

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMAN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE EMBRAGUE BASADO
EN LOS PRINCIPIOS DE LA LEY DE FARADAY –
LENZ PARA APLICACIÓN AUTOMOTRIZ**

TESIS

Presentada por:

Bach. Amadeo Vargas Laura

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO

TACNA – PERÚ

2022


UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMAN

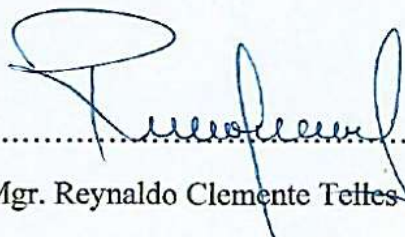
Facultad de Ingeniería


Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

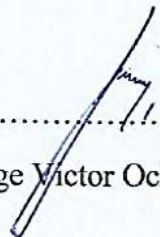
DISEÑO DE UN SISTEMA DE EMBRAGUE BASADO EN LOS PRINCIPIOS DE LA LEY DE FARADAY – LENZ PARA APLICACIÓN AUTOMOTRIZ

Tesis sustentada y aprobada el día 23 de marzo del 2021, estando integrado el jurado calificador por:

PRESIDENTE : 
Dr. Jesus Placido Medina salas.

SECRETARIO : 
Mgr. Reynaldo Clemente Telles Rios.

VOCAL : 
Mgr. Francisco Gamarra Gomez.

ASESOR : 
Ing. Jorge Victor Ochoa Pareja.

DEDICATORIA

Con amor y respeto para:

Mi padre: Armando Vargas M.

Mi madre: Natividad Laura Ch.

Mis hermanos: Lelis, Héctor y Leydi

Y con gratitud:

A todos mis amigos, compañeros y profesores que de una u otra forma intervinieron en la preparación y elaboración de este trabajo.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecer a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de la existencia, ser el cimiento y la fuerza en aquellos momentos de dificultad y de fragilidad.

Gracias a mis padres: Armando y Natividad, por su confianza, sabiduría y valores inculcados.

Agradezco a nuestros catedráticos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por haber compartido su erudición a lo largo del sendero de nuestra formación profesional, de manera especial, al Ing. Jorge Ochoa Pareja, asesores del proyecto de tesis, quien con su paciencia y rectitud han guiado a la culminación de este trabajo.

CONTENIDO

PÁGINA DE JURADO.....	i
DEDICATORIAS	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1.1 Antecedentes del problema	4
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	6
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES	7
1.5 OBJETIVOS:.....	8
1.5.1. Objetivo general:	8
1.5.2. Objetivos específicos:.....	8
1.6 HIPÓTESIS	8
CAPÍTULO II.....	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO:	10
2.2 BASE TEÓRICA:.....	11
2.2.1 Campo magnético.....	11
2.2.2 Fuerza magnética sobre una carga en movimiento.	26
2.2.3 Diseño mecánico.	37
2.2.4 Embrague de transmisión de par-motor en automóviles.	49

2.3	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS:.....	53
CAPÍTULO III		55
MARCO METODOLÓGICO		55
3.1	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.	55
3.2	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.	57
3.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.	57
3.4	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.	57
CAPÍTULO IV		59
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		59
4.1	RESULTADOS:	59
4.1.1	Análisis teórico del origen de fuerzas.	59
4.1.2	Análisis mecánico de la relación entre la fuerza electromagnética y las variables estudiadas.	68
4.1.3	Consideraciones de diseño.	81
4.1.4	Análisis de diseño.....	82
4.1.5	Comparativa de características de diferentes embragues.	86
4.2	DISCUSIÓN	88
CONCLUSIONES.....		91
RECOMENDACIONES		92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		94
ANEXO 1: LÍMITES DURBIN-WATSON		96
ANEXO 2: PLANOS		97
ANEXO 3: ANÁLISIS ESTÁTICO.		117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Electrones libres por unidad de volumen en conductores	34
Tabla 2. Factores de seguridad para materiales dúctiles	40
Tabla 3 Cuadro de posibilidades de un diseño factorial 3K	56
Tabla 4. Operacionalización de variables.....	57
Tabla 5. Datos de trabajo de las variables.	70
Tabla 6 Datos obtenidos de las pruebas experimentales.	71
Tabla 7. Análisis de varianza para Torque	72
Tabla 8. Valor óptimo para el Torque.	74
Tabla 9. Cuadro comparativo de las principales características de embragues bajo condiciones de trabajo en vehículos de transporte urbano.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación vectorial de la interacción entre una carga eléctrica y campo magnético.	12
Figura 2. Distribución del campo magnético de un imán cilíndrico de neodimio.....	14
Figura 3. Parámetros para la determinación de la intensidad del flujo magnético.	15
Figura 4. Densidad de flujo magnético de un imán de neodimio de grado N50 con $D = 30\text{mm}$ y $H = 10\text{mm}$	16
Figura 5. Alineación de los momentos magnéticos dentro de dominios.....	17
Figura 6. Origen de los dipolos magnéticos, a). debido a la rotación del electrón en su propio eje b). debido a la rotación del electrón alrededor del núcleo.	18
Figura 7. Demostración de la ley de Faraday	20
Figura 8. Espira localizada dentro un campo magnético B uniforme variable en el tiempo, el cual aumenta a razón constante dB/dt dando origen a una corriente inducida i	21
Figura 9. Diagrama esquemático del método de prueba de corriente de Foucault sensible a la amplitud. La profundidad de penetración depende de la frecuencia utilizada y la conductividad eléctrica del material base.	23
Figura 10. Susceptibilidad magnética de los materiales	24
Figura 11. Ordenamiento molecular de un material paramagnético a) sin la presencia de un campo magnético. b) en presencia de un campo magnético.	26
Figura 12. Mar de electrones en un enlace metálico (Al).	28
Figura 13. Enlace covalente entre átomos de silicio. a) estructura atómica de silicio b) electrones compartido entre átomos de silicio c) Ángulo en una estructura tetraédrica formado por los enlaces.....	29
Figura 14. Formación de enlace iónico entre el sodio y el cloro	30
Figura 15. Movimiento de electrones de valencia aplicando voltaje.	31
Figura 16. Recorrido de los electrones de valencia a través de a) material con cristales perfectos b) material con incremento de temperatura c) materiales con cristales imperfectos.....	32

Figura 17. Portadores de carga de diferentes materiales a) enlace metálico b) enlace covalente c) enlace iónico	33
Figura 18. Fuerza de Lorenz sobre una carga eléctrica en movimiento dentro de un campo eléctrico y magnético.	35
Figura 19. Orientación vectorial de la fuerza sobre partícula cargada.	36
Figura 20. Representación gráfica del estado de tensiones. Círculo de Mohr.	38
Figura 21. Representación gráfica del estado tensiones bajo cargas biaxiales y triaxiales.	39
Figura 22. Curva esfuerzo-deformación de un material dúctil.....	41
Figura 23. Área segura según Von Mises	42
Figura 24. Área segura según Tresca	44
Figura 25. Lugar geométrico tridimensional de la fluencia según Tresca.	45
Figura 26. Comparación de la teoría de Tresca y la teoría de von Mises.	46
Figura 27. Cáscara modelizada mediante elementos planos.	48
Figura 28. Discretización de elementos.	48
Figura 29. Curva característica de potencia y par-motor en relación con el rpm que desarrolla el motor.....	52
Figura 30. Análisis vectorial de las fuerzas de Lorenz.(vista B-B Figura 32).	60
Figura 31. Campo magnético tridimensional.	61
Figura 32. Círculos de intersección con diferentes planos para analisis de fuerzas	62
Figura 33. Análisis vectorial de las fuerzas de Lorenz en la vista A-A de la Figura 32.	63
Figura 34. Distribución de fuerzas de Lorenz alrededor de las circunferencias de la Figura 32.....	64
Figura 35. Trayectoria del movimiento de los electrones de valencia.	65
Figura 36. Representación del movimiento de los electrones de valencia dentro del aluminio.....	66
Figura 37. Formación de torbellinos de electrones de valencia dentro del material paramagnético (aluminio).	67
Figura 38. Banco de prueba utilizado para determinar el par transmitido en diversas circunstancias.	69
Figura 39. Gráfica de Pareto estandarizado para torque.	75
Figura 40. Gráfica de efectos principales para el torque.....	76

Figura 41. Probabilidad normal de torque.....	77
Figura 42. Curva de torque de motores AUDI para diferentes potencias.	81
Figura 43. Embrague magnético	83
Figura 44. Primera fase: transmisión de torque hasta un 90 %	84
Figura 45. Segunda fase: transmisión de torque del 100%	85
Figura 46. Campos magnéticos ordenados de manera diferente a) campo magnético unidireccional b) campo magnético alternado.....	89

RESUMEN

En el presente trabajo se formula un estudio de las virtudes que presentan las corrientes inducidas en un disco de aluminio usando imanes permanentes como fuentes de campo magnético, con el fin de anular o disminuir la fricción en dispositivos de acople y desacople de ejes en procesos de transmisión de torque de un vehículo liviano. Aplicando los principios de la ley de Faraday-Lenz y Lorentz se analiza el comportamiento de los electrones de valencia del aluminio cuando están en contacto con campos magnéticos variables en el tiempo. La determinación de la dependencia de la fuerza generada se hace aplicando un diseño experimental factorial 3^3 , donde el fenómeno se estudia relacionando y cuantificando las propiedades mecánicas.

