación de este método se ha identificado un desafío específico: la cámara del boroscopio, debido a sus dimensiones reducidas, presenta dificultades para centrarse adecuadamente en las juntas de soldadura de las tuberías. Esta limitación puede afectar la precisión y eficacia de la inspección, comprometiendo la calidad del análisis y dificultando la detección oportuna de defectos.

En respuesta a esta problemática, el presente trabajo de grado tiene como objetivo desarrollar una solución que permita mejorar la efectividad de los ensayos de boroscopia en tuberías, mediante el diseño de un accesorio o mejora del equipo que facilite el centrado óptimo de la cámara en las juntas de soldadura. La propuesta busca no solo resolver la limitación identificada, sino también aportar a la eficiencia y calidad de los procesos de inspección en la industria de los END, contribuyendo a la seguridad y prolongación de la vida útil de las estructuras evaluadas.

Finalmente, este trabajo de grado se fundamenta en la experiencia adquirida durante las prácticas profesionales realizadas en una empresa del sector de ensayos no destructivos durante el periodo académico 2024-02, lo cual permitió

identificar de manera directa las necesidades y problemáticas reales asociadas al proceso de inspección mediante boroscopia en tuberías.

1.1 Formulación del problema

En los procesos de inspección visual mediante boroscopia industrial, la posición y estabilidad del cabezal de la cámara son factores determinantes para garantizar una visualización precisa de las zonas internas de una tubería. No obstante, en las operaciones realizadas por una empresa del sector de ensayos no destructivos (END), se ha identificado una dificultad recurrente relacionada con el descentrado del boroscopio durante la inspección de juntas soldadas.[1]

Este inconveniente surge debido a la ausencia de un sistema de guiado o centrado que mantenga el cabezal alineado con el eje geométrico de la tubería. Como resultado, el boroscopio tiende a desplazarse de forma irregular, inclinándose y apoyándose contra una de las paredes internas, lo que reduce su campo visual efectivo e impide registrar adecuadamente la geometría completa del cordón de soldadura.

La *Figura 1-1* ilustra este problema: la imagen capturada por el boroscopio en una tubería de 6 pulgadas muestra la junta soldada de manera parcial y descentrada. Solo se observa una porción del perímetro del cordón, mientras que el resto queda fuera del campo visual. Esta deficiencia se traduce en una inspección incompleta e impide identificar posibles discontinuidades o defectos ubicados en los sectores no visibles, tales como porosidad, falta de penetración, socavaciones o inclusiones.

Figura 1-1 Soldadura de tubería de 6 pulgadas no centrada.



Desde el punto de vista operativo, este problema genera repercusiones directas sobre la eficiencia y confiabilidad del proceso. Los técnicos deben realizar repetidos intentos de posicionamiento del boroscopio, repetir tramos inspeccionados o incluso retirar el equipo para reiniciar el procedimiento, lo cual incrementa los tiempos de intervención, eleva los costos asociados y provoca fatiga operativa. Asimismo, una inspección incompleta puede requerir nuevas visitas al sitio, afectando los cronogramas del cliente y aumentando los costos del servicio.

A nivel organizacional, estas limitaciones comprometen la calidad percibida del servicio prestado por la empresa del sector de ensayos no destructivos. Un registro visual insuficiente o defectuoso afecta la solidez técnica del informe final, disminuye la confianza del cliente y puede impactar negativamente la competitividad en sectores industriales donde las inspecciones internas son críticas para la seguridad, tales como petróleo, gas, petroquímica y manufactura metálica.

Por su parte, los clientes también enfrentan consecuencias directas: informes con evidencia visual limitada pueden conducir a diagnósticos erróneos, decisiones de mantenimiento incorrectas o, en el peor de los casos, a la no detección de fallas críticas. Una soldadura defectuosa no identificada oportunamente puede generar fugas, rupturas o fallas catastróficas, con riesgos para el personal, afectación de la continuidad operacional y pérdidas económicas significativas.

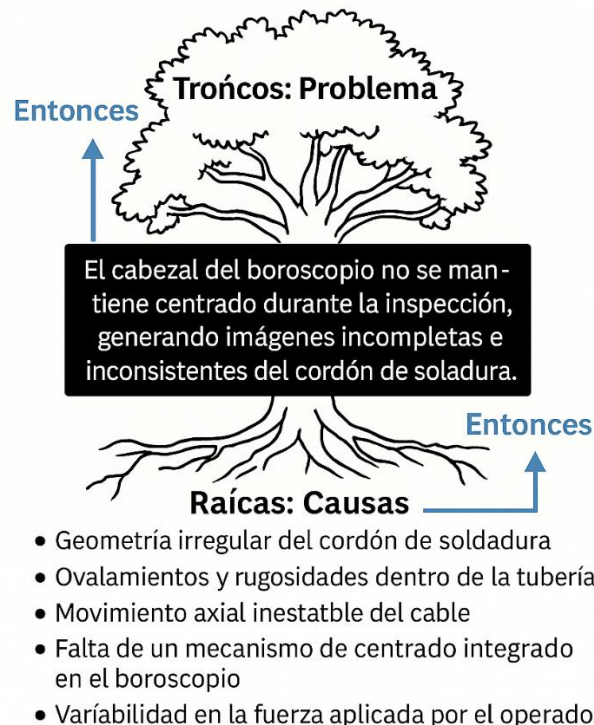
Con el fin de estructurar formalmente esta problemática, se empleó la herramienta del Árbol del Problema, en la cual se identifican las causas principales, el problema central y los efectos generados. La *Figura 1-2* muestra esta representación, donde se evidencia cómo los factores operativos, geométricos y funcionales convergen en el desalineamiento del boroscopio y, en consecuencia, en la pérdida de calidad de la inspección.

Figura 1-2 Árbol del problema para la inspección boroscópica en tuberías.

ÁRBOL DEL PROBLEMA

Ramas: Efectos

- Imágenes parciales o distorsionadas
- Repetición de inspecciones
- Informes inconclusos o no confiables
- Mayor riesgo operativo
- Pérdida de trazabilidad



En síntesis, el desalineamiento del boroscopio constituye una limitación técnica significativa que afecta la precisión, confiabilidad y eficiencia de las inspecciones internas. Por ello, se hace necesario desarrollar un sistema de

centrado que garantice la estabilidad del dispositivo, permita obtener una visualización completa del cordón de soldadura y contribuya a elevar el estándar de calidad del servicio ofrecido por la empresa del sector de ensayos no destructivos.

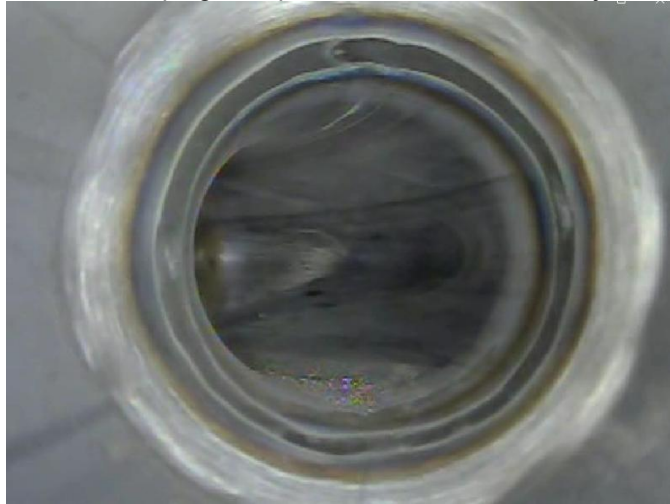
1.2 Justificación

La inspección visual mediante boroscopia industrial es una de las técnicas más empleadas en los ensayos no destructivos (END) para la verificación del estado interno de tuberías, uniones soldadas y componentes de difícil acceso. Su eficacia depende directamente de la calidad óptica de las imágenes obtenidas, las cuales deben representar de manera nítida y completa las zonas críticas evaluadas. [1] [2]

En el contexto de una empresa del sector de ensayos no destructivos, se ha identificado que durante las inspecciones boroscópicas la cámara del boroscopio tiende a desalinearse respecto al eje de la tubería, lo que impide visualizar adecuadamente las juntas de soldadura. Esta desalineación genera imágenes incompletas o distorsionadas, dificultando la interpretación técnica y comprometiendo la fiabilidad del diagnóstico.

La *Figura 1-1* muestra una de las principales limitaciones observadas: la cámara se encuentra inclinada, impidiendo visualizar completamente el cordón de soldadura. En contraste, la *Figura 1-3* presenta el resultado esperado cuando la cámara se encuentra correctamente centrada, mostrando de forma continua la circunferencia de la unión.

Figura 1-3 Tubería de 2 pulgadas perfectamente centrada la junta de soldadura



Este tipo de deficiencia técnica afecta directamente la calidad de las inspecciones visuales que realiza la empresa. Al no obtener imágenes completas de las soldaduras, los inspectores deben repetir el procedimiento o realizar movimientos manuales del boroscopio, incrementando los tiempos de operación, el desgaste del equipo y el riesgo de error humano. Además, un registro visual deficiente puede derivar en informes incompletos o interpretaciones erróneas, afectando la confiabilidad del servicio y la reputación técnica de la empresa frente a sus clientes industriales.

Desde la perspectiva del cliente, un diagnóstico impreciso puede tener consecuencias críticas: la omisión de una discontinuidad o fisura no detectada oportunamente puede ocasionar fallas estructurales, fugas o rupturas en líneas presurizadas, generando riesgos operacionales y pérdidas económicas significativas. Por ello, garantizar la precisión y el centrado del sistema óptico se convierte en un factor determinante para la seguridad y eficiencia de los procesos de mantenimiento preventivo y predictivo.

Ante esta problemática, se plantea el desarrollo virtual de un sistema de centrado para cámaras de boroscopio, diseñado para mantener la cámara alineada con el eje de la tubería, evitando desplazamientos laterales y asegurando una captura continua y completa del cordón de soldadura.

La implementación de este sistema permitirá a la empresa del sector de ensayos no destructivos:

- Aumentar la eficiencia operativa de las inspecciones.

- Reducir los costos de repetición de procedimientos.
- Mejorar la calidad de los registros visuales.
- Fortalecer su competitividad en el sector de los ensayos no destructivos.

De igual manera, el proyecto tiene relevancia académica e industrial, al aplicar metodologías de diseño asistido por computador (CAD), análisis estructural (FEA) y simulaciones dinámicas para optimizar el desempeño de un dispositivo especializado en inspección. El desarrollo de este sistema aporta una solución innovadora y replicable, con potencial de adaptación a distintos diámetros de tuberías y condiciones de operación, consolidándose como un aporte tecnológico al sector de END en Colombia.

1.3 Antecedentes

1.3.1 Dispositivo auto centrante modular con resortes de alambre

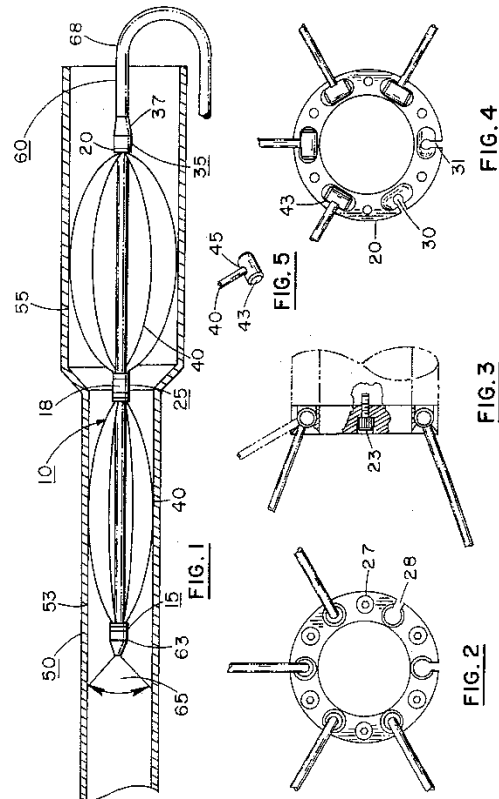
Una de las soluciones más destacadas para mantener centrada la cámara de un boroscopio en entornos industriales es el dispositivo descrito en la patente estadounidense US 5,365,331. Este artefacto se basa en un conjunto de resortes de alambre curvados que se expanden contra las paredes internas de una tubería, manteniendo al boroscopio en posición centrada sin necesidad de mecanismos complejos. Además, su diseño modular permite sustituir los resortes en campo según el diámetro del tubo o el tipo de inspección. La simplicidad y adaptabilidad de este sistema lo convierten en un referente técnico aplicable a la inspección de soldaduras mediante boroscopia, tal como se busca en el presente proyecto. [3]

Figura 1-4 Dispositivo auto centrante para boroscopios (Patente US 5,365,331) [3]

U.S. Patent

Nov. 15, 1994

5,365,331



1.3.2 Centrador colapsable con patas articuladas para inspección interna de tuberías

La patente internacional WO1994/002843 describe un centralizador diseñado para sistemas de inspección interna en tuberías, basado en un conjunto de patas flexibles unidas entre dos casquillos móviles. Estas patas pueden expandirse automáticamente mediante resortes cuando el dispositivo se encuentra dentro de la tubería, manteniendo al sensor de inspección en una posición centrada, y se colapsan cuando es necesario atravesar accesos estrechos. Este diseño permite tanto una alineación precisa como un paso seguro a través de curvas y cambios de sección, lo cual guarda gran similitud funcional con el concepto de anillos reforzados flexibles desarrollado en esta tesis. [4]

1.3.3 Fundamento técnico sobre centradores para videoscopios industriales

La empresa viZaar industrial imaging AG ha documentado ampliamente el uso de centradores en videoscopios industriales, destacando su papel fundamental en la estabilidad del dispositivo durante inspecciones visuales internas. Según esta fuente técnica, los centradores no solo permiten mantener alineado el sensor óptico con el eje de la tubería, sino que también previenen el contacto directo del cabezal con las superficies internas, lo cual prolonga la vida útil del equipo y mejora la calidad de la imagen. Este tipo de enfoque técnico respalda la necesidad de diseñar prototipos como el presentado en esta investigación, que buscan precisión, protección mecánica y facilidad de navegación. [5]

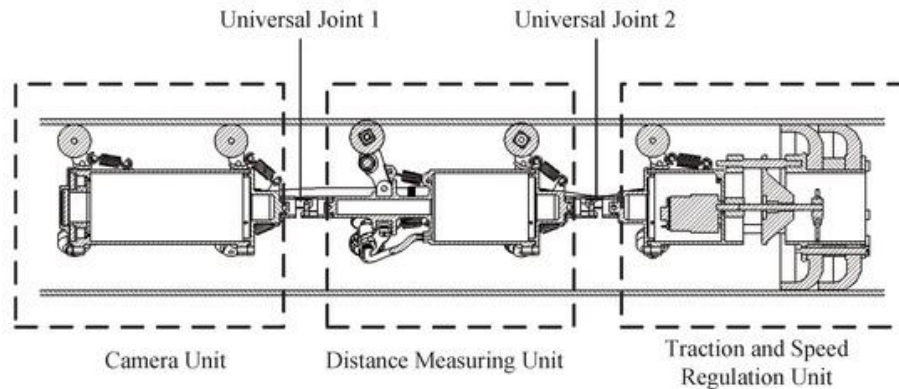
Figura 1-5 Kit de centradores intercambiables para cámara de inspección [5]



1.3.4 Sistema endoscópico impulsado por gas para inspección interna de tuberías

Fang et al. (2023) presentan un robot endoscópico diseñado para la inspección visual interna de tuberías de gas, el cual incorpora un sistema de propulsión neumática que permite desplazar la cámara a través del conducto mientras se mantiene centrada mediante anillos periféricos estabilizadores. El diseño incluye un chasis tubular que guía el flujo de aire y soporta el módulo óptico, además de una serie de soportes radiales que reducen el contacto directo con la pared interna, permitiendo una captura continua y estable de la superficie inspeccionada. La investigación muestra fotografías detalladas del prototipo final, así como pruebas experimentales que evidencian su capacidad para mantener la cámara alineada en tuberías curvas o con variaciones geométricas. [9]

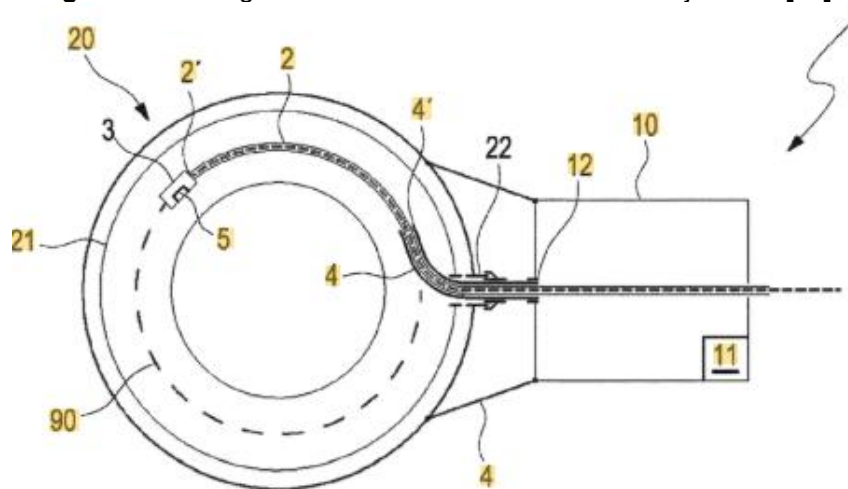
Figura 1-6 Prototipo del robot endoscópico impulsado por gas [9]