Los resultados obtenidos a través de un análisis teórico muestran la formación, y el sentido de giro de los vórtices de electrones formados dentro del disco de aluminio delante y posterior al campo magnéticos del imán cuando se mueven con una velocidad relativa, también se logró demostrar que el sistema planteado de un embrague magnético es técnicamente viable. Finalmente, haciendo uso de los datos obtenidos, y considerando las características necesarias para la transmisión de torque se hace una propuesta de diseño de un embrague magnético.

Palabras clave: Embrague magnético, corrientes de Foucault.

ABSTRACT

In the present work, a study of the virtues presented by the induced currents in an aluminum disc using permanent magnets as magnetic field sources is formulated, in order to annul or reduce friction in shaft coupling and uncoupling devices, in torque transmission processes of a light vehicle. Applying the principles of the Faraday-Lenz and Lorentz laws, the behavior of aluminum valence electrons when they are in contact with time-varying magnetic fields is analyzed. The determination of the dependence of the generated force is done by applying a 3³ factorial experimental design, where the phenomenon is studied by relating and quantifying the mechanical properties.

The results obtained through a theoretical analysis show the formation, and the direction of rotation of the electron vortices formed inside the aluminum disc in front and after the magnetic field of the magnet when they move with a relative speed, it was also possible to demonstrate that the proposed system of a magnetic clutch is technically feasible. Finally, making use of the data obtained, and considering the characteristics necessary for the transmission of torque, a design proposal for a magnetic clutch is made.

Keywords: Magnetic clutch, eddy current

INTRODUCCIÓN

Desde la creación de los motores de combustión interna, nace la necesidad de contar con un dispositivo que permita el acople y desacople de la transmisión de torque para aprovechar mejor la capacidad del motor, lo que llevó a la creación de los diferentes modelos de embrague basados básicamente en un acople a fricción mecánica. Actualmente, la mayoría de los sistemas de acople y desacople de torque son básicamente a fricción mecánica a excepción del convertidor de par que es un sistema hidráulico. A pesar de contar con materiales de alta resistencia para disminuir el desgaste mecánico en los discos de embragues, estos siempre tienen vida útil limitada. En este trabajo, el enfoque es utilizar principios electromagnéticos para la transmisión de torque aprovechando la ventaja de que en procesos electromagnéticos no interviene el contacto físico entre elementos por tanto no existe desgaste mecánico por fricción.

La presente Tesis tiene como objetivo difundir las propiedades mecánicas de procesos de inducción electromagnética y el conjunto de posibilidades sobre su aplicación ingenieril; además, lograr elementos de transmisión sin desgaste mecánico y con una vida útil ilimitada.

De acuerdo a la naturaleza del fenómeno electromagnético estudiado, presentamos un trabajo de tipo investigación experimental donde se aplica un diseño factorial 3K, persiguiendo los siguientes objetivos.

- Indicar la relación de la distancia de separación y la magnitud del torque obtenido mediante el proceso electromagnético.
- Establecer la relación entre la intensidad del campo magnético y la magnitud del torque transmitido.
- Establecer la relación entre la velocidad relativa y la magnitud del torque transmitido.

El desarrollo de este trabajo se divide en cuatro capítulos, en el primer capítulo se especifica el origen, la justificación, la formulación y los objetivos en los que se basa el trabajo de investigación; el segundo abarca la base teórica en el que se fundamenta el presente trabajo; en el tercer capítulo se define la metodología utilizada según los objetivos que se persiguen; en el cuarto capítulo se presenta los hallazgos más relevantes obtenidos en el proceso experimental y las respectivas conclusiones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En vehículos cuya principal función es el transporte de pasajeros en zonas urbanas, cuyo recorrido es a través de una ruta predeterminada, durante el trayecto el vehículo experimenta obstáculos como semáforos, paraderos, curvas y badenes, lo que hace indispensable la variación de velocidad, cambio de marcha o la detención del vehículo. En los mencionados casos, es esencial la utilización del mecanismo de embrague para controlar la velocidad del vehículo de acuerdo a las necesidades requeridas, así de esta manera, entre 8 a 9 horas de trabajo continuo se hace evidente el desgaste mecánico de los componentes encargados del proceso de acople y desacople del par motor, principalmente del disco de embrague, lo que conlleva a disminuir considerablemente su vida útil.

En los últimos años, las mejoras de los sistemas de embrague se han enfocado en incrementar la durabilidad de los materiales directamente involucrados o en la adición de uno o más discos de embrague con la finalidad de reducir el desgaste y amortizar los cambios bruscos en procesos de acople y desacople, mas no en buscar otros métodos alternativos de conseguir la transmisión de torque que permita disminuir o anular la fricción, de esta manera, lograr aumentar la vida útil considerablemente.

Por tanto, el objetivo de este trabajo de investigación es obtener un mecanismo de transmisión de torque, aprovechando las fuerzas que genera la interacción de campos magnéticos, logrando de esta manera la disminución o la anulación de la fricción en procesos de acople y desacople de ejes en movimiento.

1.1.1 Antecedentes del problema

Desde la creación de los motores de combustión interna, nace la necesidad de contar con un dispositivo mecánico que permita aislar y acoplar la transmisión de torque entre el motor y la caja de cambios para lograr una transmisión adecuada. Los primeros dispositivos llamados embragues de correa contaban con una correa de cuero plana para poder acoplar y desacoplar la transmisión de potencia entre el eje motriz y el eje conducido. Actualmente, la mayoría de los automóviles con un sistema de transmisión manual cuentan con un dispositivo llamado embrague de diafragma, que a través de la fricción entre el volante de inercia y el disco de embrague permite transmitir o desacoplar la potencia que suministra el motor hacia la caja de cambios, logrando de esta manera transmitir el par a las ruedas. Las desventajas que presenta el sistema de embrague de diafragma es el inevitable y prematuro desgaste de los componentes debido a que estas transmiten la potencia mediante fricción, además, este problema se hace más frecuente en vehículos que trabajan en ciudades donde la necesidad de interrumpir la transmisión de torque es frecuente, esto hace que disminuya drásticamente la vida útil de los discos de embrague.

El convertidor de par es un dispositivo hidráulico utilizado para transmitir par motor en vehículos con sistema de transmisión automática, este sistema presenta un inconveniente que es la pérdida de energía cinética debido a la turbulencia del fluido, esta pérdida se manifiesta con un incremento de temperatura, lo que conlleva a la necesidad de implementar un sistema de enfriamiento. Gracias a estos inconvenientes este sistema presenta un incremento en el consumo de combustible en comparación con los sistemas de transmisión manual. Además, la manufactura, el mantenimiento y las reparaciones son más costosas.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Pregunta general

¿Es posible lograr un diseño funcional de un embrague aplicando los principios de la ley de Faraday – Lenz?

Preguntas específicas

¿Qué tan importante es la distancia de separación en la determinación de la magnitud del torque transmitido?

¿La intensidad del campo magnético es fundamental en la determinación del torque transmitido?

¿Es significativa la velocidad relativa entre dos ejes en el proceso de transmisión para determinar la magnitud del torque transmitido?

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

En el presente trabajo de investigación, se estudia las fuerzas que se generan al interaccionar campos magnéticos y material paramagnético y el posterior diseño aplicado de un mecanismo de embrague magnético con la finalidad de sustituir las desventajas que presentan los mecanismos de embrague convencionalmente usados, ya sea en transmisiones manuales o automáticas, ambos con el mismo propósito.

1.3.1. Desde el punto de vista ambiental: A través del estudio, se pretende disminuir la emisión de los residuos que se produce al hacer cambios o mantenimientos a un sistema de embrague a fricción tales como: discos de embrague desgastados, grasa utilizada y el cambio del líquido hidráulico en convertidor de par por cada 15 000 km recorridos.

1.3.2. Desde el punto de vista económico: Según propietarios de vehículos de servicio de transporte público, el mantenimiento de embragues en los vehículos con sistemas de transmisión manual es de aproximadamente cada 4 meses, en cambio en vehículos con sistemas de transmisión automáticas es necesario el cambio de líquidos hidráulicos del convertidor de par cada 15 000 km. Lo que conlleva a gastos adicionales para propietarios. Teniendo en consideración estos puntos en el presente trabajo de investigación, el objetivo es disminuir considerablemente dichos gastos.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

- En el estudio experimental se analizó las principales variables que intervienen al utilizar la fuerza magnética como principal fuente de transmisión de torque, para lograr un diseño de un mecanismo que cumpla con el mismo propósito que un sistema de embrague convencionalmente utilizada.
- Los recursos limitados para el estudio experimental del presente trabajo de investigación nos limitan a utilizar el aluminio como único material paramagnético.
- Nos limitamos a hacer el estudio experimental y los cálculos pertinentes del fenómeno físico desde el punto de vista mecánico midiendo cuantitativamente el par transmitido en el proceso.
- En el presente trabajo, debido a la complejidad del fenómeno estudiado limita a formular una explicación conceptual del fenómeno.
- El diseño propuesto en este trabajo está dirigido únicamente a la aplicación en vehículos livianos como autos, combis y microbuses.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general:

Diseñar un sistema de transmisión de torque basados en los principios de la ley de Faraday - Lenz para aplicación automotriz.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Indicar la relación de la distancia de separación y la magnitud del torque obtenido mediante el proceso electromagnético.
- Establecer la relación entre la intensidad del campo magnético y la magnitud del torque transmitido.
- Establecer la relación entre la velocidad relativa y la magnitud del torque transmitido.

1.6 HIPÓTESIS

Hipótesis general

Es posible lograr el diseño de un sistema de embrague basado en los principios de la ley de Faraday-Lenz para la transmisión de torque en vehículos.

Hipótesis específicas

Es realizable determinar la relación entre la distancia de separación y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

Es probable determinar la relación entre la intensidad del campo magnético y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

Es factible determinar la relación entre la velocidad de transmisión y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Gallo (2013) en su artículo de investigación titulado: “Acoplamiento de alto deslizamiento con imanes anulares para prueba de motores eléctricos”, llegó a las siguientes conclusiones:

- Utilizó un sensor de efecto Hall para cuantificar la densidad de flujo magnético en el entrehierro.
- Según la experiencia de Gallo, supone que la densidad del flujo magnético se incrementaría sustituyendo los imanes utilizados con imanes de neodimio.
- La velocidad relativa entre ejes es un factor importante debido a que las corrientes y voltajes inducidos son proporcionales a la velocidad.
- Debido a las corrientes inducidas en el disco de cobre existe un importante incremento de la temperatura provocando pérdidas de energía.
- Omar Gallo obtuvo un rendimiento del sistema de un 11,8 % por lo que sugiere un redimensionamiento del sistema para obtener un rendimiento mínimo de 70 %.

- El autor presume que el control de la magnitud de la potencia transmitida se lograría con un incremento o disminución de la distancia entre el disco de cobre y los imanes.

2.2 BASE TEÓRICA

2.2.1 Campo magnético

2.2.1.1 Definición conceptual

Se define como campo magnético a una zona del espacio en la que, si se desplaza una carga positiva o negativa, este sufre efectos de una fuerza que es perpendicular al plano que forman los vectores velocidad y el vector del campo magnético como se muestra en la fFigura 1. El campo magnético en un punto se representa por un vector \vec{B} llamado Inducción magnética o densidad de flujo magnético y se puede visualizar por medio de líneas de inducción (Barco Ríos, Rojas Calderón, & Restrepo Parra, 2012, pág. 217).

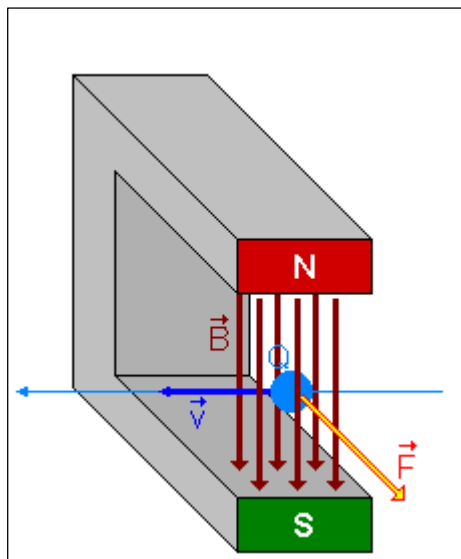


Figura 1. Representación vectorial de la interacción entre una carga eléctrica y campo magnético
Fuente: García y Guevara (2014)

La representación matemática del campo magnético describe la manera en que se distribuyen las fuerzas alrededor de la fuente magnética, dentro de este espacio existe una interacción entre el campo magnético y los elementos sensibles al magnetismo, como son los materiales ferromagnéticos. “Los campos magnéticos son dipolos que poseen polarización norte y sur o también conocido como polos positivo y negativo, estos campos se representan como un conjunto de fuerzas vectoriales que tienen magnitud y dirección” (Estela Raffino, 2019, pág. 79).

2.2.1.2 Imán permanente

Un imán permanente es un sólido con la capacidad de atraer ciertos materiales ferromagnéticos, gracias al campo magnético que se genera debido a la particular orientación de los electrones, estos están compuestos por diferentes materiales, en

la naturaleza se le pueden encontrar como magnetita (Fe_3O_4), actualmente se fabrican de diferentes materiales como NdFeB, NIB, Neo, ferrita, entre otros.

Dependiendo del tiempo de duración de la magnetización en estos materiales luego de ser expuestos a campos magnéticos se pueden clasificar como:

- **Materiales magnéticamente duros:** Estos materiales tienen la característica de magnetizarse y desmagnetizarse con gran facilidad, y su principal aplicación es como núcleo ferromagnético en transformadores.
- **Materiales magnéticamente blandos:** Son materiales en las que después de magnetizarlos, estos conservan su campo magnético por un largo periodo de tiempo. A estos materiales se le conocen como imanes permanentes.

La magnetización de los imanes permanentes puede disminuir debido a diversos factores como, variación de la temperatura, interacción con otros campos magnéticos, caída desde cierta altura. En cambio, si se exponen a temperaturas superiores que la temperatura de Curie del imán, este pierde su magnetización inmediatamente.

El campo magnético de los imanes es una magnitud vectorial que se representa con flechas curvas tal como se puede apreciar en la fFigura 2, la forma, dirección de las líneas del campo dependerá de la geometría de los imanes, además, es mayor la intensidad del campo magnético sobre su eje axial.

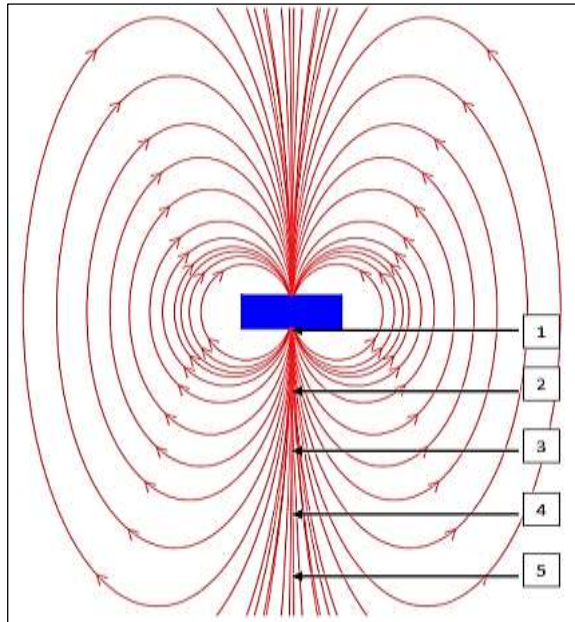


Figura 2. Distribución del campo magnético de un imán cilíndrico de neodimio
Fuente: Elaboración propia

Camacho y Sosa (2013) sostienen que la variación de la intensidad de flujo magnético a través de su eje axial (z) Figura 3. para un imán con geometría cilíndrica se puede determinar mediante la ecuación (1) (p.11).

$$B(z) = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} - \frac{z - L}{\sqrt{(z - L)^2 + R^2}} \right) \quad (1)$$

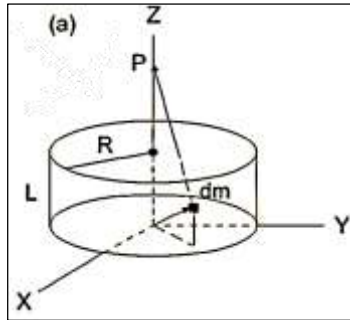


Figura 3. Parámetros para la determinación de la intensidad del flujo magnético.
Fuente: Camacho y Sosa (2013)

Haciendo uso de la ecuación 1 se puede obtener los valores de la intensidad de campo magnético sobre su eje axial de un imán de neodimio de grado de magnetización N50 de geometría cilíndrica con un radio de 15 mm y un espesor de 10 mm, tal como se aprecia en la Figura 4.