1.3.5 Mecanismo de centrado para boroscopios con ajuste automático (Patente US20230121496A1)

La patente estadounidense US20230121496A1 (2023) describe un sistema avanzado para inspección remota mediante boroscopia que integra un mecanismo de centrado ajustable alrededor del cabezal óptico. Este dispositivo utiliza brazos radiales flexibles que pueden expandirse o contraerse para adaptarse a distintos diámetros internos, garantizando que la cámara se mantenga alineada incluso en tuberías con ovalamientos o secciones irregulares. Además, los elementos de soporte incluyen materiales resistentes al desgaste y baja fricción, lo que facilita el desplazamiento del boroscopio sin comprometer la estabilidad de la imagen. [10]

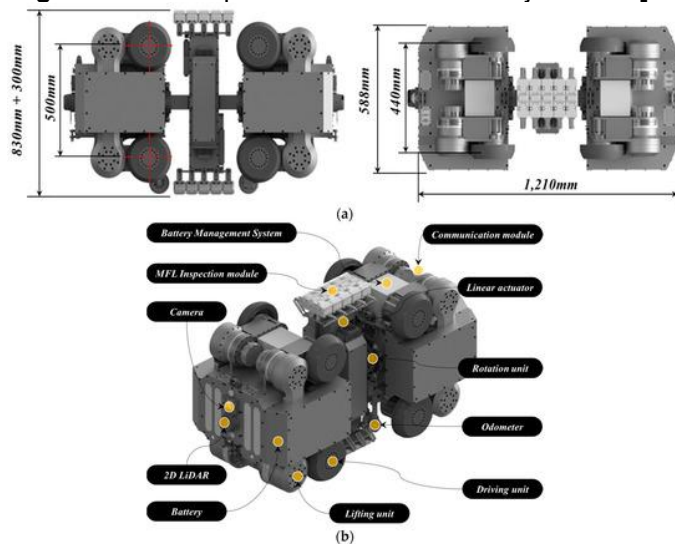
Figura 1-7 Vista general del mecanismo de centrado ajustable [10]



1.3.6 Robot de inspección para tuberías de gran diámetro con ruedas elevadoras (Jeon et al., 2024)

Jeon et al. (2024) desarrollan un robot de inspección para tuberías de gran diámetro equipado con ruedas elevadoras ajustables. Estas ruedas permiten modificar la posición del robot dentro del tubo en tiempo real, logrando un centrado automático del sistema de inspección con respecto al eje de la tubería. El estudio presenta imágenes fotográficas del prototipo completo, así como simulaciones dinámicas y pruebas de movilidad dentro de tuberías reales, demostrando la efectividad del mecanismo de auto centrado incluso en curvas o desniveles. [11]

Figura 1-8 Prototipo del robot con ruedas ajustables [11]





2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un simulador para el centrado de la cámara en los procesos de inspección de soldaduras en tuberías mediante boroscopia.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Definir los requerimientos técnicos y operativos para el diseño conceptual.
- ✓ Diseñar el prototipo virtual en 3D.
- ✓ Validar el comportamiento del prototipo en entornos virtuales.

3 Metodología

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo bajo un enfoque de investigación aplicada, con alcance descriptivo y experimental, orientado al diseño, análisis y validación de un prototipo destinado a optimizar la inspección de soldaduras mediante boroscopia. La metodología utilizada se estructura en fases coherentes con los objetivos específicos, integrando procesos de caracterización operativa, diseño conceptual y detallado del sistema, así como simulaciones computacionales mediante herramientas CAD y software de análisis, con el fin de evaluar el desempeño funcional del prototipo propuesto.

3.1 Análisis de requerimientos técnicos y operativos para el diseño conceptual.

El proceso de diseño conceptual del sistema de centrado para cámaras de boroscopia inició con una revisión detallada de las condiciones reales de operación en las que una empresa del sector de ensayos no destructivos ejecuta las inspecciones internas de soldaduras. Esta etapa permitió establecer los requerimientos técnicos, las restricciones operativas y los criterios funcionales que orientan el desarrollo y la selección de alternativas de diseño.

3.1.1 Identificación de necesidades operativas

Para determinar las necesidades reales del sistema de centrado, se llevó a cabo un análisis detallado del proceso de inspección boroscópica empleado por la empresa del sector de ensayos no destructivos. Este análisis incluyó:

- Entrevistas técnicas con el personal especializado:
 - ✓ Ingeniero responsable de inspecciones END, quien aportó información relacionada con la precisión de centrado, estabilidad de imagen y condiciones reales de operación durante las inspecciones.
 - ✓ Auxiliar de ingeniería, quien describió las principales dificultades asociadas al montaje, limpieza, maniobrabilidad del equipo y tiempos operativos.
 - ✓ Operario soldador, quien explicó la geometría real de las juntas soldadas, los ovalamientos típicos en tuberías y los factores que influyen en la calidad de la inspección visual.
- Observación directa en campo de inspecciones reales en tuberías de 4", 6" y 8", donde se registraron:



- ✓ desplazamiento irregular del cable,
 - ✓ pérdida parcial de visibilidad del cordón de soldadura,
 - ✓ contactos bruscos contra la pared interna,
 - ✓ desviaciones laterales del cabezal debido a la geometría del cordón.
- Registro fotográfico y de video, incluyendo fallas típicas como visualización incompleta de la junta debido al descentrado de la cámara.
 - Estimación de variables operativas relevantes para el diseño del sistema.

Durante las observaciones no se realizaron mediciones instrumentadas formales; no obstante, se recopilaron valores representativos a partir de la experiencia del personal técnico, documentación interna y literatura especializada. Con base en ello se establecieron los siguientes parámetros:

- ✓ **Longitud típica de empuje:** estimada a partir del avance manual observado durante las inspecciones.
- ✓ **Fuerza aplicada por el operador:** reportada por los técnicos como un esfuerzo moderado; para el desarrollo del proyecto se tomó como referencia un valor ≤ 30 N, basado en literatura sobre maniobrabilidad de sondas flexibles.
- ✓ **Distancias de trabajo:** determinadas según la geometría interna de las tuberías inspeccionadas.
- ✓ **Ángulos de visualización:** obtenidos directamente del fabricante del boroscopio y confirmados en operación.
- ✓ **Diámetros internos y variaciones geométricas:** verificados mediante mediciones dimensionales básicas de las tuberías utilizadas en campo.

Estos datos, aunque no constituyen mediciones metrológicas formales, permitieron establecer un conjunto de condiciones operativas reales sobre las cuales debe funcionar el sistema de centrado. A partir de esta información se definió la función global del dispositivo: mantener el cabezal del boroscopio alineado con el eje de la tubería durante el desplazamiento, garantizando una inspección continua y una visualización completa del cordón de soldadura.

3.1.1.1 Representación funcional global: Caja Negra

Como parte del análisis funcional propuesto para el diseño conceptual, se empleó la metodología de *Caja Negra* con el fin de caracterizar el sistema desde una perspectiva estrictamente funcional. Este enfoque permite describir el comportamiento esperado del sistema sin considerar aún su estructura física, componentes internos o mecanismos de operación, centrándose exclusivamente en la relación entre entradas, función principal y salidas.

La aplicación de esta técnica resulta fundamental en las primeras etapas del proceso de diseño, ya que:

- Delimita el alcance operativo del sistema.
- Establece la transformación funcional que debe realizar.
- Permite identificar los elementos externos que influyen directamente en su desempeño.

Al abstraer el sistema a un nivel de función global, la Caja Negra facilita una comprensión precisa del problema a resolver y constituye la base sobre la cual se desarrollan posteriormente las subfunciones internas (mediante la Caja Transparente), así como los criterios para la evaluación de alternativas de diseño.

3.1.1.2 Descomposición funcional: Caja Transparente

Además de identificar la función global mediante la *Caja Negra*, se empleó la técnica de *Caja Transparente* para descomponer el sistema en sus subfunciones internas.

Esta herramienta permite analizar, de forma estructurada, los procesos parciales que deben ocurrir dentro del dispositivo para que la función principal pueda cumplirse adecuadamente.

La Caja Transparente organiza el sistema en:

- **Función principal:** objetivo funcional que debe lograrse.
- **Subfunciones operativas:** acciones internas necesarias para garantizar el desempeño del sistema.
- **Relaciones funcionales:** interacción entre las subfunciones y el flujo de material, energía o información.

El uso de esta herramienta metodológica permite identificar qué capacidades debe incluir cualquier alternativa de diseño y sirve como base para comparar soluciones y determinar su viabilidad operativa.

3.1.2 Definición de restricciones operativas

Con base en las necesidades identificadas, se establecieron las restricciones técnicas y operativas que condicionan el diseño del sistema. Estas restricciones permiten garantizar que cualquier alternativa propuesta sea viable en condiciones reales.

Tabla 3-1 Restricciones técnicas y operativas del sistema de centrado

Tipo de restricción	Descripción	Requisito técnico
Compatibilidad	Debe ser compatible con un boroscopio industrial de uso común en inspecciones END, garantizando su acoplamiento adecuado sin comprometer la funcionalidad ni la integridad del equipo.	Acople adecuado al cable y cabezal.
Adaptabilidad	Operación en tuberías de 4", 6" y 8".	Sistema modular mediante anillos o piezas intercambiables.
Ambiente de trabajo	Exposición a humedad, polvo y temperatura entre -10°C y 50°C .	Selección de materiales resistentes (TPU / PETG).
Ergonomía	Maniobrabilidad adecuada del equipo.	Peso total $\leq 300\text{--}500$ g.
Ensamble rápido	Debe montarse sin herramientas especializadas.	Unión por clip o presión.
Fabricabilidad	Producción mediante impresión 3D FDM.	Materiales imprimibles y tiempos razonables.
Durabilidad	Resistencia al desgaste por uso repetitivo.	Deformación elástica controlada.

3.1.3 Estudio de soluciones existentes

Se realizó una revisión sistemática de la literatura técnica y patentes relacionadas con dispositivos de centrado para equipos de inspección visual. El estudio incluyó:

- Análisis de patentes relacionadas con centradores para equipos de inspección en tuberías.
- Revisión de artículos científicos sobre optimización de inspecciones no destructivas en soldaduras.

- Evaluación de productos comerciales similares disponibles en el mercado.

La información recopilada fue categorizada según principios de funcionamiento, materiales, mecanismos de ajuste y adaptabilidad a diferentes diámetros, identificando ventajas y desventajas de cada solución para informar el proceso de diseño conceptual.

3.2 Diseño del prototipo virtual en 3D

La creación del prototipo virtual en 3D del sistema de centrado para boroscopios, con énfasis en la adaptabilidad a diversos diámetros de tubería y la optimización para la fabricación aditiva, se fundamentó en una metodología de diseño rigurosa e iterativa. Este proceso no solo abarcó la conceptualización y visualización del sistema, sino que también integró la validación funcional y la optimización de sus componentes desde las primeras etapas, minimizando así los riesgos y costos asociados al prototipado físico.

3.2.1 Proceso de Modelado CAD Paramétrico Detallado

La fase inicial y fundamental de esta metodología se centró en el modelado paramétrico de los componentes clave: la base del boroscopio y los anillos reforzados flexibles. Para ello se empleó un software de diseño asistido por computador (CAD) con licencia académica institucional, seleccionado por su robustez en la creación de modelos 3D precisos y funcionales, así como por su capacidad para facilitar una iteración de diseño eficiente y asegurar la verificación de la precisión dimensional en cada etapa del desarrollo.

a. Diseño de la Base del Boroscopio:

La metodología para el diseño de la base del boroscopio se inició con la definición precisa de sus dimensiones, las cuales fueron dictadas por la necesidad de asegurar una compatibilidad y un acople seguro con el boroscopio VideoProbe XL Lv de GE Inspection Technologies. Se empleó un enfoque de diseño paramétrico para modelar el saliente extruido y las ranuras internas, elementos críticos cuya geometría fue cuidadosamente definida para garantizar un acople modular y robusto con los anillos. Las decisiones de diseño se basaron en la minimización de puntos de concentración de estrés y la optimización de la distribución de cargas para garantizar la durabilidad bajo condiciones operativas.

b. Diseño de los Anillos Reforzados Flexibles:

El diseño de los anillos representó un desafío metodológico significativo, ya que requería la coexistencia de flexibilidad y resistencia estructural. La metodología adoptada implicó la creación de modelos 3D específicos para cada diámetro de tubería objetivo (4, 6 y 8 pulgadas). Se implementó un diseño paramétrico avanzado que permitió la integración de una estructura con refuerzos radiales, cuya geometría fue optimizada para controlar la deformación elástica del anillo. Paralelamente, se diseñó una ranura interna de acople que asegurara una conexión segura y eficiente con la base del boroscopio. La iteración de diseño se centró en la relación entre el número, la forma y la distribución de los refuerzos radiales y la capacidad de deformación del anillo, buscando un equilibrio óptimo que permitiera la adaptación a las variaciones de diámetro de la tubería y la navegación por codos sin comprometer la integridad estructural o la funcionalidad del sistema.

c. Desarrollo de Ensamblajes Modulares y Verificación de Ajuste:

La modularidad fue un principio rector en la metodología de diseño. Se procedió a la creación de ensamblajes virtuales en SolidWorks®, combinando la base del boroscopio con cada uno de los anillos diseñados. Esta etapa fue crucial para la verificación del ajuste y la tolerancia entre los componentes. La metodología incluyó la realización de simulaciones de interferencia y holgura para asegurar que el acople entre la base y los anillos fuera preciso y sin obstrucciones. Las decisiones de diseño en esta fase se orientaron a la creación de un sistema 'plug-and-play' que maximizara la eficiencia operativa.

3.2.2 Metodología de Selección de Materiales y Optimización para Fabricación Aditiva

La viabilidad y el rendimiento del prototipo dependían críticamente de la metodología empleada para la selección de materiales y la optimización del diseño para la fabricación aditiva (impresión 3D). Este proceso implicó una evaluación exhaustiva de las propiedades mecánicas, la resistencia ambiental y la facilidad de impresión 3D de los materiales candidatos.

a. Criterios de Selección de Materiales:

La metodología de selección de materiales se basó en un análisis de requisitos funcionales y ambientales. Para la base del boroscopio, se priorizaron materiales con alta resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la humedad. Para los anillos de centrado, la metodología se centró en materiales que ofrecieran una flexibilidad excepcional, resistencia a la abrasión y

capacidad de deformación elástica. La justificación de cada material se basó en un equilibrio entre sus propiedades intrínsecas y su idoneidad para el proceso de impresión 3D.

b. Optimización del Diseño para Impresión 3D:

La metodología de optimización del diseño para la fabricación aditiva se implementó para garantizar la calidad y eficiencia del proceso de impresión 3D. Se consideraron los siguientes aspectos:

- **Minimización de Voladizos:** La estrategia de diseño incluyó la reconfiguración de geometrías para reducir al mínimo la necesidad de estructuras de soporte durante la impresión.
- **Orientación de Impresión:** Se desarrolló una metodología para determinar la orientación óptima de cada componente en la plataforma de impresión. Esta decisión se basó en análisis de esfuerzo y en la anisotropía inherente a los materiales impresos en 3D.
- **Establecimiento de Tolerancias Adecuadas:** Se implementó una metodología para definir tolerancias dimensionales de 0.2-0.3 mm en las interfaces de conexión entre componentes. Esta decisión se fundamentó en la comprensión de las variaciones dimensionales típicas de la impresión 3D.
- **Definición del Grosor de Paredes:** La metodología para el grosor de las paredes implicó un análisis de resistencia estructural y peso. Se estableció un grosor mínimo de 2 mm para garantizar una resistencia adecuada sin añadir peso excesivo al prototipo.
- **Simplificación Geométrica:** Se aplicó una metodología de simplificación de formas complejas para facilitar el proceso de impresión y reducir el tiempo de fabricación, sin comprometer la funcionalidad o el rendimiento del prototipo.

c. Metodología para la Definición de Parámetros de Impresión:

La definición de los parámetros de impresión se basó en una metodología empírica y en las recomendaciones de los fabricantes de filamentos, adaptadas a las propiedades específicas del PETG y TPU. Los parámetros establecidos fueron:

- **Altura de Capa:** 0.2 mm.
- **Relleno:** 30% con patrón triangular.
- **Perímetros:** 3.
- **Temperatura de Impresión:** 210°C (para PETG y TPU).
- **Velocidad de Impresión:** 50 mm/s.

- **Plataforma de Impresión:** 60°C.

3.3 Estudio de Diseño y Validación del Comportamiento del Prototipo en SolidWorks®

El tercer objetivo de esta investigación se centró en la evaluación y validación del comportamiento mecánico y funcional del prototipo de centrado con anillos reforzados flexibles. Para ello, se llevó a cabo un estudio exhaustivo mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y simulaciones avanzadas en SolidWorks®. Este estudio se dividió en tres fases principales: Análisis de Movimiento y Comportamiento Dinámico, Análisis de Elementos Finitos (FEA) para Resistencia y Deformación, y Análisis de Propiedades Físicas y Visualización.

3.3.1 Análisis de Movimiento y Comportamiento Dinámico (SolidWorks® Motion)

Esta fase tuvo como objetivo comprender el comportamiento dinámico del prototipo en diferentes escenarios operativos, validando su funcionalidad y la viabilidad de su operación. Se utilizaron las capacidades de SolidWorks® Motion para simular y analizar el movimiento.

a. Simulación de Acople y Desacople de Anillos:

Se creó una animación detallada en SolidWorks® Motion para demostrar la facilidad y el mecanismo de acople y desacople de los anillos a la base del boroscopio. Esta simulación visual permitió confirmar la modularidad del diseño y la fluidez del proceso de intercambio de anillos, validando el concepto de un sistema de acople rápido y eficiente.

b. Simulación de Desplazamiento en Tubería Recta:

Se modelaron secciones de tubería recta con diámetros de 4, 6 y 8 pulgadas dentro del entorno de SolidWorks®. Posteriormente, se configuró y ejecutó una simulación de movimiento del prototipo dentro de cada una de estas tuberías utilizando SolidWorks® Motion. Durante estas simulaciones, se registraron y analizaron los datos de desviación en los ejes X e Y, así como el movimiento a lo largo del eje Z, para cuantificar el centrado y la estabilidad del prototipo. Se generaron gráficos de movimiento detallados para cada eje, lo que permitió una evaluación precisa del comportamiento lineal y la capacidad de avance del prototipo.

c. Generación de Animaciones y Gráficos de Movimiento:

Como parte de esta fase, se exportaron videos de las simulaciones de movimiento realizadas (acople/desacople y desplazamiento en tubería recta) directamente desde SolidWorks® Motion. Adicionalmente, se generaron gráficos de posición, velocidad y aceleración para los ejes X, Y y Z, proporcionando una representación visual y cuantitativa clara del comportamiento dinámico del prototipo. Estas herramientas visuales y cuantitativas fueron esenciales para documentar y comunicar el comportamiento dinámico del prototipo y validar su funcionalidad.

3.3.2 Análisis de Elementos Finitos (FEA) para Resistencia y Deformación (SolidWorks® Simulation)

Esta fase se dedicó a evaluar la integridad estructural de los componentes del prototipo bajo cargas simuladas, confirmando su resistencia y durabilidad en condiciones operativas. Se empleó SolidWorks® Simulation para realizar los análisis de elementos finos.

a. Definición de Materiales y Propiedades:

Dentro de SolidWorks® Simulation, se asignaron las propiedades mecánicas específicas del TPU (poliuretano termoplástico) para los anillos y del PETG (tereftalato de polietileno glicol) para la base del boroscopio. Esta asignación se realizó con base en datos de fabricantes y pruebas de materiales, considerando su comportamiento elástico y de deformación para asegurar la precisión de las simulaciones de tensión y desplazamiento.

b. Análisis Estático de Carga en Anillos:

Se configuraron y ejecutaron análisis estáticos de carga en los modelos 3D de los anillos de 4, 6 y 8 pulgadas. Se aplicaron cargas simuladas que representaban la fuerza de contacto con la pared de la tubería, especialmente en el punto de mayor deformación que podría ocurrir al pasar por un codo. Se evaluaron las tensiones resultantes (según el criterio de Von Mises) y las deformaciones experimentadas por los anillos bajo estas condiciones, generando mapas de colores y gráficos de resultados numéricos.

c. Análisis de Resistencia de la Base del Boroscopio:

Se realizó un análisis estático de resistencia para la base del boroscopio en SolidWorks® Simulation. Se aplicaron cargas que simulaban las fuerzas de

acople con los anillos y las cargas operativas esperadas. Este estudio permitió identificar las tensiones y deformaciones en este componente crítico, asegurando que su diseño fuera robusto y capaz de soportar las condiciones de uso sin comprometer su integridad estructural.

d. Evaluación del Factor de Seguridad:

Se determinó el factor de seguridad del diseño para la base del boroscopio bajo las condiciones de carga más críticas, utilizando las herramientas de SolidWorks® Simulation. Este cálculo fue fundamental para asegurar la integridad estructural del prototipo y su capacidad para operar de manera segura, proporcionando un margen de seguridad contra posibles fallos.

3.3.3 Análisis de Propiedades Físicas y Visualización (SolidWorks® & PhotoView 360/Visualize)

La última fase del estudio se enfocó en la obtención de datos físicos clave y la generación de visualizaciones de alta calidad para enriquecer la comprensión del prototipo, tanto en sus características intrínsecas como en su presentación visual.

a) Evaluación de Tolerancia Dimensional entre los Anillos Centradores y la Tubería

Como parte del análisis físico del modelo en SolidWorks®, se realizó la verificación de la tolerancia radial (T_r) entre el diámetro exterior de los anillos centradores y el diámetro interior de la tubería, con el propósito de garantizar un ajuste guiado flexible que permita el libre desplazamiento del boroscopio sin pérdida de centrado.

El procedimiento se efectuó en el módulo de ensamblaje, donde se configuraron los tres tamaños de anillo (4 in, 6 in y 8 in) dentro de sus respectivas secciones de tubería, manteniendo la alineación coaxial entre ambas piezas. A partir de los modelos 3D, se definieron las dimensiones nominales del diseño:

- Diámetro interno de tubería (D_t) de 2" (50,8 mm) en la configuración base, y diámetros proporcionales para las versiones de 6 y 8 pulgadas.
- Diámetro externo de los anillos (D_a) de 49,6 mm para la base de 2", escalado proporcionalmente según cada configuración.

La holgura radial se calculó empleando la ecuación:

$$Tr = \frac{Dt - Da}{2} \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Con el fin de corroborar el valor teórico en el entorno CAD, se utilizó la herramienta “Measure” del módulo Evaluate, seleccionando las superficies internas de la tubería y las externas del anillo. Esta herramienta permitió obtener la distancia mínima entre ambas superficies cilíndricas, que corresponde al doble de la tolerancia radial.

b. Cálculo de Peso y Centro de Gravedad:

Se utilizaron las herramientas de SolidWorks® para calcular el peso total (masa) y el centro de gravedad de cada configuración del ensamblaje (base + anillo) para los diferentes diámetros. Estos cálculos fueron esenciales para confirmar que el centro de gravedad se mantuviera alineado con el eje central del prototipo en todas las configuraciones, lo cual es crucial para la estabilidad óptima del prototipo durante su desplazamiento en la tubería.

c. Generación de Renderizados Fotorrealistas:

Se crearon imágenes de alta calidad y renderizados fotorrealistas del prototipo en sus diferentes configuraciones (con anillos de 4, 6 y 8 pulgadas) utilizando PhotoView 360 o SolidWorks® Visualize. Estas imágenes mostraron el prototipo dentro de secciones de tubería, representadas de forma semitransparente para una mejor visualización interna. Estos renderizados tuvieron como objetivo mejorar la presentación visual del diseño, destacando su modularidad y adaptabilidad.

d. Creación de Vistas en Sección Detalladas:

Se generaron vistas en sección detalladas del ensamblaje en SolidWorks® para ilustrar la interacción interna de los componentes, especialmente el mecanismo de acople entre la base y los anillos. Estas vistas proporcionaron una comprensión clara de la construcción interna y la funcionalidad del diseño modular, ofreciendo una perspectiva clara de cómo los componentes trabajan en conjunto para lograr el objetivo de centrado.

4 Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y análisis realizados para validar el diseño del prototipo de base centradora para boroscopia. Los resultados se organizan de acuerdo con los objetivos específicos planteados, mostrando el proceso de análisis de requerimientos, el desarrollo del modelo 3D y las validaciones mediante simulación.

4.1 Resultados del análisis de requerimientos técnicos y operativos

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de la metodología aplicada en la sección 3.1, que incluyó la identificación de necesidades operativas, la definición de restricciones y la evaluación comparativa de soluciones existentes. Con estos insumos se consolidó la matriz de requerimientos técnicos, la caja negra del sistema, el análisis comparativo y la matriz de decisión que permitió seleccionar el prototipo más adecuado para su modelado y simulación.

4.1.1 Matriz de requerimientos técnicos y representación funcional global

Con base en las entrevistas realizadas, las observaciones en campo y el análisis dimensional efectuado en una empresa del sector de ensayos no destructivos, se construyó la matriz de requerimientos técnicos del sistema de centrado. Esta herramienta permitió organizar y jerarquizar las necesidades operativas identificadas en la sección 3.1.1, facilitando su posterior traducción en criterios de diseño.

Tabla 4-1 Matriz de requerimientos técnicos para el sistema de centrado del boroscopio

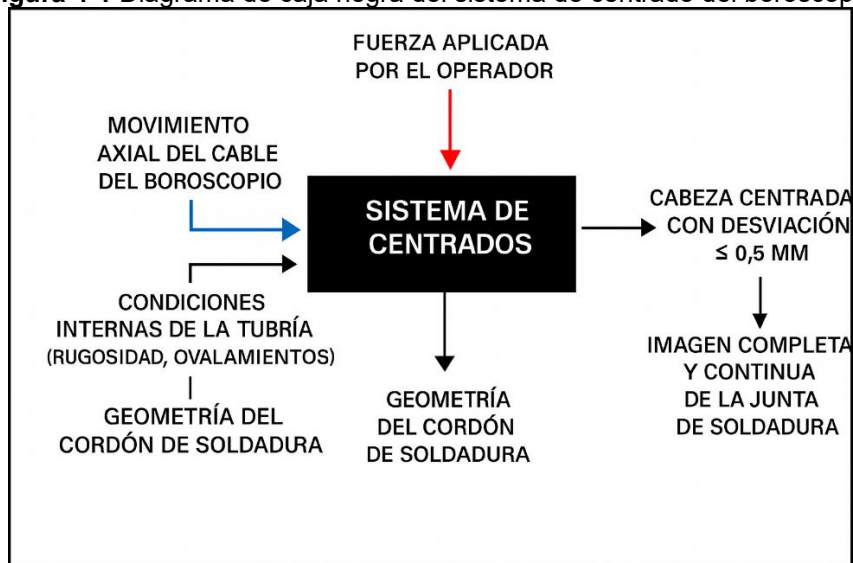
ID	Requerimiento	Descripción	Prioridad
R1	Adaptabilidad a diferentes diámetros	Operación en tuberías de 4", 6" y 8" mediante módulos intercambiables	Alta
R2	Navegación en codos de 90°	Evitar atascamiento o impacto brusco durante curvas	Alta
R3	Centrado preciso	Error máximo permitido $\leq \pm 0,5$ mm respecto al eje	Alta
R4	Estabilidad en desplazamiento	Movilidad sin vibraciones ni desviaciones laterales	Media
R5	Fabricación mediante impresión 3D	Compatible con TPU y PETG	Media

R6	Peso reducido	Peso total $\leq 300\text{--}500\text{ g}$	Media
R7	Durabilidad	Resistencia al desgaste por uso repetitivo	Baja

4.1.1.1 Representación funcional global (Caja Negra)

Derivado de los requerimientos y del comportamiento observado durante la inspección boroscópica, se consolidó la siguiente caja negra del sistema:

Figura 4-1 Diagrama de caja negra del sistema de centrado del boroscopio



Entradas:

- ✓ Movimiento axial del cable
- ✓ Fuerza aplicada por el operador
- ✓ Condiciones internas de la tubería
- ✓ Geometría del cordón de soldadura

Proceso interno:

Sistema de centrado del boroscopio, mantener la cámara alineada con el eje de la tubería

Salida:

- ✓ Cabezal centrado
- ✓ Imagen continua y completa de la soldadura

4.1.1.2 Validación funcional (Caja Transparente)

Para verificar el cumplimiento de la función global del sistema, se aplicó la metodología de Caja Transparente, descomponiendo el dispositivo en sus subfunciones internas. Este análisis permite confirmar que cada acción parcial contribuye de manera coherente al centrado del cabezal del boroscopio. La *Figura 4-2* muestra la estructura funcional resultante y la *Tabla 4-3* resume las subfunciones y los elementos asociados.

Figura 4-2 Caja transparente del sistema de centrado: funciones descompuestas

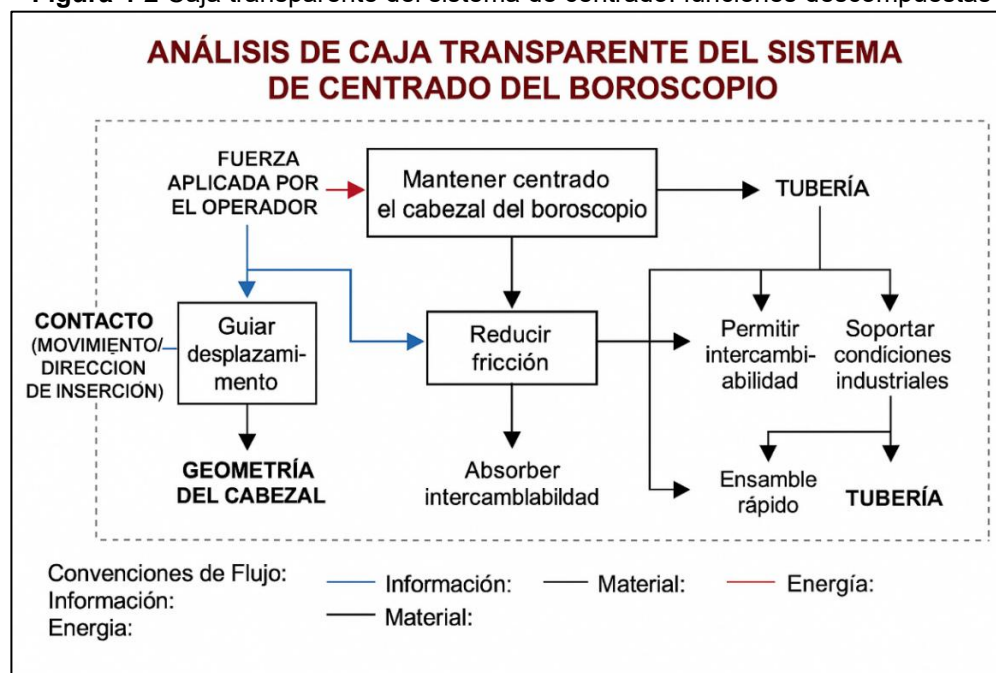


Tabla 4-2 Descomposición funcional del sistema de centrado (Caja Transparente)

Función	Descripción	Elementos involucrados
Función principal	Mantener centrado el cabezal del boroscopio.	Sistema de centrado.
SF1 – Guiar el desplazamiento	Permitir avance constante sin atascos.	Geometría externa del dispositivo.
SF2 – Reducir fricción	Minimizar resistencia contra la pared interna.	TPU o ruedas de polímero.
SF3 – Absorber irregularidades	Compensar ovalamientos y rugosidades internas.	Material flexible (TPU).
SF4 – Permitir intercambiabilidad	Ajustarse a múltiples diámetros.	Anillos o módulos removibles.
SF5 – Ensamble rápido	Montaje sin herramientas.	Sistema de clip, presión o rosca.

El análisis de la *figura 4-2* se confirma la coherencia del diseño seleccionado con respecto a las funciones requeridas dentro del sistema.

4.1.2 Análisis comparativo de soluciones existentes y validación funcional

A partir del estudio presentado en la sección 3.1.3, se elaboró un análisis comparativo entre tres tipos de soluciones comúnmente empleadas para mantener centrado un equipo boroscópico dentro de tuberías.

Tabla 4-3 Comparación de soluciones existentes para centrado en inspecciones boroscópicas

Característica	Centradores de ruedas	Sistemas neumáticos	Anillos reforzados flexibles
Adaptabilidad	Media	Alta	Alta
Navegación en codos	Baja	Media	Alta
Precisión de centrado	Media	Alta	Alta
Estabilidad	Alta	Media	Alta
Fabricación	Media	Baja	Alta
Ligereza	Media	Baja	Alta
Durabilidad	Media	Media	Alta
Complejidad	Baja	Alta	Baja

El análisis demostró que la solución de anillos flexibles reforzados ofrece el mejor equilibrio entre adaptabilidad, centrado y fabricabilidad.

4.1.3 Matriz de decisión

Con base en el análisis comparativo y los requerimientos establecidos, se desarrolló una matriz de decisión para seleccionar la solución más adecuada. La *tabla 4-6* presenta los resultados de esta evaluación.

Tabla 4-4 Matriz de decisión para selección de concepto

Criterio	Peso	Centradores de ruedas	Sistemas neumáticos	Anillos reforzados flexibles
Adaptabilidad a diferentes diámetros	0.20	2 (0.40)	4 (0.80)	5 (1.00)



Capacidad para navegar codos de 90°	0.25	1 (0.25)	3 (0.75)	5 (1.25)
Precisión de centrado	0.20	3 (0.60)	4 (0.80)	4 (0.80)
Facilidad de fabricación	0.15	3 (0.45)	1 (0.15)	5 (0.75)
Ligereza	0.10	3 (0.30)	2 (0.20)	4 (0.40)
Durabilidad	0.10	3 (0.30)	3 (0.30)	4 (0.40)
Total	1.00	2.30	3.00	4.60

Escala: 1 (deficiente) a 5 (excelente). Valores en paréntesis representan la puntuación ponderada.