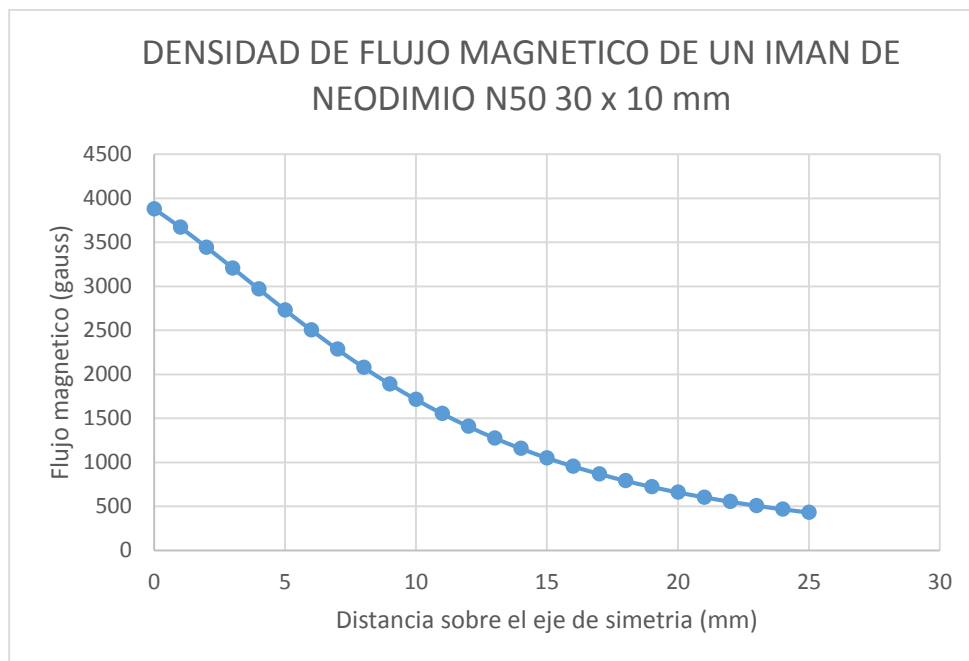


Figura 4. Densidad de flujo magnético de un imán de neodimio de grado N50 con D = 30mm y H = 10mm
Fuente: Camacho y Sosa (2013)

2.2.1.3 Temperatura de Curie

El incremento de la temperatura en un material hace que los átomos se exciten alterando algunas propiedades físicas como la capacidad del conservar la magnetización. Por lo tanto, cada material ferromagnético experimenta este fenómeno a una temperatura determinada. Según Marie y Pierre Curie en su investigación sobre los imanes, esta excitación de átomos impide que los dominios magnéticos conserven la alineación que obtuvieron al aplicar un campo magnético, perdiendo su magnetización inmediatamente retirada la fuente del campo magnético.

2.2.1.4 Dominios magnéticos

Se denomina dominios a regiones de un material donde los momentos magnéticos individuales de cada átomo que conforma el dominio están alineados paralelamente entre sí. La Figura 5 muestra la orientación de los momentos magnéticos dentro de los dominios de un material antes de ser expuesto a un campo magnético (Askeland , Fulay, & Wright, 2011).

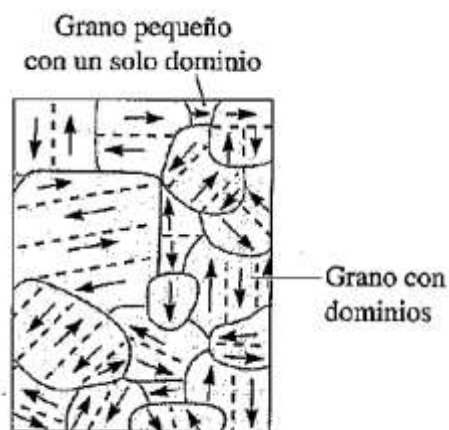


Figura 5. Alineación de los momentos magnéticos dentro de dominios
Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

El proceso de magnetización de un material se puede obtener de dos maneras, mediante el crecimiento de los dominios o el cambio de dirección de los dipolos magnéticos (Figura 6) para obtener una alineación paralela con el campo aplicado, debido a que se requiere menos energía para aumentar de tamaño a los dominios que los momentos giren para alinearse con el campo magnético, el proceso de magnetización de un material ferromagnético es el resultado del crecimiento de los

dominios convenientemente orientados o paralelos al campo aplicado a costa de los dominios que no son paralelos.

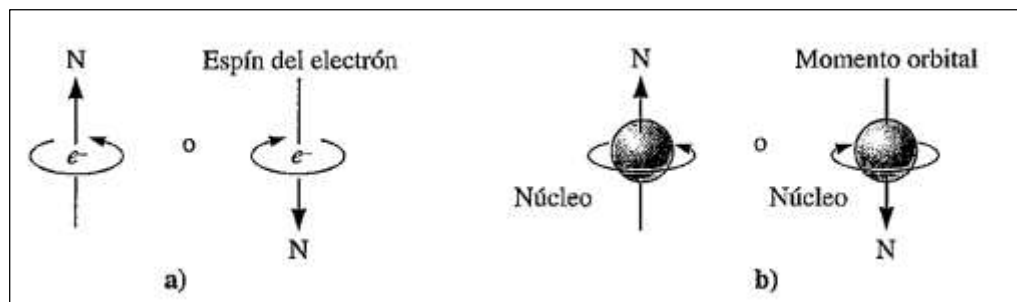


Figura 6. Origen de los dipolos magnéticos, a). debido a la rotación del electrón en su propio eje b). debido a la rotación del electrón alrededor del núcleo
 Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

2.2.1.5 Inducción electromagnética

Es el estudio del fenómeno mediante la cual se origina una fuerza electromotriz (f.e.m.) dentro de un material conductor expuesto a “un campo magnético variable o un medio móvil expuesto a un campo magnético estático” (H. Hayt & A. Buck, 2007, pág. 472). Según (Wangsness, 2001) “La fuerza electromotriz inducida puede calcularse como el trabajo por unidad de carga que la fuerza magnética necesita para mover una carga a lo largo de una espira” (pág. 326). Mediante este fenómeno es posible convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Este fenómeno fue descubierto por Michael Faraday.

a. Ley de Faraday

Luego que, en 1820 Oersted demostrara que un circuito eléctrico afectaba a la aguja de una brújula, Michael Faraday se planteó que, “si una corriente eléctrica

podía producir un campo magnético, entonces un campo magnético debería ser capaz de producir una corriente eléctrica” (Wangsness, 2001, pág. 291). En lo que Faraday manifiesta que en una espira cerrada se puede inducir una corriente cuando por ella atraviesa un campo magnético variable en el tiempo. “Mientras sea mayor la rapidez de variación, mayor será la corriente inducida” (K. Cheng, 1998, pág. 327).

Supongamos un experimento tal como se representa en la Figura 7, donde ubicamos una espira L_0 , estática con respecto a al sistema de referencia S , exponemos la espira en un campo magnético que varía en el tiempo. Según Faraday, en la espira L_0 tendríamos la circulación de una corriente, sin embargo, si en la espira ubicamos una resistencia con un valor suficientemente alto obtendríamos una fuerza electromotriz (fem) proporcional a la variación del campo magnético. (Bernardo García , 2006) afirma que “sobre cualquier camino L_0 se mide una fuerza electromotriz proporcional y de signo contrario a la razón temporal de cambio del flujo magnético cortado por la misma” (p.104).

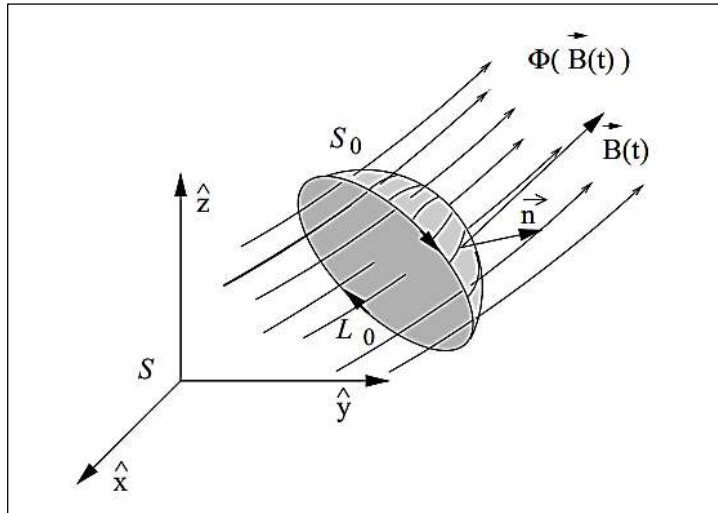


Figura 7. Demostración de la ley de Faraday
Fuente: García (2006)

De esta manera podemos definir la ley de inducción de Faraday para circuitos cerrados L_0 .

$$\oint_{L_0} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_{S_0} \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 = - \frac{d}{dt} \Phi_0(\vec{B}) \quad (3)$$

Donde $\varepsilon_0 = \oint_{L_0} \vec{E} \cdot d\vec{l}$ = fuerza electromotriz (fem) de la espira L_0 y $\Phi_0(\vec{B}) = \int_{S_0} \vec{B} \cdot d\vec{s}$ es el flujo del campo magnético a través de una superficie arbitraria que se apoya sobre L_0 . La unidad de la fuerza electromotriz es el voltio y el flujo en webers (Wangsness, 2001, pág. 145).

b. Ley de Lenz

Según Lenz el movimiento de las tensiones y corrientes inducidas serán en tal sentido que se opondrán a la fuente de flujo magnético que la produjo. Según la Figura 8 se sabe que la ley de Lenz obedece el principio de conservación de la energía, debido a que la corriente inducida produce un campo magnético cuya polaridad es opuesta al campo que la originó.