Como se observa en la matriz de decisión, el sistema de anillos reforzados flexibles obtuvo la puntuación más alta (4.60/5.00), destacándose especialmente en los criterios de mayor peso: adaptabilidad a diferentes diámetros y capacidad para navegar codos de 90°. Esta solución también presenta ventajas significativas en términos de facilidad de fabricación mediante impresión 3D.

4.2 Resultados del Diseño del Prototipo Virtual en 3D

La aplicación de la metodología de diseño detallada en la sección 3.2 culminó en la obtención de un prototipo virtual en 3D del sistema de centrado para boroscopios, caracterizado por su adaptabilidad y optimización para la fabricación aditiva. Los resultados de este proceso de diseño no solo validaron la viabilidad conceptual del sistema, sino que también proporcionaron una base sólida para las fases posteriores de simulación y fabricación.

4.2.1 Resultados del Modelado CAD Paramétrico Detallado

La fase de modelado CAD paramétrico en SolidWorks® generó modelos 3D precisos y funcionales de los componentes clave, que sirvieron como el primer resultado tangible del proceso de diseño. Estos modelos no solo representaron la geometría final de las piezas, sino que también encapsularon la lógica paramétrica que permite su futura modificación y escalabilidad.

a. Base del Boroscopio:

El resultado del modelado de la base del boroscopio fue un modelo 3D que cumplió con las dimensiones exactas requeridas para el acople con el boroscopio VideoProbe XL Lv. La precisión en el diseño del saliente extruido y las ranuras internas fue confirmada a través de las herramientas de

SolidWorks®, asegurando un acople modular y seguro con los anillos. La geometría final de la base demostró ser robusta y adecuada para su función como componente central, garantizando la estabilidad y la integración efectiva con el boroscopio como se aprecia en la *Figura 4-4*, en esta se aprecia la base de boroscopio con el anillo de 6 pulgadas.

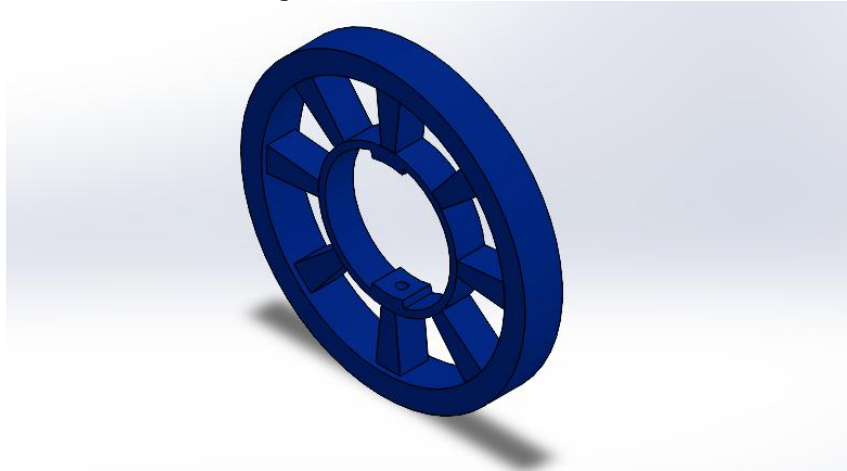
Figura 4-3 Base de la cámara del boroscopio



b. Anillos Reforzados Flexibles:

Los modelos 3D resultantes para los anillos de 4, 6 y 8 pulgadas reflejaron fielmente el diseño paramétrico propuesto. La incorporación de la estructura con refuerzos radiales y la ranura interna de acople fue exitosa, confirmando visualmente la capacidad de estos elementos para proporcionar la flexibilidad necesaria y una conexión segura a la base como se aprecia en la *Figura 4-5*. La representación visual de los anillos validó su diseño innovador y su potencial para la deformación controlada, esencial para su adaptación a diferentes diámetros de tubería y la navegación por codos. Los anillos de 4 y 8 pulgadas se encuentran en el *Anexo A* y *Anexo B* respectivamente.

Figura 4-4 Anillo flexible de 6"



c. Ensamblajes Modulares y Verificación de Ajuste:

La creación de ensamblajes virtuales de la base con cada uno de los anillos demostró la modularidad inherente del diseño. Las verificaciones de ajuste y tolerancia realizadas en SolidWorks® confirmaron que el acople entre la base y los anillos es preciso y sin interferencias como se aprecia en la *Figura 4-6* y la *Figura 4-7*. Este resultado es crucial, ya que, valida la facilidad de intercambio rápido de anillos según el diámetro de la tubería, mejorando la versatilidad y simplificando el mantenimiento y la operación del prototipo en campo.

Figura 4-5 Primer paso para el acople

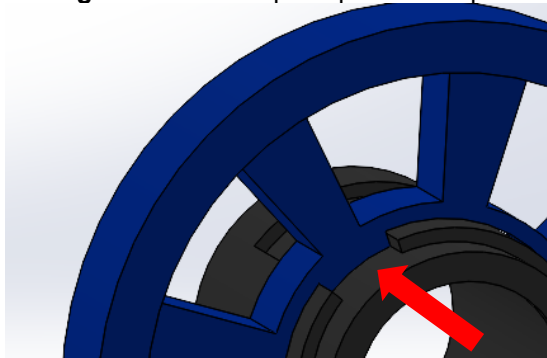
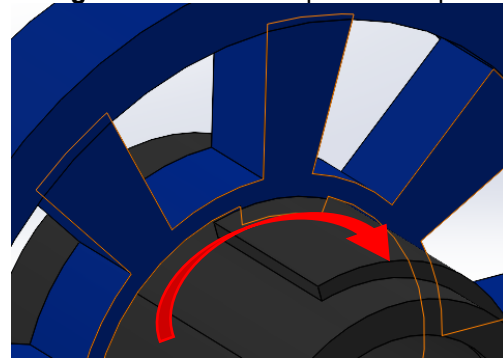


Figura 4-6 Paso final para el acople



4.2.2 Resultados de la Selección de Materiales y Optimización para Fabricación Aditiva

Los resultados de la metodología de selección de materiales y optimización para impresión 3D se manifestaron en la definición de materiales y parámetros de diseño que garantizan la viabilidad y el rendimiento del prototipo en su fase de fabricación.

a. Materiales Seleccionados:

La selección de PETG para la base del boroscopio y TPU para los anillos de centrado fue el resultado directo del análisis de requisitos funcionales del sistema. El PETG demostró ser un material adecuado para la base debido a su elevada resistencia mecánica, buena estabilidad dimensional y facilidad de impresión mediante tecnología de fabricación aditiva. Estas propiedades permiten obtener una estructura rígida capaz de soportar las cargas transmitidas durante la manipulación del dispositivo de inspección.

Por otra parte, el TPU fue seleccionado para los anillos de centrado debido a su naturaleza elastomérica, que le permite deformarse ligeramente al entrar en contacto con la superficie interna de la tubería. Esta característica facilita la adaptación del sistema a pequeñas variaciones geométricas presentes en el interior de la tubería, reduciendo el riesgo de atascamiento y mejorando la estabilidad del dispositivo durante la inspección boroscópica.

La combinación de ambos materiales permite aprovechar simultáneamente la rigidez estructural del PETG y la capacidad de deformación del TPU, lo cual contribuye a mejorar el comportamiento del sistema de centrado dentro de la tubería.

b. Optimización del Diseño para Impresión 3D:

Durante el proceso de diseño se incorporaron criterios específicos de manufactura aditiva con el fin de garantizar la fabricabilidad de los componentes mediante impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling). Entre estas consideraciones se incluyó la optimización de la geometría para minimizar la necesidad de estructuras de soporte, facilitar la orientación de impresión y asegurar una adecuada calidad dimensional en las superficies funcionales. [6]
[7]

Asimismo, se definieron tolerancias dimensionales y ajustes mecánicos entre los componentes ensamblados, con el propósito de garantizar un montaje adecuado entre la base del boroscopio y el sistema de anillos de centrado. Para este propósito se adoptó el sistema de tolerancias ISO basado en agujero base, empleando un ajuste con juego controlado equivalente a H8/f7, el cual permite un ensamblaje manual sencillo sin requerir herramientas adicionales y facilita el desmontaje para mantenimiento.

Este tipo de ajuste proporciona un pequeño juego radial que compensa las variaciones dimensionales propias del proceso de impresión 3D, asegurando al

mismo tiempo la estabilidad del conjunto durante la operación. Las dimensiones nominales, tolerancias y especificaciones de ajuste fueron incluidas explícitamente en los planos de fabricación del sistema.

Adicionalmente, se diseñó una familia de anillos de centrado con diferentes diámetros externos para adaptarse a diversas condiciones de inspección y configuraciones de tubería. Aunque estos anillos presentan variaciones dimensionales en su diámetro externo, todos mantienen la misma geometría estructural, espesor de pared y material de fabricación. Debido a esta uniformidad geométrica y material, los parámetros de fabricación aditiva pueden mantenerse constantes para todas las variantes del anillo.

c. Parámetros de Impresión Recomendados:

La definición de los parámetros de impresión se realizó considerando las propiedades de los materiales seleccionados y la experiencia práctica en procesos de fabricación aditiva. Estos parámetros fueron establecidos con el objetivo de garantizar una adecuada calidad dimensional, resistencia mecánica y reproducibilidad del proceso de fabricación. [8]

La Tabla 4-5 presenta los parámetros de impresión utilizados para la fabricación de la base del boroscopio y los anillos de centrado.

Tabla 4-5 Parámetros de impresión recomendados para los componentes del sistema

Parámetro	Base del boroscopio (PETG)	Anillos de centrado (TPU)
Altura de capa	0.20 mm	0.20 mm
Densidad de relleno	60%	80%
Patrón de relleno	Grid	Gyroid
Temperatura de extrusión	235 – 240 °C	215 – 220 °C
Temperatura de cama	80 °C	50 °C
Velocidad de impresión	40 – 45 mm/s	20 – 25 mm/s
Número de perímetros	4	5
Espesor de pared	1.6 mm	2.0 mm

Estos parámetros permiten obtener piezas con suficiente resistencia estructural y precisión dimensional, reduciendo al mismo tiempo la probabilidad de defectos durante el proceso de impresión. La aplicación consistente de estos parámetros

asegura que el prototipo pueda reproducirse de manera confiable y eficiente, garantizando la uniformidad en la fabricación de los componentes.

Las especificaciones de fabricación, tolerancias dimensionales y ajustes de ensamblaje definidos durante el proceso de diseño fueron incorporadas en los planos técnicos del sistema, los cuales se presentan como documentos anexos al presente trabajo.

4.3 Resultados del Estudio de Diseño y Validación del Comportamiento del Prototipo en SolidWorks®

Los estudios realizados en SolidWorks® han proporcionado una validación robusta del diseño del prototipo de anillos flexibles, confirmando su viabilidad y rendimiento bajo diversas condiciones. A continuación, se detallan los resultados clave obtenidos de cada análisis, destacando su importancia y las implicaciones positivas para el proyecto, siguiendo la misma estructura de la metodología.

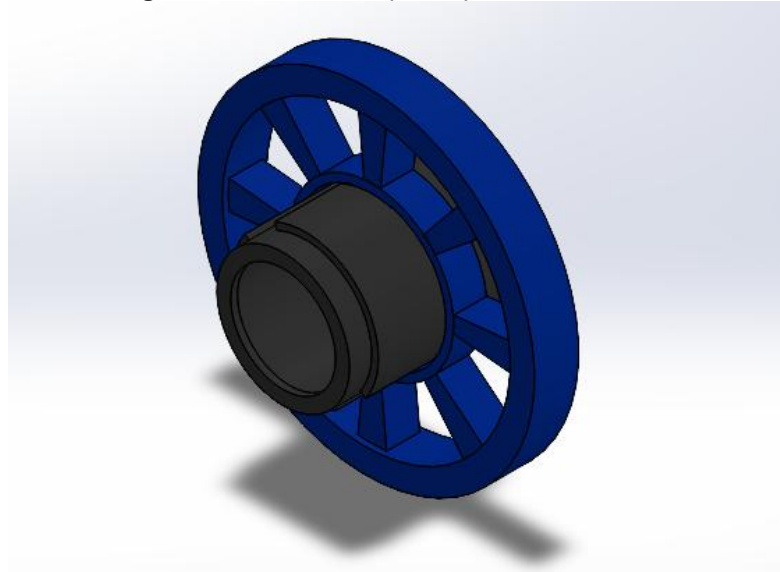
4.3.1 Análisis de Movimiento y Comportamiento Dinámico (SolidWorks® Motion)

El análisis de movimiento confirmó la funcionalidad y la viabilidad operativa del prototipo. Los resultados clave son los siguientes:

a. Simulación de Acople y Desacople de Anillos:

La animación detallada en SolidWorks® Motion demostró la facilidad y el mecanismo de acople y desacople de los anillos a la base del boroscopio, confirmando la modularidad del diseño y la fluidez del proceso de intercambio de anillos, en la *Figura 4-9* se aprecia como están acopladas las piezas con una exactitud precisa.

Figura 4-7 Modelo del prototipo con anillo de 6"



b. Simulación de Desplazamiento en Tubería Recta:

Las gráficas de desplazamiento en X e Y para el anillo de 4 pulgadas muestran líneas planas, lo que indica que no hay desplazamiento significativo en estas direcciones como se muestra en la *Figura 4-10* tomada de los resultados de SolidWorks®. Por el contrario, la gráfica de desplazamiento en el eje Z muestra un comportamiento constante, lo que indica que el prototipo se desplaza de manera estable y sin interferencias, como se aprecia en la *Figura 4-11*. Este es un resultado positivo, ya que confirma que el prototipo se mantiene centrado y estable dentro de la tubería, sin desviaciones laterales que puedan causar fricción excesiva o atascamientos. La ausencia de movimiento en X e Y asegura que la energía de propulsión se dirija eficientemente al movimiento longitudinal, optimizando el rendimiento del prototipo.

Figura 4-8 Graficas de desplazamiento de X e Y

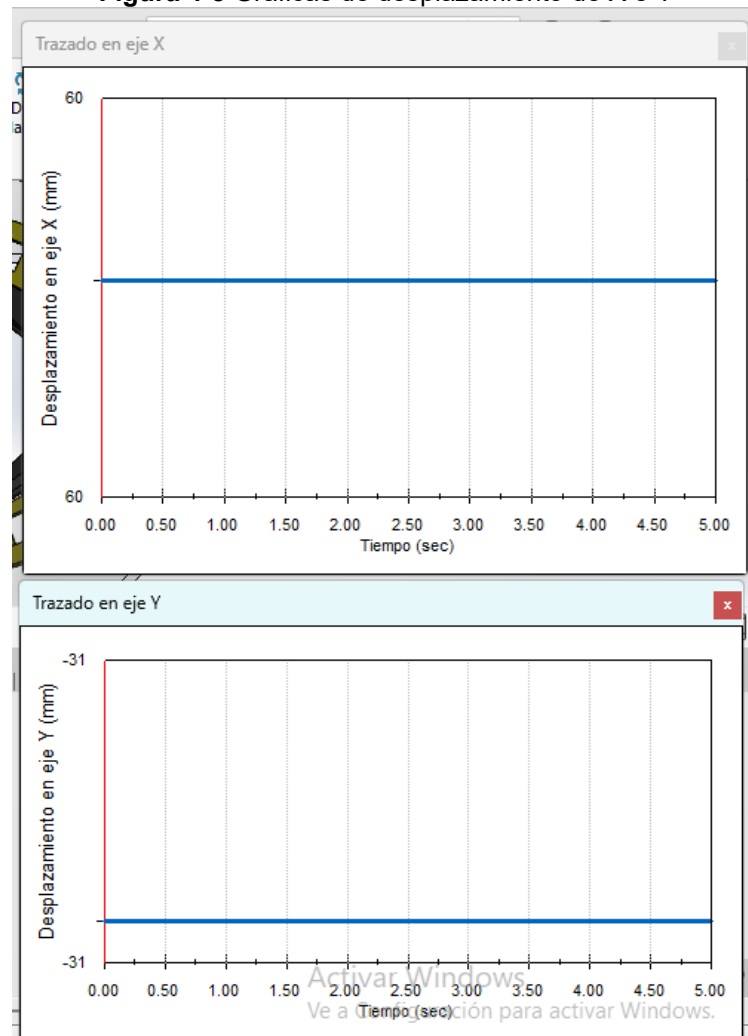
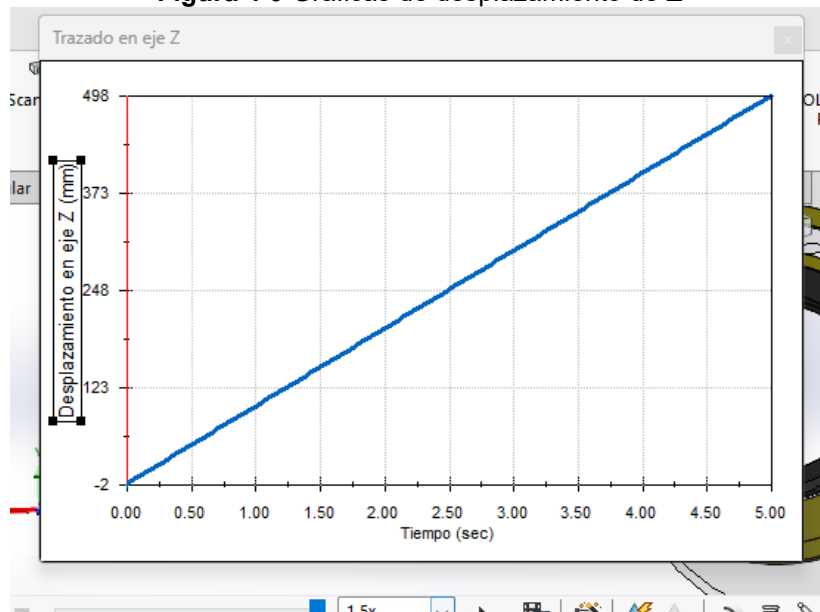


Figura 4-9 Graficas de desplazamiento de Z



c. Generación de Animaciones y Gráficos de Movimiento:

Los videos de las simulaciones de movimiento y los gráficos de posición, velocidad y aceleración para los ejes X, Y y Z proporcionaron una representación visual y cuantitativa clara del comportamiento dinámico del prototipo, validando su funcionalidad.

4.3.2 Análisis de Elementos Finitos (FEA) para Resistencia y Deformación (SolidWorks® Simulation)

El análisis de elementos finitos (FEA) demostró la integridad estructural de los componentes del prototipo bajo cargas simuladas, confirmando su resistencia y durabilidad en condiciones operativas. Los resultados clave son los siguientes:

a. Análisis Estático de Carga (Desplazamientos):

En el estudio de desplazamientos, se observó que la base del boroscopio presenta un comportamiento altamente rígido, con un desplazamiento máximo de 2.478×10^{-4} mm, tal como se muestra en la *Figura 4-12*. Este valor, prácticamente despreciable, confirma la estabilidad dimensional de la base incluso ante las fuerzas de contacto generadas durante la manipulación y avance del dispositivo en la tubería.

Para el caso del ensamblaje conformado por la base y el anillo flexible de 4 pulgadas, la simulación reportó un desplazamiento máximo de $2.939\text{e-}02$ mm, ilustrado en la *Figura 4-13*. Esta deformación, aunque mayor que la de la base rígida, es completamente esperada y deseable, ya que corresponde al comportamiento elástico controlado del material TPU. Gracias a esta flexibilidad, los anillos pueden adaptarse a la geometría interna de la tubería, absorber pequeñas irregularidades y mantener el centrado del dispositivo sin comprometer su resistencia mecánica.

Los resultados confirman que, bajo las presiones de contacto típicas de la operación, el prototipo conserva su forma, funcionalidad y estabilidad, evitando deformaciones excesivas, atascamientos o daños estructurales. Adicionalmente, los análisis estáticos correspondientes a los anillos de 6 y 8 pulgadas, presentados en *El Anexo C* y *El Anexo D*, corroboran este mismo comportamiento seguro y eficiente en los distintos diámetros evaluados.

Figura 4-10 Análisis estático de carga base de cámara

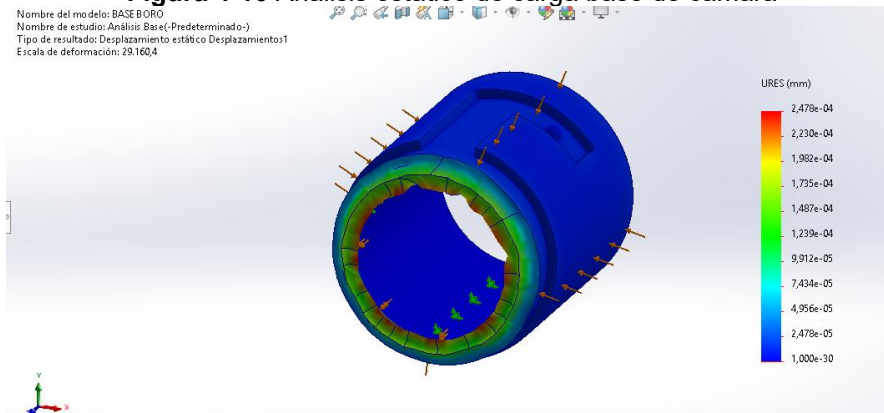
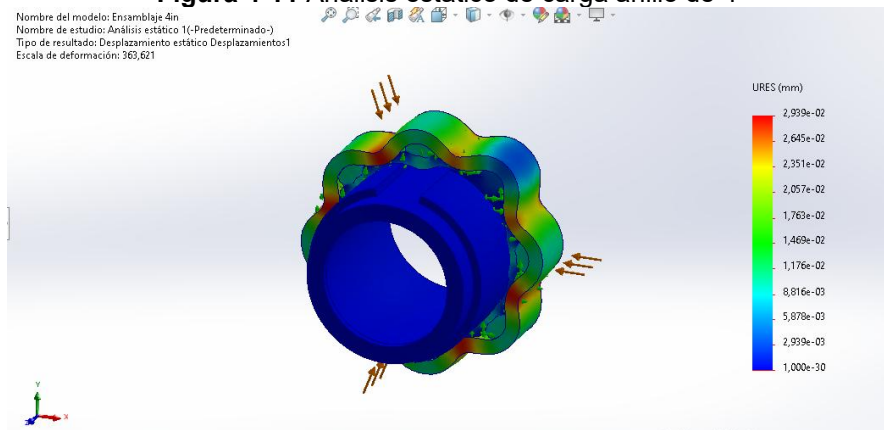


Figura 4-11 Análisis estático de carga anillo de 4"



b. Análisis Estático de Carga (Tensiones de Von Mises):

El análisis de tensiones de Von Mises es fundamental para evaluar la resistencia del material y la integridad estructural del prototipo bajo carga. Los resultados de este análisis para la base del boroscopio y los ensamblajes de anillos de 4, 6 y 8 pulgadas muestran que las tensiones generadas están muy por debajo del límite elástico del material ($6.894 \times 10^7 \text{ N/m}^2$). Por ejemplo, la tensión máxima en la base del boroscopio es de $1.968 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, y en el ensamble de la base con el anillo de 4" es de $1.968 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, como se aprecian en las Figuras 4-14 y 4-15. Estos valores bajos de tensión son altamente favorables, ya que indican que el prototipo no experimentará deformación plástica ni fallas por fatiga bajo las condiciones de operación. La capacidad del diseño para distribuir las tensiones de manera uniforme y mantenerlas dentro de rangos seguros es un indicador clave de su durabilidad y fiabilidad a largo plazo. El análisis estático de tensiones de los anillos de 6 y 8 pulgadas se encuentra en los Anexo E y Anexo F respectivamente.

Figura 4-12 Análisis estático de tensiones base de cámara

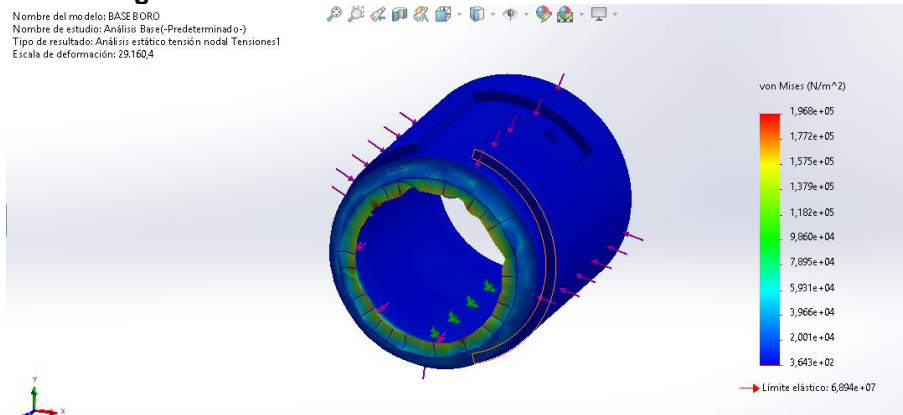
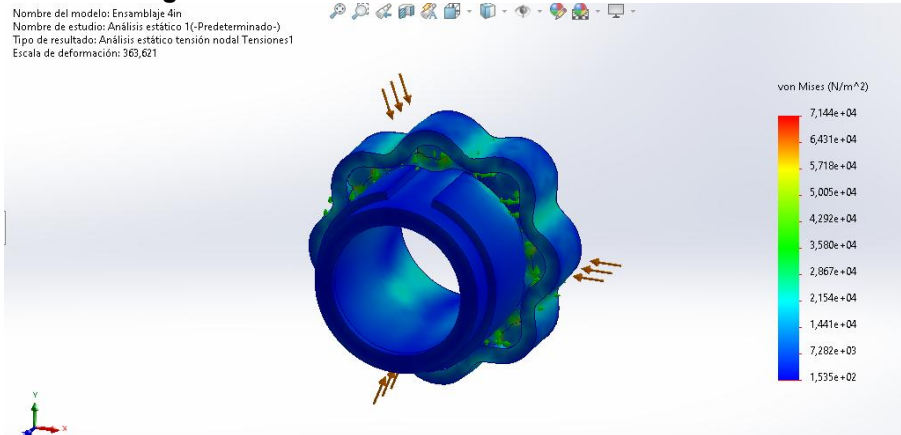


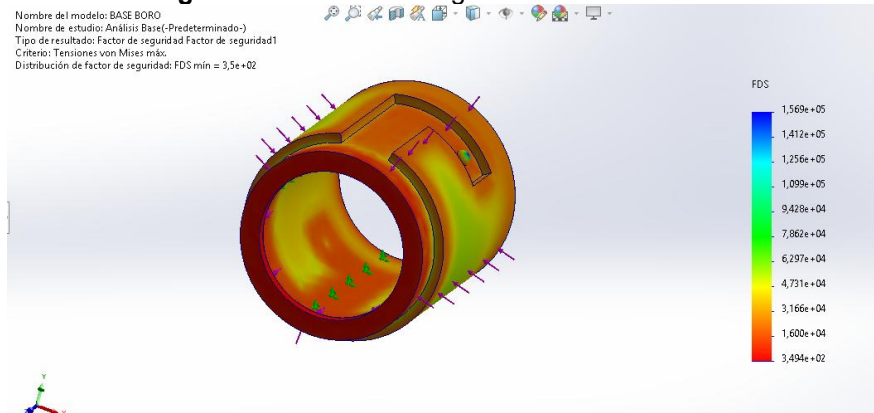
Figura 4-13 Análisis estático de tensiones anillo de 4"



c. Análisis de Factor de Seguridad:

El análisis de factor de seguridad (FDS) proporciona una medida directa de la robustez del diseño frente a posibles fallas. Los resultados para la base del boroscopio revelan factores de seguridad significativamente altos. Por ejemplo, el FDS mínimo para la base del boroscopio es de 350 como se muestra en la *Figura 4-16*. Un factor de seguridad tan elevado es un resultado excelente, ya que indica que el prototipo tiene una gran capacidad para soportar cargas mucho mayores de las esperadas sin riesgo de falla. Esto no solo garantiza la seguridad operativa, sino que también proporciona un margen considerable para variaciones inesperadas en las condiciones de uso o propiedades del material. Un alto factor de seguridad es un sello distintivo de un diseño bien concebido y robusto.

Figura 4-14 Factor de seguridad base de cámara



4.3.3 Análisis de Propiedades Físicas y Visualización (SolidWorks® & PhotoView 360/Visualize)

a. Validación Geométrica y de Propiedades Físicas de la Tolerancia entre los Anillos Centradores y la Tubería

La validación geométrica y de propiedades físicas permitió comprobar que las dimensiones establecidas en el diseño se reproducen correctamente en el modelo tridimensional, garantizando el ajuste guiado previsto entre los anillos y la tubería.

En el entorno SolidWorks® Evaluate → Measure se verificó la distancia mínima entre la superficie interior de la tubería y la superficie exterior de los anillos centradores. Las mediciones arrojaron una holgura total promedio de 1 mm, equivalente a 0,5 mm por lado, lo cual se encuentra dentro del rango de tolerancia calculado teóricamente ($Tr \approx 0,6mm$).

Este resultado confirma que el sistema mantiene una separación uniforme alrededor del eje, evitando interferencias durante el desplazamiento axial.

De manera complementaria, se analizaron las propiedades físicas del ensamblaje para las tres configuraciones de diámetro (4 in, 6 in y 8 in), con el fin de determinar la masa, el volumen y la superficie efectiva de contacto. Los valores obtenidos se presentan en la *Tabla 4-6*.

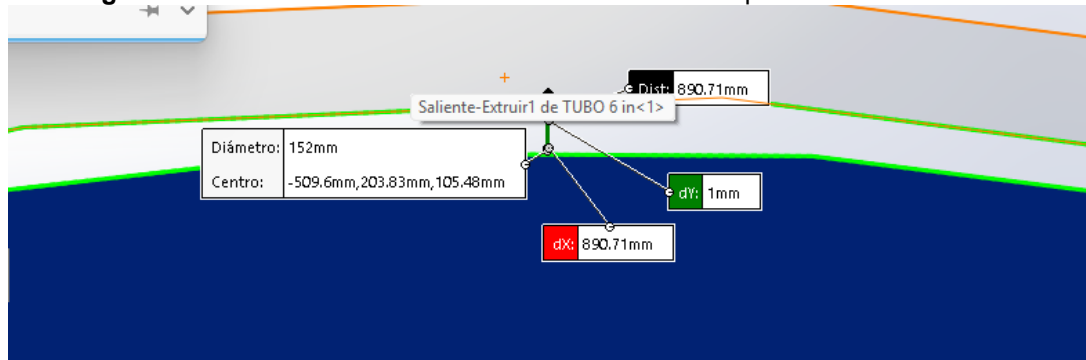
Tabla 4-6 Propiedades físicas y validación geométrica de los anillos centradores en SolidWorks®

Ensamble	Masa (g)	Volumen (mm³)	Área de superficie (mm²)	Observación
4 in	140,81	140.813,09	53.641,19	Ajuste concéntrico, holgura 0,5–0,6 mm
6 in	235,27	235.265,22	74.219,14	Contacto uniforme, sin interferencias
8 in	378,50	378.501,29	110.718,62	Mayor área de contacto, misma holgura radial

En todos los casos, la holgura medida en SolidWorks® coincidió con la ecuación (3-5) y permitió comprobar que los anillos se mantienen centrados dentro de la tubería.

El incremento progresivo de la masa y del volumen con el diámetro refleja una relación directamente proporcional, mientras que el centro de masa permanece cercano al eje geométrico, condición fundamental para la estabilidad durante la inspección.

Figura 4-15 Validación de la tolerancia en SolidWorks® para el ensamble de 6”.



En la *Figura 4-17* muestra en la vista seccional una holgura total de 1 mm (0,5 mm por lado) entre el anillo y la pared de la tubería, confirmando el ajuste guiado flexible definido en el diseño.

Los resultados evidencian que el diseño mantiene la coherencia geométrica entre la teoría y el modelo CAD, garantizando la movilidad y estabilidad requeridas.

b. Cálculo de Peso y Centro de Gravedad:

Los valores de masa, volumen y área superficial presentados en la *Tabla 4-7* demuestran que el diseño del prototipo es consistente con los requisitos de ligereza y compacidad necesarios para su función. La masa de los ensamblajes, incluso para el anillo de mayor diámetro (8in con 378.50 gramos), es considerablemente baja. Esto es un resultado positivo ya que minimiza la carga sobre el boroscopio y facilita la propulsión del prototipo a través de las tuberías. Un peso reducido también contribuye a una menor inercia, lo que se traduce en una mayor agilidad y control durante el movimiento, especialmente en cambios de dirección o al navegar por secciones irregulares de la tubería. La relación entre el volumen y la masa de cada ensamblaje es coherente con la densidad de los materiales utilizados (TPU para los anillos y PETG para la base), lo que confirma la eficiencia del diseño en el uso de material y la minimización de peso innecesario. Además, los cálculos de centro de gravedad confirmaron que este se mantiene alineado con el eje central del prototipo en todas las configuraciones. Este es un aspecto crítico para la estabilidad direccional del prototipo, ya que evita inclinaciones o desviaciones indeseadas durante su desplazamiento, lo cual es fundamental para la precisión de la inspección y para prevenir posibles atascamientos.