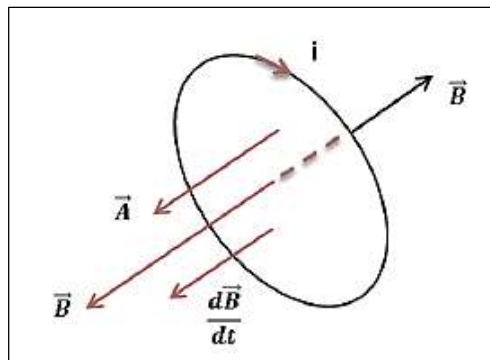


Figura 8. Espira localizada dentro un campo magnético \vec{B} uniforme variable en el tiempo, el cual aumenta a razón constante $\frac{d\vec{B}}{dt}$ dando origen a una corriente inducida i

Fuente: **Falta**

Se considera a la ley de Lenz como una ley complementaria a la ley de Faraday, porque se puede utilizar el mismo sistema de coordenadas con la diferencia de que la ley de Lenz tiene un signo negativo, por esta razón se considera la ley de Faraday-Lenz.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Normalmente el fenómeno de inducción electromagnética se encuentra en solenoides con espiras hechas de alambre conductores, donde cada espira contribuye para formar una sola fuerza electromotriz. Por lo tanto, a la cantidad de espiras o al número de vueltas que forman un solenoide se denomina N.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

c. Corrientes de Foucault

Las corrientes de Foucault nacen cuando un conductor atraviesa un campo magnético estático o cuando por el conductor atraviesa un campo magnético variable en el tiempo, esta interacción hace que los electrones dentro del conductor se muevan, Figura 9. El movimiento de los electrones tiene una trayectoria circular, esta particular manera de moverse permite la creación de electroimanes dentro del conductor cuyo campo magnético es opuesto al campo magnético que los produjo (Wangsness, 2001, pág. 98).

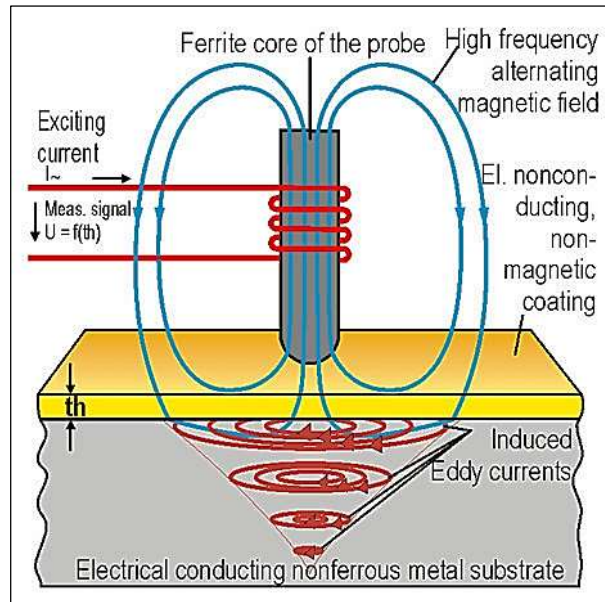


Figura 9. Diagrama esquemático del método de prueba de corriente de Foucault sensible a la amplitud. La profundidad de penetración depende de la frecuencia utilizada y la conductividad eléctrica del material base.
Fuente: Helmut Fischer

Una de las aplicaciones mecánicas de este fenómeno es el uso como freno en parques de diversiones donde en las montañas rusas es indispensable el frenado preciso. La manera en que estos trabajan es mediante dos elementos básicos, el primero es una placa de cobre montados apropiadamente y el segundo son los potentes imanes permanentes que permiten un frenado por inducción sin fricción.

2.2.1.6 Materiales magnéticos

Todos los materiales que existe responden a campos magnéticos debido a que todos están formados por átomos y electrones, “estos materiales se pueden clasificar dependiendo de la manera en que responden en presencia de campos magnéticos”

(Askeland , Fulay, & Wright, 2011). En la Figura 10 podemos apreciar los tipos de materiales con susceptibilidades magnéticas deferentes.

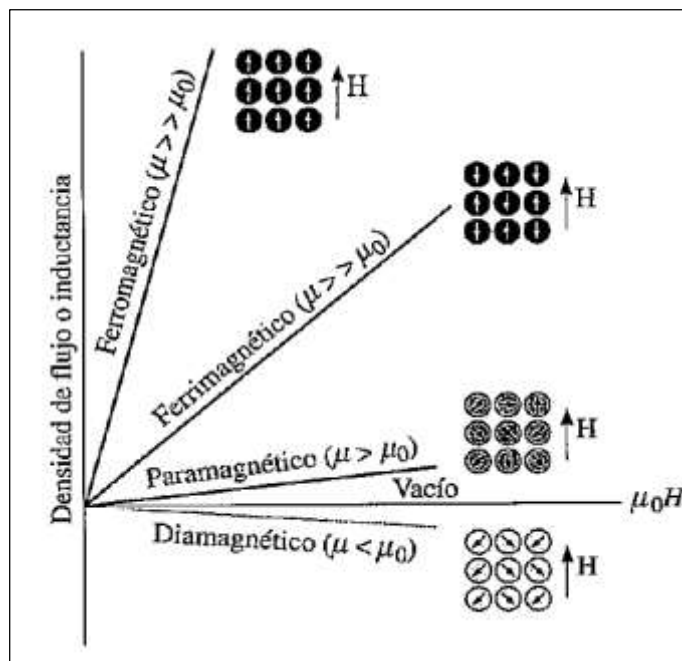


Figura 10. Susceptibilidad magnética de los materiales
Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

a) Materiales ferromagnéticos:

El comportamiento ferromagnético ocurre cuando el nivel 3d de los materiales como hierro, cobalto y níquel no están apareados completamente, cuando a estos materiales se le somete a un campo magnético, los dipolos magnéticos de estos se alinean con facilidad con el campo magnético aplicado debido al refuerzo mutuo entre dipolos. La susceptibilidad magnética de estos materiales

varía dependiendo de la intensidad del campo magnético aplicado (Smith, 2006, pág. 256).

b) Materiales paramagnéticos:

Cuando el número atómico de un material es impar cada átomo tiene un momento magnético neto gracias al movimiento rotacional de los electrones. Al someterlo a un campo magnético externo variable, los dipolos quedan ordenados temporalmente con el campo magnético aplicado. Ocasionando una magnetización positiva, sin embargo, “este efecto desaparece inmediatamente retirado el campo magnético externo, este efecto lo experimentan materiales como el cobre, aluminio, titanio y todas las aleaciones de cobre” (Ashby & Jones, 2015, pág. 107).

c) Materiales diamagnéticos:

Al exponer un átomo a un campo magnético, en esta se induce un dipolo magnético que afecta a todo el átomo, además estos dipolos presentan polaridad diferente al campo magnético aplicado; por tanto, se oponen a estos haciendo que tengan una permeabilidad magnética negativa de unos 0,9995 o una susceptibilidad magnética de ($X_m = -10^6$). Se sabe que la plata, el oro, silicio y alúmina a temperatura ambiente presentan diamagnetismo, en cambio los superconductores son diamagnéticos perfecto con una susceptibilidad magnética de ($X_m = -1$) (Smith, 2006, pág. 279).

2.2.1.7 Efecto del campo magnético sobre un material paramagnético

En un material paramagnético, sin la presencia de una fuente de flujo magnético, los momentos dipolares magnéticos están normalmente orientados en todas direcciones. Sin embargo, cuando están sometidos a un campo magnético variable, estas se alinean paralelamente al campo magnético para formar un momento dipolar único, a diferencia de los materiales ferromagnético estas no conservan un ordenamiento magnético después de haber interactuado con un campo magnético.

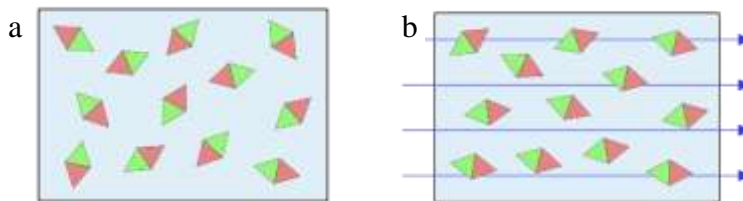


Figura 11. Ordenamiento molecular de un material paramagnético a) sin la presencia de un campo magnético. b) en presencia de un campo magnético. Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

Según (Cordero S., 2017) “a niveles atómicos estos materiales presentan momentos dipolares magnéticos, estos dipolos magnéticos tienen la capacidad de alinearse paralelamente con el campo magnético aplicado, como resultado se tiene un campo magnético mayor en el interior de estos materiales” (p. 136). Los materiales como el manganeso, oxígeno, platino, titanio son un buen ejemplo.

2.2.2 Fuerza magnética sobre una carga en movimiento

Cuando una partícula está en reposo dentro de un campo magnético esta no experimenta ningún cambio, sin embargo, “si la partícula empieza a moverse a

cierta velocidad a través del campo magnético esta experimenta una fuerza que hace que cambie la trayectoria de la partícula, esta fuerza se denomina fuerzas de Lorenz” (H. Hayt & A. Buck, 2007, pág. 92).

2.2.2.1 Estructura atómica

Se denomina estructura atómica a la forma en que los átomos de un material se ordenan entre sí, un átomo está constituido básicamente de tres partículas subatómica los protones, neutrones y electrones.

- a. **Protones:** son partículas subatómicas cargadas positivamente ($1,6 \times 10^{-19}$ C) igual en valor absoluto que la carga del electrón, y tiene una masa de aproximadamente 1 836 veces la masa de un electrón.
- b. **Neutrones:** los neutrones son partículas subatómicas sin carga eléctrica y con una masa equivalente a la masa de los protones.
- c. **Electrones:** son partículas subatómicas cargadas negativamente ($-1,6 \times 10^{-19}$ C) y con una masa muy pequeña en comparación con los protones o neutrones. Estas partículas forman una nube electrónica alrededor del núcleo que básicamente está formado por protones y neutrones.