Tabla 4-7 Evaluación dimensional de ensamblajes funcionales adaptativos para sistemas de tuberías

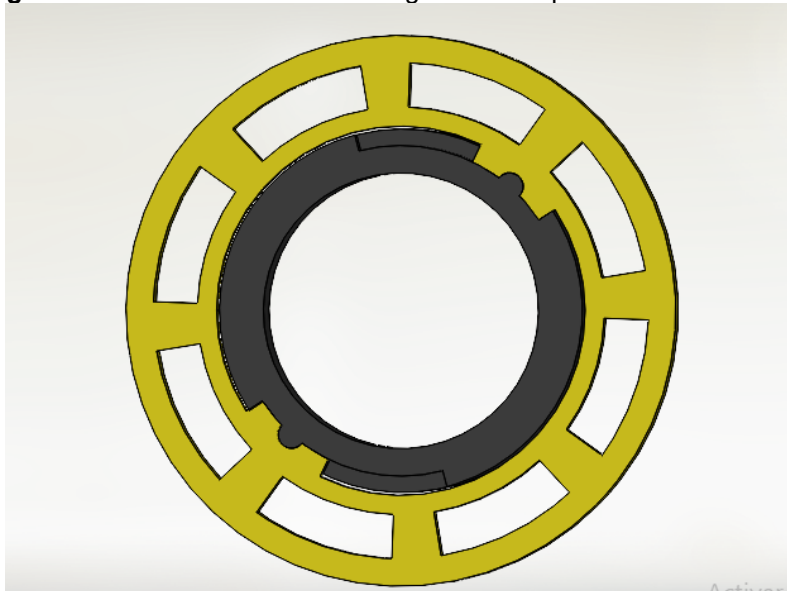
Ensamblaje	Masa (gramos)	Volumen (mm ³)	Área de Superficie (mm ²)
Ensamble 4in	160,1	160100	50265,48
Ensamble 6in	235,27	235265,22	74219,14
Ensamble 8in	378,5	378501,29	110718,62

Estos datos fueron tomados del Anexo G, Anexo H y Anexo I.

c. Creación de Vistas en Sección Detalladas:

Las vistas en sección detalladas del ensamblaje proporcionaron una comprensión clara de la interacción interna de los componentes, especialmente el mecanismo de acople entre la base del boroscopio y los anillos. Estas vistas demostraron la eficacia del diseño modular, mostrando cómo los componentes se ensamblan de manera precisa y segura, como se aprecia en la Figura 4-18. La claridad de estas vistas es crucial para validar la viabilidad de fabricación y ensamblaje del prototipo, asegurando que todas las piezas encajen correctamente y funcionen como se espera. Este análisis visual detallado confirma que el diseño no solo es funcional en teoría, sino también práctico en su implementación. Las otras dos vistas se pueden encontrar en el *Anexo J* y en el *Anexo K*.

Figura 4-16 Vista de sección del seguro del acople del ensamble de 4"



d. Generación de Renderizados Fotorrealistas:

La generación de renderizados fotorrealistas del prototipo en sus diferentes configuraciones (con anillos de 4, 6 y 8 pulgadas) y dentro de secciones de tubería semitransparentes permitió una visualización clara y detallada del diseño. Estas imágenes no solo mejoraron la presentación estética del prototipo, sino que también sirvieron para destacar visualmente su modularidad y adaptabilidad a los distintos diámetros de tubería. Los renderizados confirmaron que el diseño es estéticamente agradable y funcionalmente intuitivo, lo que facilita la comprensión de su operación y sus ventajas. Dichos renderizados pueden observarse en el *Anexos L, Anexo M y Anexo N*.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

A partir del desarrollo del presente trabajo se concluye que fue posible definir de manera clara y estructurada los requerimientos técnicos y operativos necesarios para el diseño de un sistema de centrado aplicado a inspecciones boroscópicas de soldaduras en tuberías. El análisis de campo realizado permitió identificar las principales limitaciones del proceso actual y establecer parámetros funcionales como adaptabilidad a diferentes diámetros, estabilidad durante el desplazamiento, precisión de centrado y compatibilidad con las condiciones reales de operación.

El diseño del prototipo virtual en tres dimensiones permitió materializar una solución modular compuesta por una base rígida y anillos flexibles intercambiables, capaz de adaptarse a tuberías de 4, 6 y 8 pulgadas. El modelado paramétrico facilitó la definición precisa de geometrías, tolerancias y mecanismos de acople, garantizando la coherencia dimensional del conjunto y su correcta integración con el sistema de boroscopia.

La validación del comportamiento del prototipo en entornos virtuales demostró que el sistema presenta un desempeño estructural y funcional adecuado. Las simulaciones de movimiento confirmaron la estabilidad del desplazamiento axial, mientras que los análisis de elementos finitos evidenciaron que las deformaciones y tensiones generadas en los componentes permanecen dentro de rangos seguros. Asimismo, el análisis del Círculo de Mohr permitió verificar que el estado tensional del anillo flexible se mantiene en el régimen elástico del material, sin riesgo de falla estructural.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el sistema de centrado propuesto cumple con los objetivos planteados y constituye una solución técnicamente viable para mejorar la calidad y confiabilidad de las inspecciones boroscópicas de soldaduras en tuberías, estableciendo una base sólida para su futura implementación y evaluación experimental.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda como trabajo futuro la fabricación física del sistema de centrado propuesto mediante técnicas de manufactura aditiva, con el fin de validar experimentalmente el comportamiento observado en los entornos virtuales. La realización de pruebas en condiciones reales de inspección permitiría contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones y ajustar parámetros de diseño

como el espaciamiento entre anillos, la rigidez de los elementos flexibles y las tolerancias de acople.

Es aconsejable complementar el estudio con ensayos experimentales orientados a medir la fuerza real de empuje ejercida por los operadores durante la inspección boroscópica. La obtención de estos datos permitiría refinar los criterios de diseño empleados en el análisis de pandeo del cable y aumentar la precisión de los modelos estructurales utilizados.

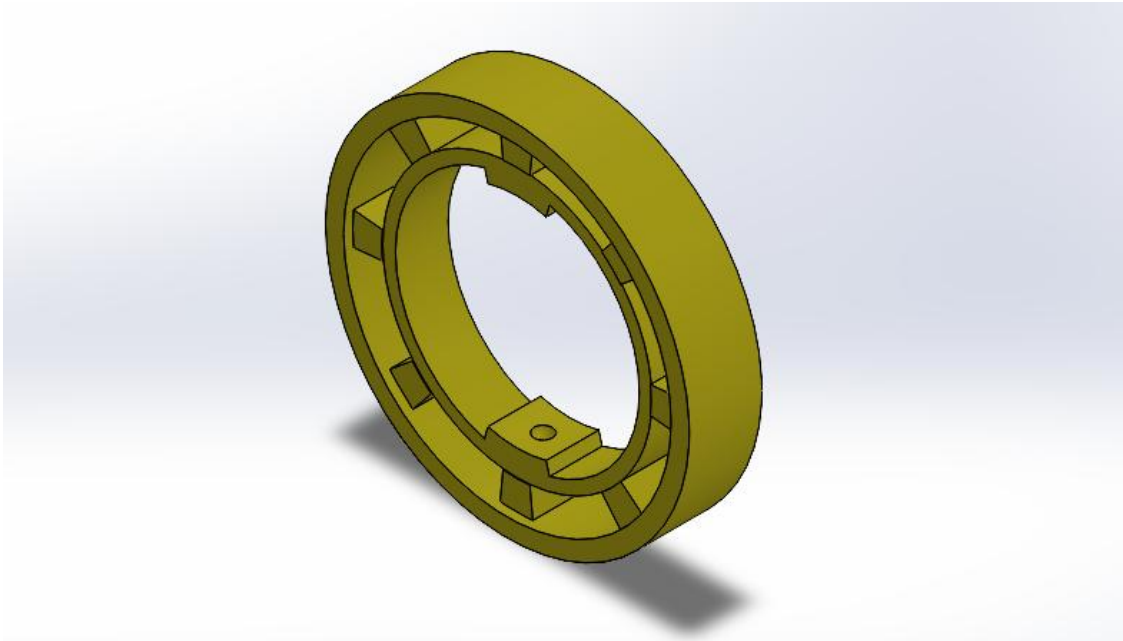
Se sugiere evaluar el desempeño del sistema de centrado en tuberías con geometrías más complejas, incluyendo codos, reducciones y variaciones de ovalidad, con el propósito de ampliar el alcance del diseño y verificar su comportamiento bajo condiciones operativas más exigentes.

Se recomienda analizar el efecto del desgaste por fricción entre los anillos centradores y la pared interna de la tubería, así como su impacto en la vida útil del sistema. Este análisis podría incluir la evaluación de diferentes formulaciones de materiales flexibles o recubrimientos que optimicen la resistencia al desgaste sin afectar la capacidad de centrado.

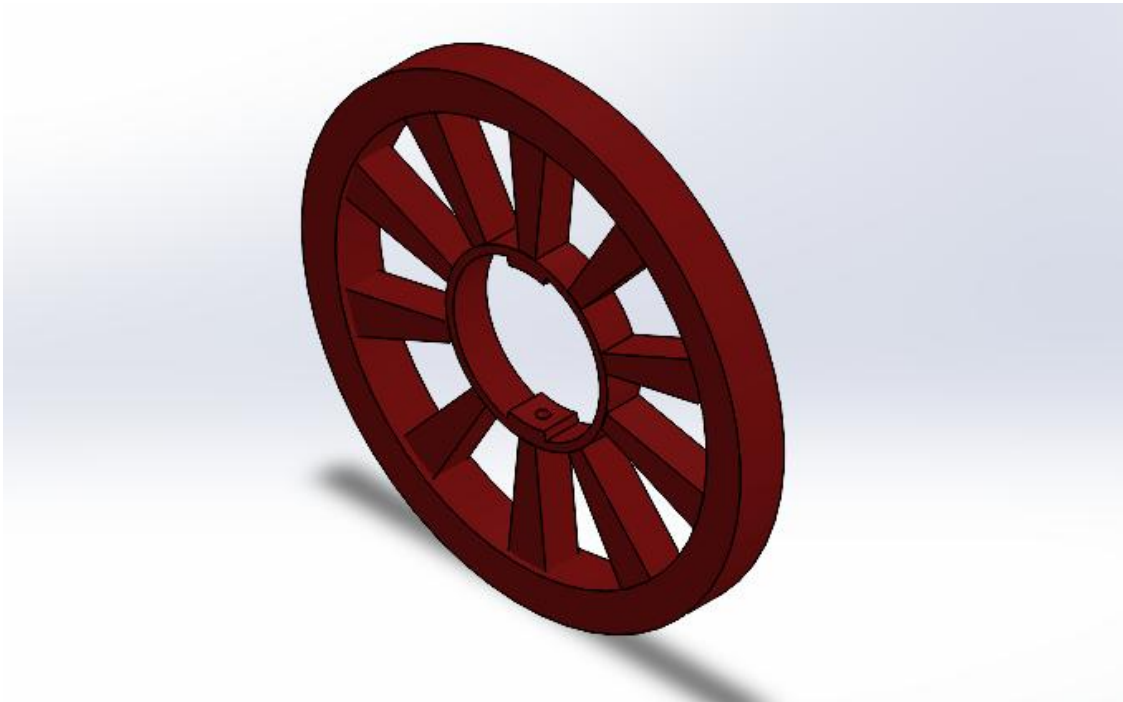
Finalmente, se propone como línea futura de investigación la integración del sistema de centrado con sensores adicionales o mecanismos de ajuste automático, que permitan mejorar el control del posicionamiento del boroscopio y ampliar las aplicaciones del dispositivo en otros procesos de inspección industrial.



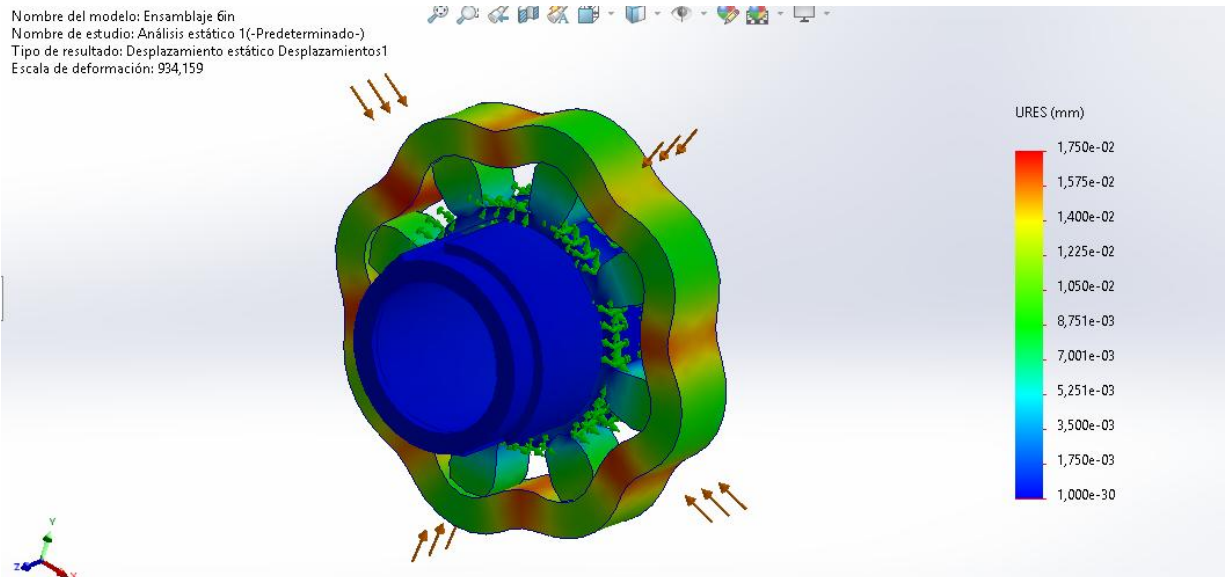
A. Anexo: Anillo flexible de 4"



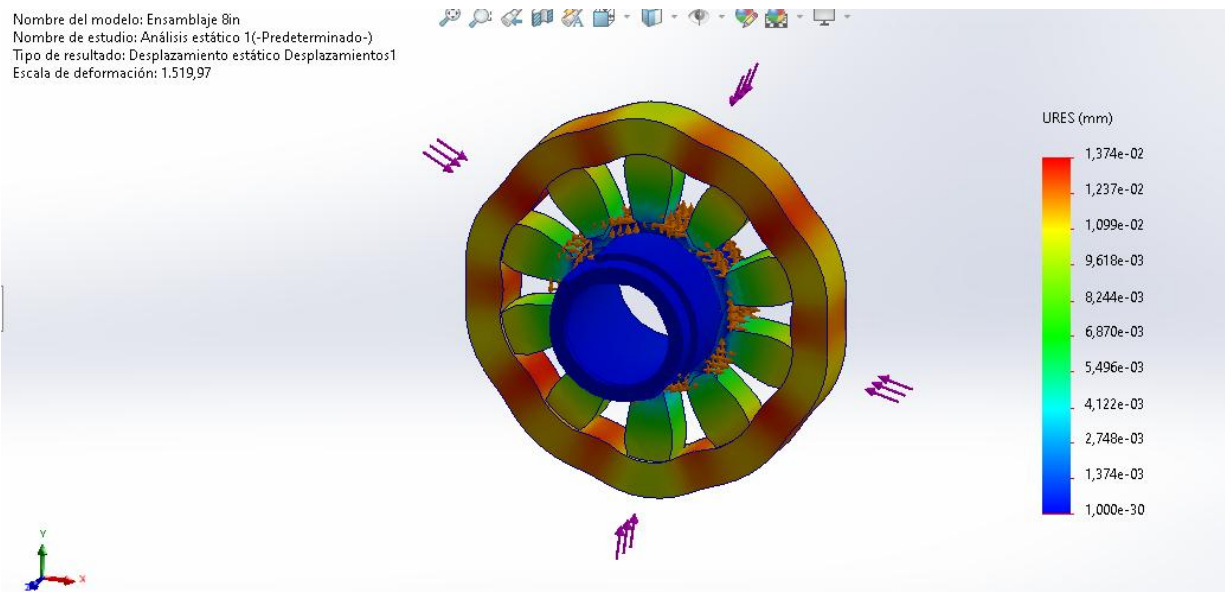
B. Anexo: Anillo flexible de 8"



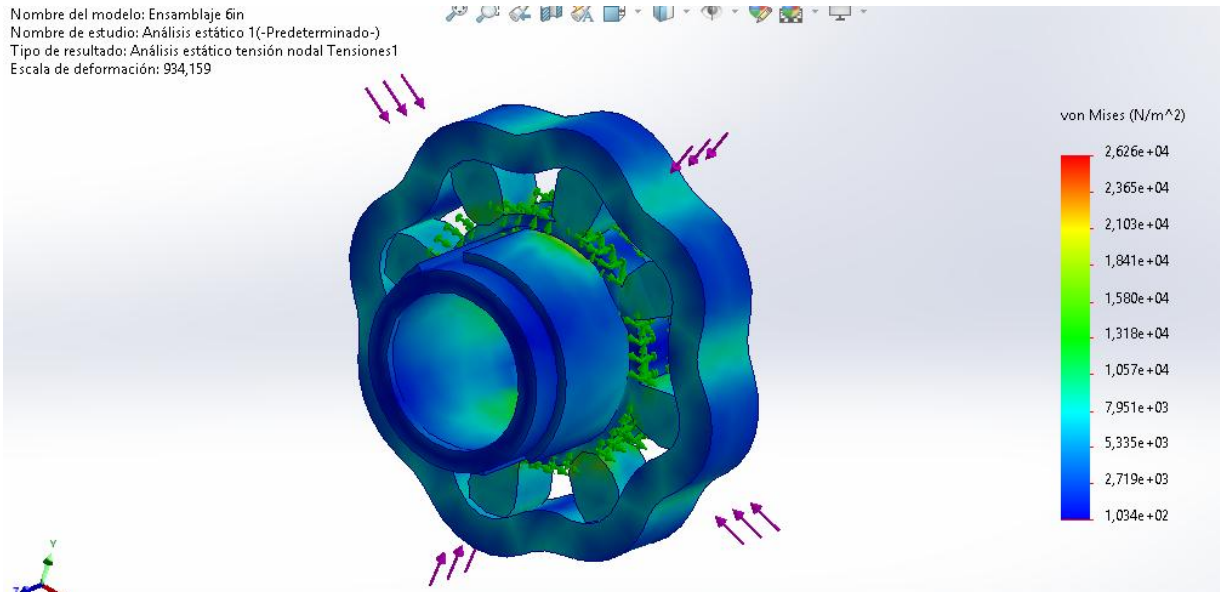
C. Anexo: Análisis estático de carga anillo de 6"