De acuerdo a la forma en que estos átomos se enlazan entre si nos permiten clasificar estos materiales como metales, polímeros, cerámicos y semiconductores.

2.2.2.2 Enlaces atómicos

Es la manera en que los átomos se unen para formar sólidos, existen cuatro mecanismos principales en tres de ellos el enlace se consigue llenando sus niveles externos de energía SP. Estos enlaces se pueden clasificar como:

- a. **El enlace metálico:** Los materiales con este tipo de enlace tienen una baja electronegatividad que les permite ceder sus electrones de valencia, para formar lo que se denomina mar de electrones que rodean a los átomos lo que permite que los electrones interactúen con varios centros atómicos Figura 12, este tipo de enlace es característico en los metales. “Debido a que los electrones de valencia interactúan con diferentes átomos, los metales son buenos conductores eléctricos y térmicos” (Askeland , Fulay, & Wright, 2011, pág. 275).

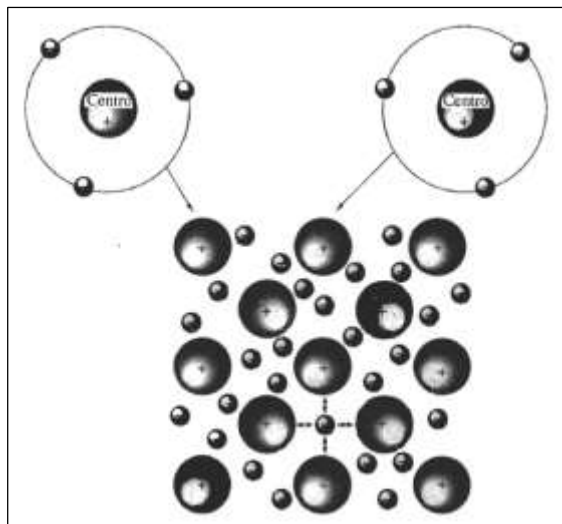


Figura 12. Mar de electrones en un enlace metálico (Al)
Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

- b. **Enlace covalente:** para formar un enlace tipo covalente es necesario átomos con poca diferencia de electronegatividad, además este enlace se obtiene con átomos cercanos entre sí en la tabla periódica, el enlace ocurre al compartir los electrones de valencia de los niveles de energía SP para alcanzar una configuración electrónica de un gas noble tal como se ilustra en la Figura 13. “Los materiales con este tipo de enlace tienen alta resistencia y dureza un ejemplo de esto es el diamante” (Smith, 2006, pág. 235).

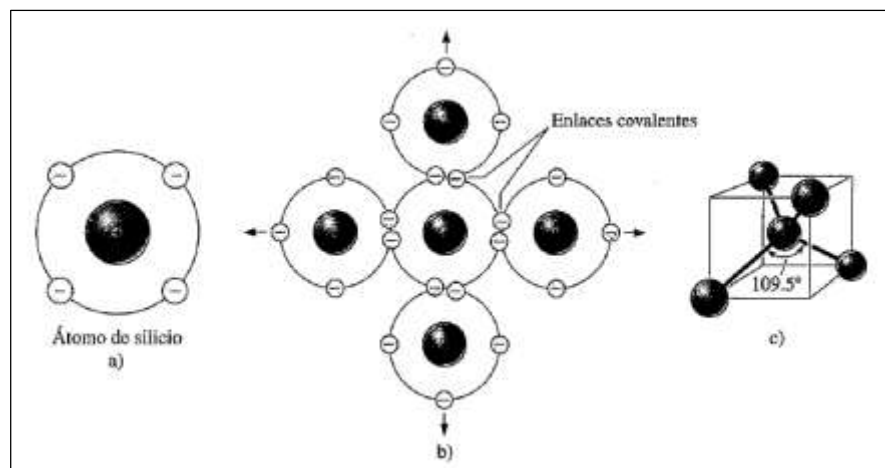


Figura 13. Enlace covalente entre átomos de silicio. a) estructura atómica de silicio b) electrones compartido entre átomos de silicio c) Angulo en una estructura tetraédrica formado por los enlaces.

Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

- c. **Enlace iónico:** este tipo de enlace se forma con átomos de diferentes materiales y diferente electronegatividad, el átomo con menor cantidad de electrones de valencia puede donar sus electrones para completar el orbital del otro átomo, de esta manera se “forman iones cargados positivamente o cationes (átomos que

dona sus electrones) y iones cargados negativamente o aniones (átomos que reciben electrones)” (Smith, 2006, pág. 197).

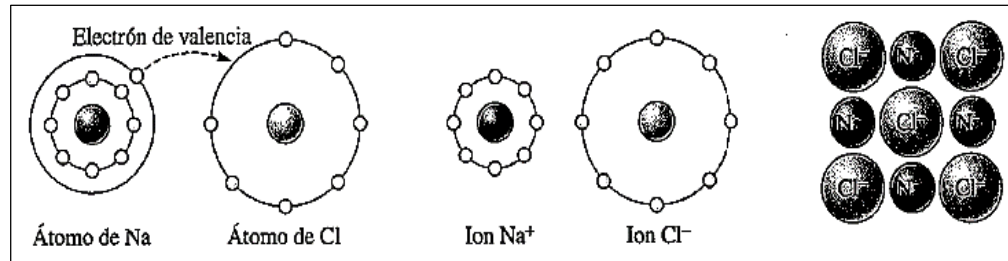


Figura 14. Formación de enlace iónico entre el sodio y el cloro
Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

En un enlace iónico la unión de los átomos es a través de procesos electrostáticos, en la Figura 14 se observa que el sodio tiene una carga positiva debido a que perdió un electrón y el cloro tiene una carga negativa debido a que ganó un electrón, esto hace que los átomos con cargas opuestas se atraen.

- d. **Enlace de van der Waals:** “Es un tipo de enlace químico no covalente en donde la fuerza de atracción entre átomos ocurre cuando dos cargas con cargas positiva y negativa interactúan a través de sus momentos dipolares” (Askeland , Fulay, & Wright, 2011, pág. 354)

2.2.2.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de un material es la capacidad que tiene el material para conducir energía eléctrica, este proceso se logra gracias a la estructura molecular y al enlace metálico característico entre los átomos de metales, “los metales son buenos conductores eléctricos debido a que los electrones de valencia

interactúan con diferentes átomos facilitando así el transporte de carga eléctrica” (Barco Ríos, Rojas Calderón, & Restrepo Parra, 2012, pág. 197). En la Figura 15 se aprecia la manera en que los electrones de valencia se mueven a través de diferentes átomos al aplicar un voltaje.

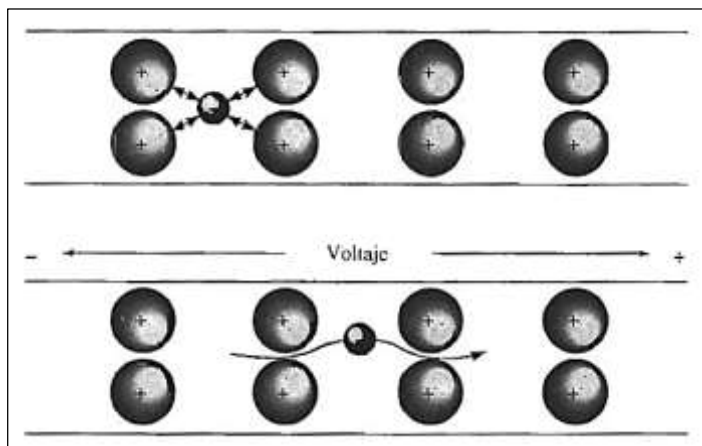


Figura 15. Movimiento de electrones de valencia aplicando voltaje
Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

Dependiendo del tipo de ordenamiento de los átomos se pueden obtener diferentes estructuras cristalinas como cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC) y hexagonal compacta (HCP). La conductividad eléctrica varía dependiendo de si las estructuras cristalinas son perfectas o tienen alguna imperfección (aleaciones). “Uno de los factores que disminuye la conductividad eléctrica es el incremento de temperatura debido a que la vibración de los átomos aumenta conforme aumenta la temperatura, esto impide el libre movimiento de los electrones” (Askeland , Fulay, & Wright, 2011, pág. 309). En la Figura 16 se puede apreciar la diferencia entre un electrón que se mueve por una

red cristalina perfecta y el impedimento que sufre el electrón en materiales con cristales imperfectos o cuando este está sometido a un incremento de temperatura.

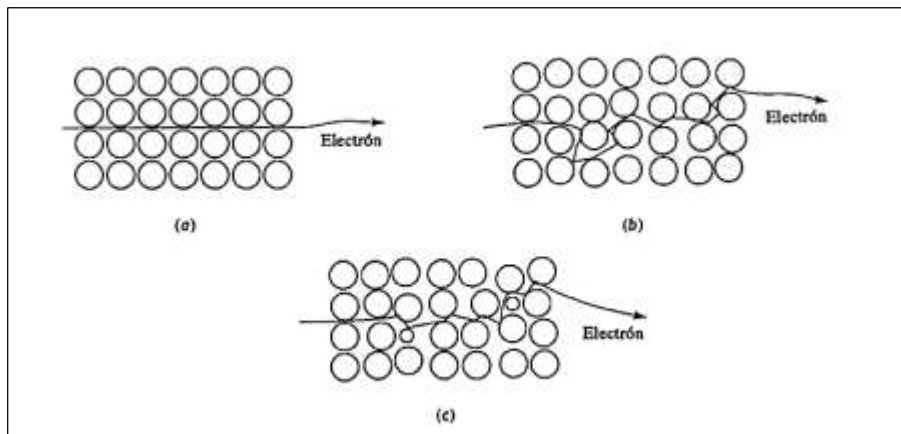


Figura 16. Recorrido de los electrones de valencia a través de a) material con cristales perfectos b) material con incremento de temperatura c) materiales con cristales imperfectos.

Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

Dependiendo del tipo de enlace del material, varía la manera en que los portadores de carga conducen la electricidad Figura 17. En los materiales con enlaces metálicos (metales) los electrones de valencia debido a la facilidad de movimiento que tienen son los encargados de trasportar la carga, en los materiales con enlaces covalente (semiconductores) los enlaces se rompen para que el electrón pueda desplazarse, y “en materiales enlazados iónicamente el ion completo debe desplazarse para trasportar carga” (Smith, 2006, pág. 254).

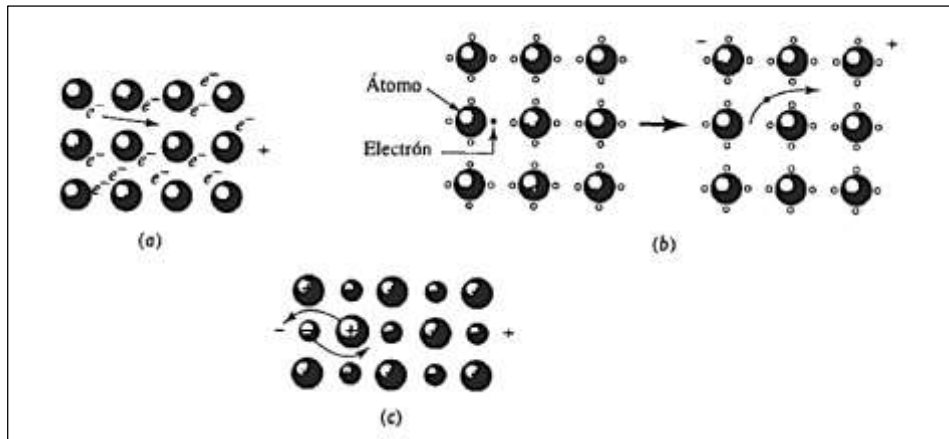


Figura 17. Portadores de carga de diferentes materiales a) enlace metálico b) enlace covalente c) enlace iónico.
 Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

2.2.2.4 *Números cuánticos*

En una estructura atómica los electrones tienen características únicas del nivel de energía que poseen, además no existe más de dos átomos con un mismo nivel de energía. El nivel energético de cada electrón está definido por cuatro números cuánticos.

- a. Número cuántico principal
- b. Número cuántico secundario
- c. Número cuántico magnético
- d. Número cuántico spin

2.2.2.5 *Electrones de valencia*

Son electrones que pertenecen a la capa de mayor nivel de energía de un átomo, estos electrones poseen el número cuántico más alto, además, son los responsables de la interacción atómica de diferentes materiales, esto hace que los átomos tengan la capacidad de formar enlaces.

La cantidad de electrones libres por unidad de volumen en enlaces metálicos varía dependiendo del tipo de material así tenemos en la Tabla 1.

Tabla 1
Electrones libres por unidad de volumen en conductores

Nro.	Material	Electrones/ cm³
01	cobre	8,45 x 10 ²²
02	plata	5,86 x 10 ²²
03	aluminio	18,07 x 10 ²²

Fuente: Askeland , Fulay y Wright (2011)

2.2.2.6 *Fuerzas de Lorentz*

En electromagnetismo una partícula cargada positiva o negativamente experimenta la acción de diversos tipos de fuerzas de factores diferentes. “Cuando una partícula cargada atraviesa un campo eléctrico Figura 18 esta experimenta una fuerza en dirección al campo eléctrico dada por la ecuación” (Edminister, 2000, pág. 72).

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \tag{6}$$

Donde \vec{F} es la fuerza que actúa sobre la carga, q es la carga de la partícula y \vec{E} es el campo eléctrico.

En interacciones entre campo magnético y partículas cargadas se puede observar que dichas partículas experimentan la acción de una fuerza conocida como la fuerza de Lorentz, Figura 18, “la acción de esta fuerza es capaz de provocar cambios en la trayectoria de la carga” (García Russi & Trigos Guevara, 2014, pág. 127).

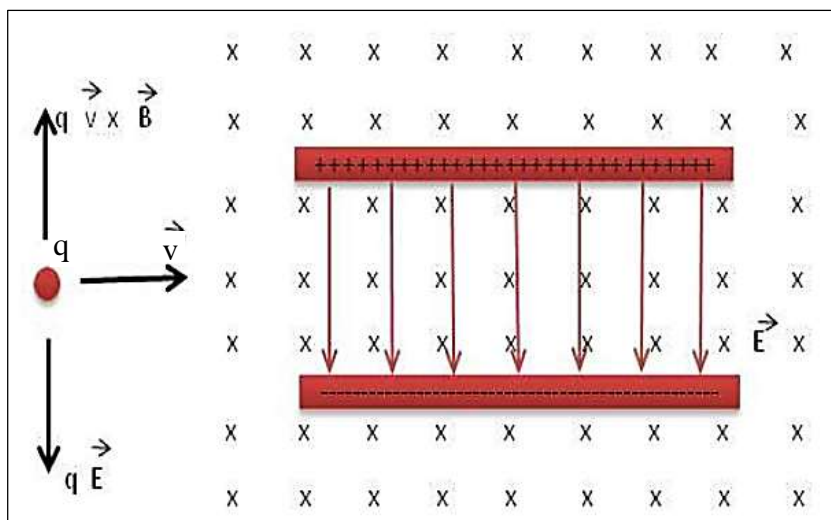


Figura 18. Fuerza de Lorentz sobre una carga eléctrica en movimiento dentro de un campo eléctrico y magnético.
Fuente: García Russi y Trigos Guevara (2014)

La fuerza debida a la acción del campo magnético sobre una partícula cargada en movimiento está dada por el producto vectorial de la velocidad a la que se mueve la partícula y el campo magnético ecuación 7. Se conoce como la fuerza de Lorentz a la adición de las fuerzas que actúan sobre partículas que se mueven dentro de campos magnéticos y eléctricos ecuación 8.

$$\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (7)$$

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (8)$$

El módulo de la fuerza es máximo cuando los vectores velocidad y campo magnético son perpendiculares, sin embargo, la fuerza es nula cuando los vectores velocidad y campo son paralelas. La fuerza que actúa sobre la carga está orientada tal como se aprecia en la Figura 19. “Lo que indica que la fuerza está orientada perpendicular al plano entre los vectores velocidad y campo” (Garcia Russi & Trigos Guevara, 2014, pág. 178).

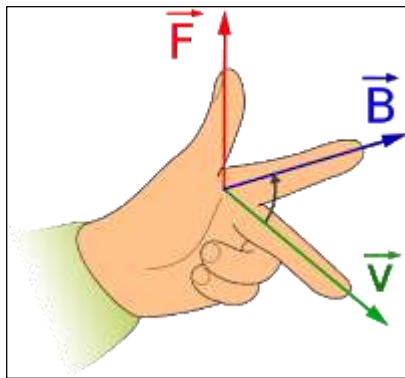


Figura 19. Orientación vectorial de la fuerza sobre partícula cargada
Fuente: Wangsness (2001)

2.2.3 Diseño mecánico

2.2.3.1 Definición conceptual

Es la rama de la ingeniería cuyo propósito es la creación funcional, segura y confiable de una maquina o un conjunto de elementos que conformen un sistema, en “donde el diseño desempeñe determinadas funciones y requerimientos que satisfagan necesidades, condiciones, demandas, requisitos y exigencias” (Hall, Holowenko, & Laughlin, 1971, pág. 34).

Según (Norton, 1995) “El diseño de máquinas se encarga de la invención de máquinas para diferentes usos con la confiabilidad y seguridad requerida. Una máquina puede definirse de muchas maneras entre ellas, las dos siguientes” (pág. 4).

- a) Aparato formado de unidades interrelacionadas o elementos de máquina
- b) Dispositivo que modifica una fuerza o un movimiento

2.2.3.2 Círculo de Mohr

En la determinación de la resistencia mecánica de una pieza se usa el círculo de Mohr como una manera de representación del estado tensional del sólido, esta representación se hace de acuerdo a las cargas a las que está sometido el sólido, tal y como nos muestra la Figura 20, normalmente un sólido está sometido a esfuerzos normales y tangenciales. En el círculo de Mohr si los esfuerzos normales están a compresión se representan como esfuerzos negativos y si la carga es de tracción se

representan como positivos, “en cambio la representación de los esfuerzos tangenciales depende de si son horarias (positivo) o antihorarias (negativos)” (Hamrock, Jacobson, & Schmid, 1999, pág. 371).