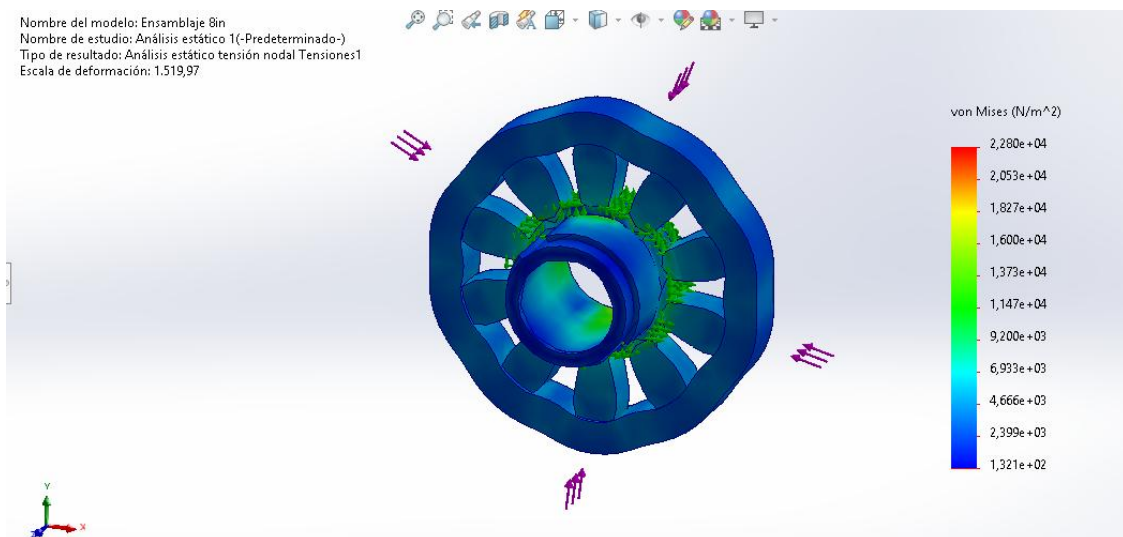
D. Anexo: Análisis estático de carga anillo de 8"



E. Anexo: Análisis estático de tensiones anillo de 6"



F. Anexo: Análisis estático de tensiones anillo de 8"





G. Anexo: Propiedades físicas del ensamble de la base y el anillo de 4"

Propiedades físicas

Ensamblaje 4in

Opciones...

Reemplazar las propiedades de masa... Recalcular

☒ Incluir sólidos/componentes ocultos

☐ Crear operación de centro de masa

☐ Mostrar masa de cordón de soldadura

Informar de valores de coordenadas relativos a: -- predeterminado --

Propiedades de masa de Ensamblaje 4in
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 140.81 gramos

Volumen = 140813.09 milímetros cúbicos

Área de superficie = 53641.19 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)
X = -26.51
Y = 7.58
Z = -5.61

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetro²)
Medido desde el centro de masa.
Ix = (1.00, -0.01, 0.00) Px = 124634.21
Iy = (0.01, 1.00, 0.00) Py = 129301.54
Iz = (0.00, 0.00, 1.00) Pz = 171988.86

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de salida.
Lxx = 124634.47 Lxy = -34.44 Lxz = 5.65
Lyx = -34.44 Lyy = 129301.28 Lyz = -0.79
Lzx = 5.65 Lzy = -0.79 Lzz = 171988.86

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida. (Usando notación tensorial)
Ixx = 137155.81 Ixy = -28312.97 Ixz = 20961.99
Iyx = -28312.97 Iyy = 232678.62 Iyz = -5990.51
Izx = 20961.99 Izy = -5990.51 Izz = 279009.95

Ayuda Imprimir... Copiar al portapapeles



H. Anexo: Propiedades físicas del ensamble de la base y el anillo de 6"

 **Propiedades físicas** — □ ×

Ensamblaje 6in Opciones...

Reemplazar las propiedades de masa... Recalcular

☒ Incluir sólidos/componentes ocultos
☐ Crear operación de centro de masa
☐ Mostrar masa de cordón de soldadura

Informar de valores de coordenadas relativos a: -- predeterminado --

Propiedades de masa de Ensamblaje 6in
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 235.27 gramos
Volumen = 235265.22 milímetros cúbicos
Área de superficie = 74219.14 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)
X = -34.24
Y = -0.32
Z = 4.14

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetro)
Medido desde el centro de masa.
Ix = (0.76, 0.65, 0.00) Px = 381467.50
Iy = (-0.65, 0.76, 0.00) Py = 386125.17
Iz = (0.00, 0.00, 1.00) Pz = 674809.54

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de
Lxx = 383421.24 Lxy = 2298.43 Lxz = 4.95
Lyx = 2298.43 Lyy = 384171.43 Lyz = 3.60
Lzx = 4.95 Lzy = 3.60 Lzz = 674809.54

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida. (Usando notación tensorial)
Ixx = 387475.34 Ixy = 4893.75 Ixz = -33333.31
Iyx = 4893.75 Iyy = 664014.49 Iyz = -310.10
Izx = -33333.31 Izy = -310.10 Izz = 950647.34

Ayuda Imprimir... Copiar al portapapeles



I. Anexo: Propiedades físicas del ensamble de la base y el anillo de 8"

Propiedades físicas

Ensamblaje 8in

Opciones...

Reemplazar las propiedades de masa... Recalcular

☒ Incluir sólidos/componentes ocultos

☐ Crear operación de centro de masa

☐ Mostrar masa de cordón de soldadura

Informar de valores de coordenadas relativos a: -- predeterminado --

Propiedades de masa de Ensamblaje 8in
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 378.50 gramos

Volumen = 378501.29 milímetros cúbicos

Área de superficie = 110718.62 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)
X = -17.09
Y = 6.41
Z = 2.53

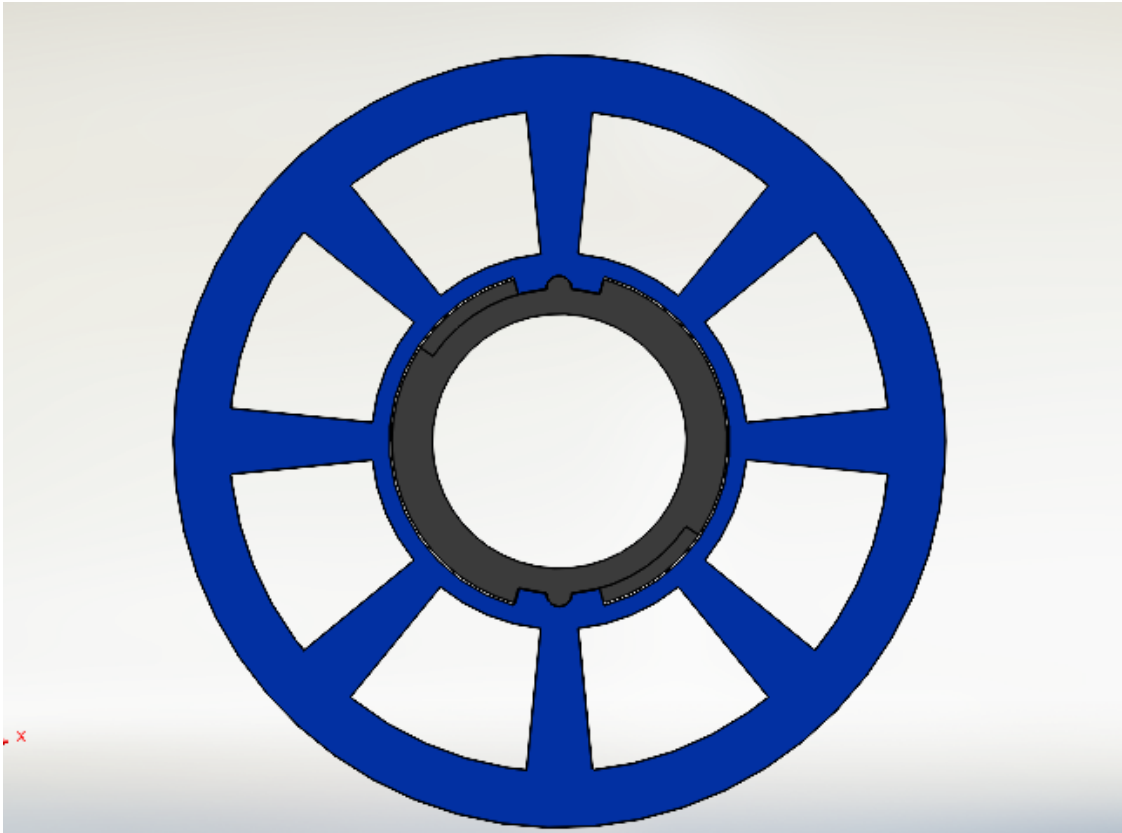
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetro)
Medido desde el centro de masa.
Ix = (0.76, 0.65, 0.00) Px = 1090644.98
Iy = (-0.65, 0.76, 0.00) Py = 1095302.66
Iz = (0.00, 0.00, 1.00) Pz = 2082155.70

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de
Lxx = 1092598.72 Lxy = 2298.43 Lxz = 5.04
Lyx = 2298.43 Lyy = 1093348.92 Lyz = 3.92
Lzx = 5.04 Lzy = 3.92 Lzz = 2082155.70

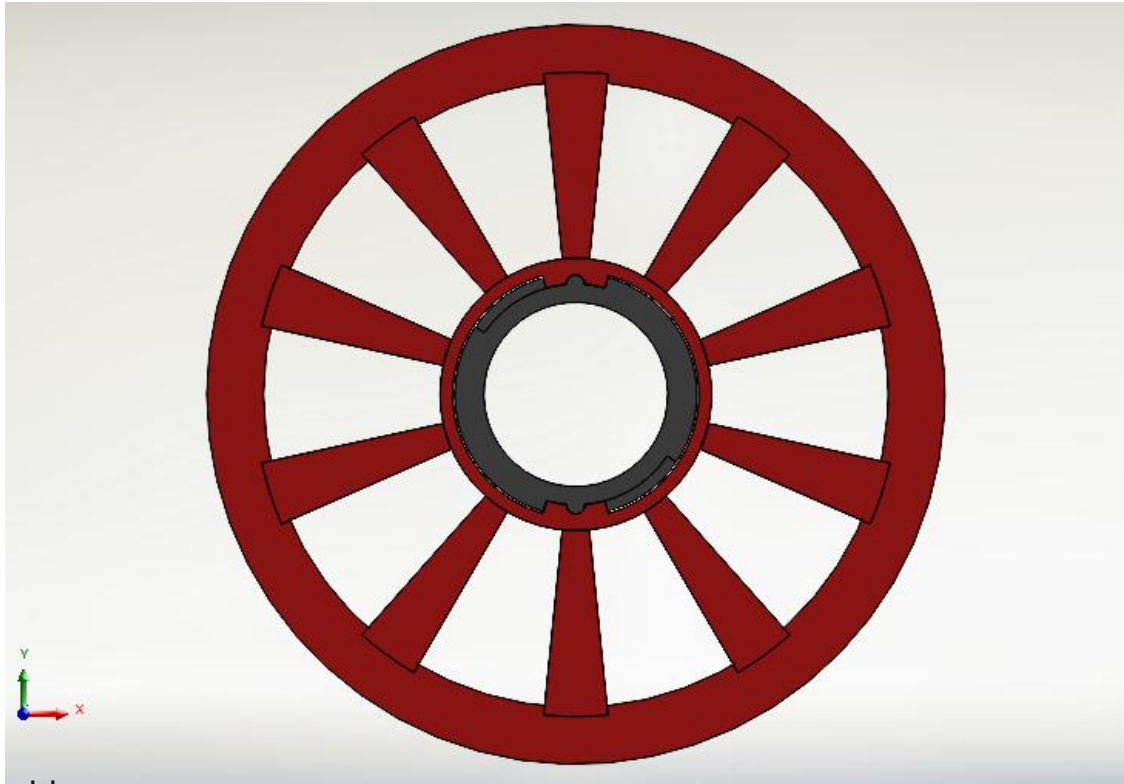
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida. (Usando notación tensorial)
Ixx = 1110567.75 Ixy = -39140.32 Ixz = -16374.54
Iyx = -39140.32 Iyy = 1206270.52 Iyz = 6146.81
Izx = -16374.54 Izy = 6146.81 Izz = 2208190.11

Ayuda Imprimir... Copiar al portapapeles

J. Anexo: Vista de sección del seguro del acople del ensamble de 6"

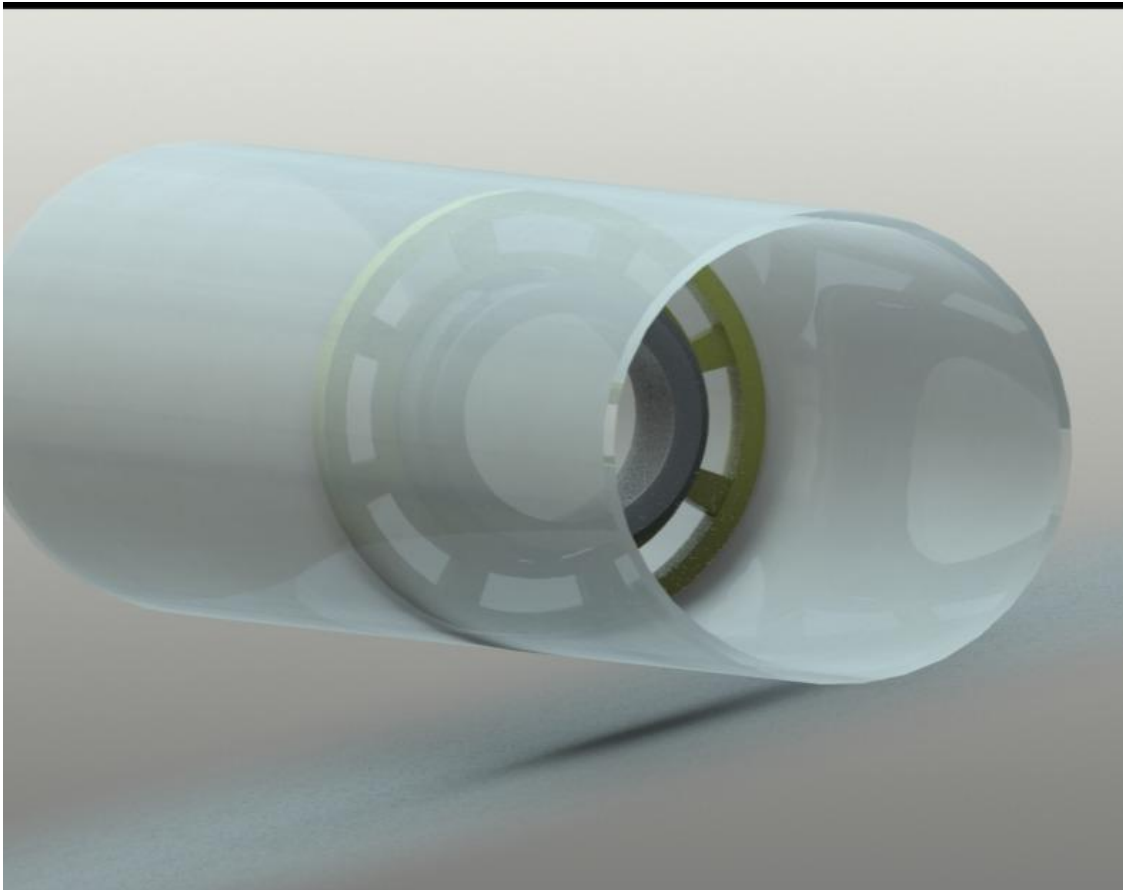


K. Anexo: Vista de sección del seguro del acople del ensamble de 8"

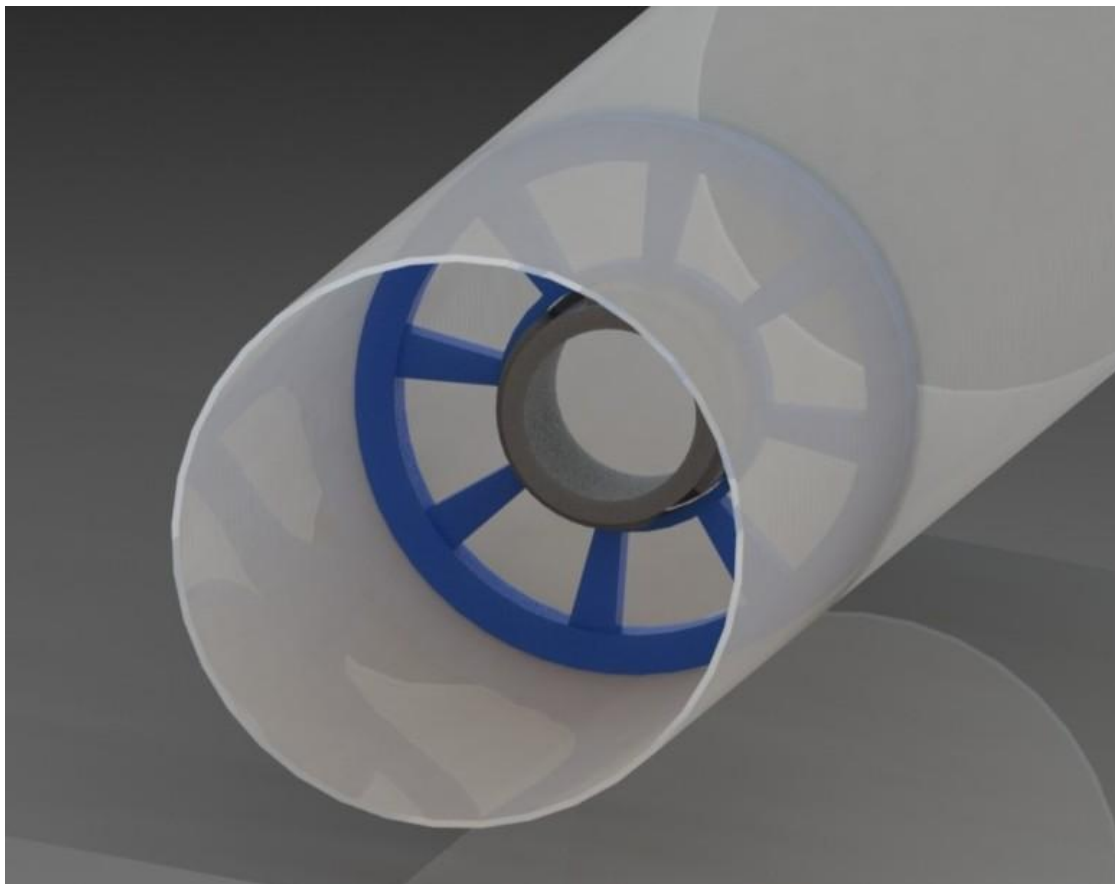




L. Anexo: Renderizado fotorrealista del ensamble de 4"

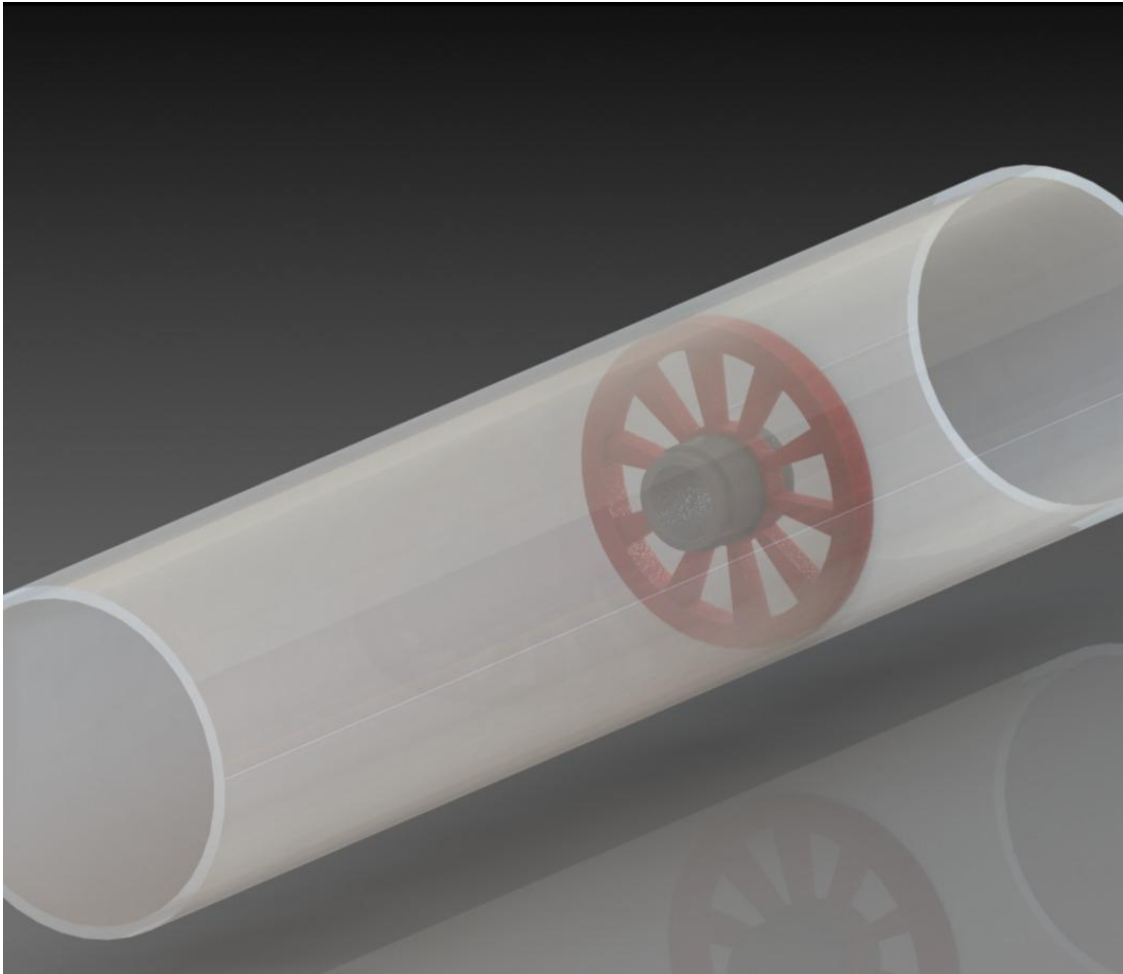


M. Anexo: Renderizado fotorrealista del ensamble de 6"

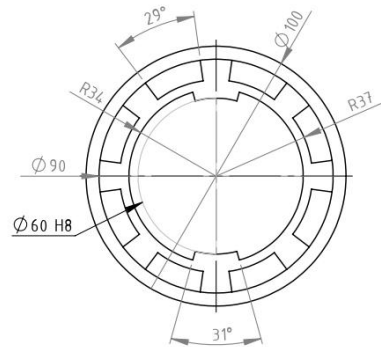




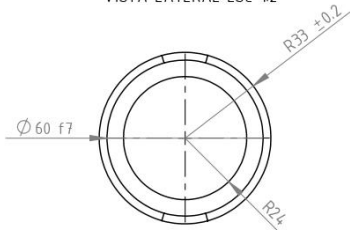
N. Anexo: Renderizado fotorrealista del ensamble de 8"



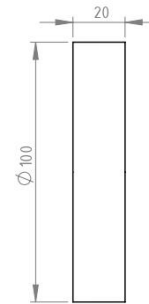
O. Anexo: Plano ensamble anillo 4”



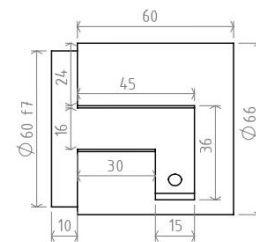
ANILLO 4 in
VISTA LATERAL ESC 1:2



BASE VISTA FRONTAL ESC 1:2

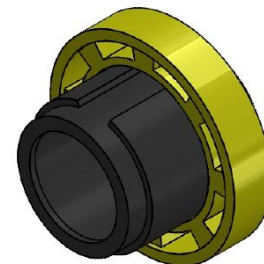


ANILLO 4 in
VISTA LATERAL ESC 1:2



BASE VISTA SUPERIOR ESC 1:2

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	MASA(gr)
1	BASE	PETG	195,86
2	ANILLO 4 in	TPU	140,81



ENSAMBLE ANILLO 4 in
VISTA ISOMETRICA ESC : 1:3

NOTAS

1. Fabricación mediante impresión 3D FDM.
2. Material base: PETG.
3. Material anillo de centrado: TPU.
4. Tolerancias generales ISO 2768-m.
5. Ajuste entre base y anillo: $\varnothing 60 \text{ H8} / \varnothing 60 \text{ f7}$.
6. Todas las dimensiones en milímetros.

DIBUJADO POR

JULIAN CASTAÑEDA

REVISADO POR

ARMANDO ROBLEDO

TITULO DE DIBUJO

ENSAMBLE ANILLO 4 in

NOTAS

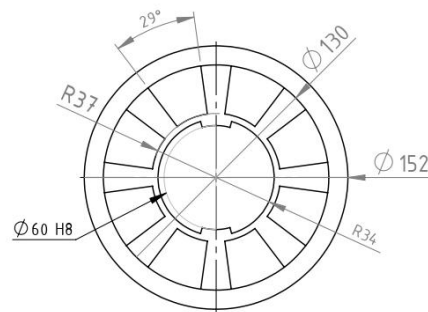
MÉTODO DE FABRICACIÓN: IMPRESIÓN 3D FDM TOLERANCIAS GENERALES:
ISO 2768-m UNIDADES: mm

ESCALA

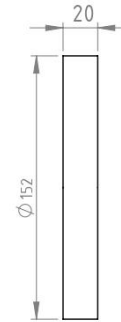
ESC INDICADA



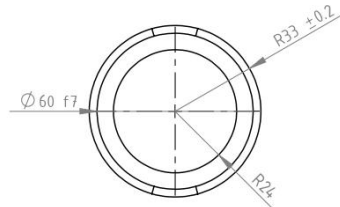
P. Anexo: Plano de ensamble anillo 6"



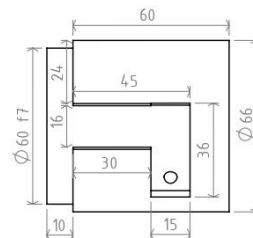
ANILLO 6 in
VISTA FRONTAL ESC 1:3



ANILLO 6 in
VISTA LATERAL ESC 1:3



BASE VISTA FRONTAL ESC 1:2



BASE VISTA SUPERIOR ESC 1:2

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	MASA(gr)
1	BASE	PETG	195.86
2	ANILLO 6in	TPU	235.27

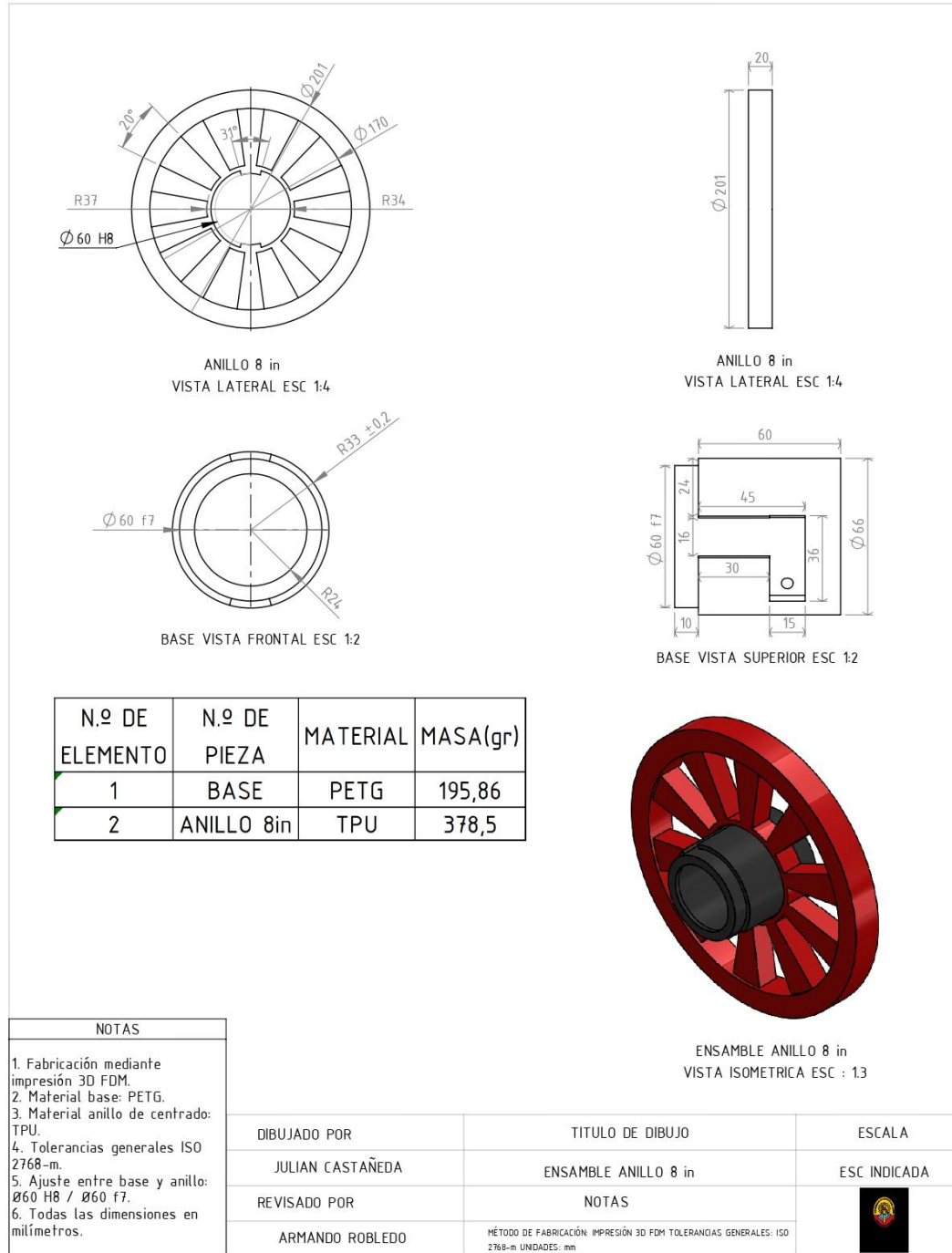


ENSAMBLE ANILLO 6 in
VISTA ISOMETRICA ESC 1:3

NOTAS
1. Fabricación mediante impresión 3D FDM.
2. Material base: PETG.
3. Material anillo de centrado: TPU.
4. Tolerancias generales ISO 2768-m.
5. Ajuste entre base y anillo: Ø60 H8 / Ø60 f7.
6. Todas las dimensiones en milímetros.

DIBUJADO POR	TITULO DE DIBUJO	ESCALA
JULIAN CASTAÑEDA	ENSAMBLE ANILLO 6 in	ESC INDICADA
REVISADO POR	NOTAS	
ARMANDO ROBLEDO	MÉTODO DE FABRICACIÓN IMPRESIÓN 3D FDM TOLERANCIAS GENERALES: ISO 2768-m UNIDADES: mm	

Q. Anexo: Plano de ensamble anillo 8”



Referencias

- [1] V. S. Technologies., «Valence Surface Technologies.,» [En línea]. Available: <https://www.valencesurfacetech.com/services/non-destructive-testing/borescope-inspection/>. [Último acceso: Noviembre 2024].
- [2] Z. Inc., «Zetec Inc.,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.zetec.com/blog/pipeline-weld-inspection-your-complete-guide-to-visual-and-ndt-inspection-methods/>. [Último acceso: Noviembre 2024].
- [3] «Centralizer for internal pipe inspection device». Patente WO 1994/002843 A1, 3 Febrero 1994.
- [4] G. D. Dapra, «Self-centering device for borescopes». Estados Unidos Patente US 5,365,331, 15 Noviembre 1994.
- [5] viZaar industrial imaging AG, 2021. [En línea]. Available: <https://vizaar.de>. [Último acceso: 19 Marzo 2025].
- [6] 3Dnatives, «3Dnatives,» 18 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/el-plastico-petg-en-la-impresion-3d-181220192/>. [Último acceso: 7 Mayo 2025].
- [7] Formlabs, «Formlabs,» Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/flexible-3d-printing-materials-and-processes/>. [Último acceso: 7 Mayo 2025].
- [8] Protolabs, «Protolabs,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/how-to-design-for-nylon-3d-printing/>. [Último acceso: 7 Mayo 2025].
- [9] Y. H. Z. W. a. D. Z. W. Fang, «MDPI – Processes Journal,» 4 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/4/1098>. [Último acceso: 6 2025].

- [10] U.S. Patent Office, «Google Patents,» 20 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://patents.google.com/patent/US20230121496A1/en>. [Último acceso: 6 2025].
- [11] H.-W. P. S.-B. K. a. J.-M. L. K.-W. Jeon, «MDPI – Sensors Journal,» 5 Junio 2024. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3470>. [Último acceso: 6 2025].
- [12] S. P. Timoshenko y J. M. Gere, Theory of Elastic Stability, New York: McGraw-Hill, 1961.
- [13] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf y D. F. Mazurek, Mechanics of Materials, New York: McGraw-Hill, 2015.