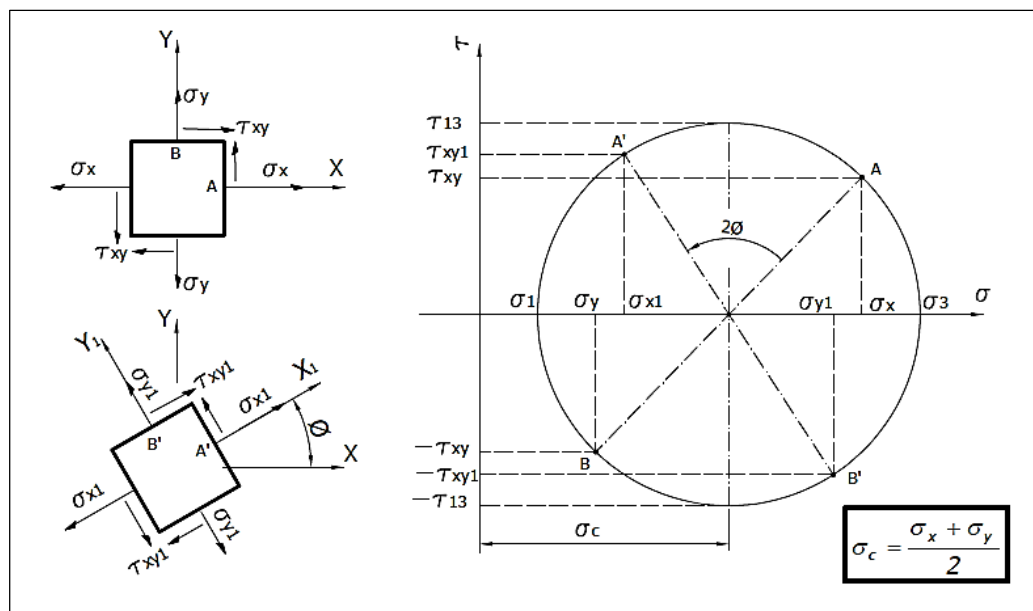


Figura 20. Representación gráfica del estado de tensiones. Círculo de Mohr
Fuente: Marin Garcia (2006)

Si la representación del estado de tensiones se gira un ángulo ϕ sobre el eje de referencia x esta se representa con un ángulo 2ϕ dentro del círculo de Mohr. Las tensiones máximas y mínimas a las que está sometido el sólido se obtienen de la intersección entre el círculo y el eje x (σ_1 y σ_3) de la Figura 20 (Marin Garcia, 2006).

Dependiendo de la aplicación que se le da, el sólido o elemento de máquina puede estar sometido máximo a cargas en sus tres ejes axiales, la representación de

estos esfuerzos es a través de 3 círculos de Mohr vinculados entre sí tal como se observa en la Figura 21, si las cargas son biaxiales se representan como 2 puntos que coinciden con el diámetro para del círculo de Mohr Figura 21, en cambio, si solo existe esfuerzos de uno de los ejes el valor se representa como un punto en el eje de las abscisas.

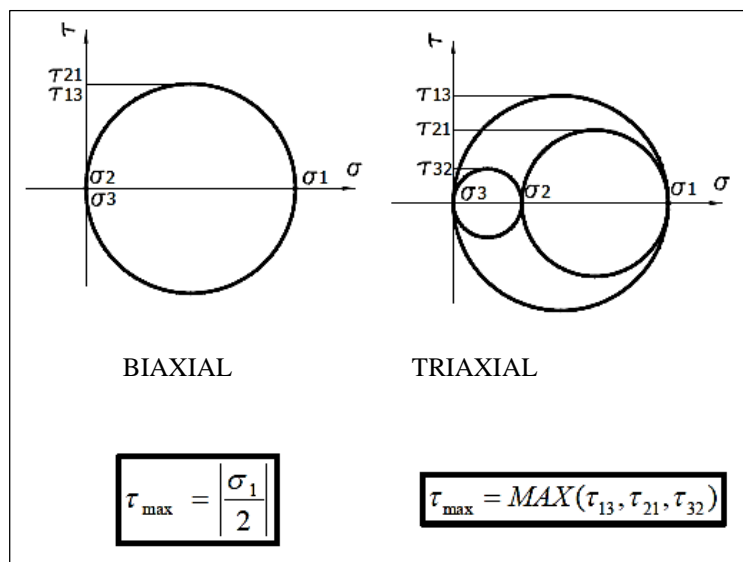


Figura 21. Representación gráfica del estado tensiones bajo cargas biaxiales y triaxiales
Fuente: Marin Garcia (2006)

2.2.3.3 Factor de seguridad

Se conoce como factor de seguridad a la relación entre la capacidad máxima calculada y el valor real al que estará expuesto el diseño planteado, con este valor podemos justificar el grado de incertidumbre que se presentan al realizar un diseño, causadas por factores como: errores en las fórmulas matemáticas utilizadas, criterio

de falla utilizadas, características de los materiales utilizados. Según (Marin Garcia, 2006) en la Tabla 2 Se tiene una referencia de los factores de seguridad para materiales dúctiles.

Tabla 2
Factores de seguridad para materiales dúctiles

Inf. disponible	Datos disponibles	factor
Ensayo de materiales	Material probado bajo condiciones parecidos.	A= 1.3
	Propiedades mecánicas similares	A= 2
	Datos obtenidos de catálogos y tablas genéricos	A= 3
	Datos desconocidos sin procedencia	A>5
Condiciones de contorno de utilizations de material	Condiciones idénticas a materiales ensayados	B= 1.3
	Funcionamiento de la pieza en entorno aislado	B= 2
	Entorno de funcionamiento poco agresivo	B= 3
	Entorno de funcionamiento muy agresivo	B>5
Procedimiento de diseño y modelado analítico utilizados	Sometido a pruebas científicas experimentales	C= 1.3
	Sometido a condiciones de funcionamiento precisos	C= 2
	Aproximación de condiciones de funcionamiento	C= 3
	Condiciones de funcionamiento aproximados	C>5

Fuente: Marin Garcia (2006)

Mediante la aplicación de este factor se obtiene un diseño con prestaciones adicionales a las mínimas estrictamente requeridas. Este valor de factor de seguridad depende principalmente de: “aplicación de la reglamentación vigente, nivel de confianza del diseñador, forma de falla del material (dúctil o frágil)” (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 256).

2.2.3.4 Criterios de fallo

Los elementos de máquina fallan dependiendo principalmente del tipo de material con que están fabricados. Cada material tiene su curva de esfuerzo-

deformación característico Figura 22, donde se indica la carga máxima permisible del material antes de plastificar o también conocido como el límite elástico del material.

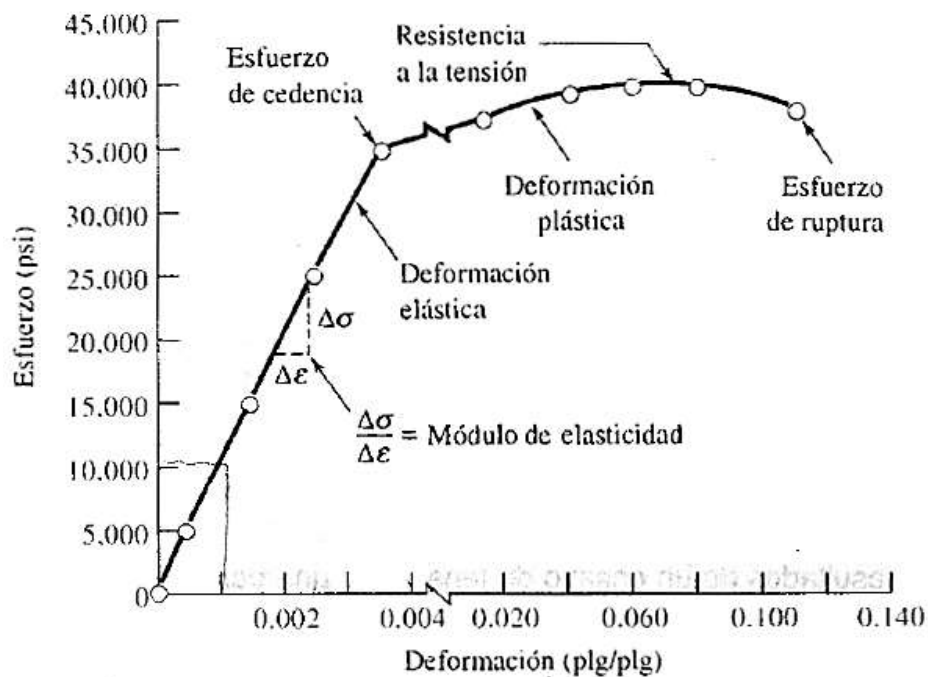


Figura 22. Curva esfuerzo-deformación de un material dúctil
Fuente: Askeland, Fulay y Wright (2011)

“Una máquina debe ser diseñada de tal manera que las tensiones que actúan sobre ella no salgan del dominio elástico del material” (Marin Garcia, 2006, pág. 87). Los criterios de fallo elástico son una manera de determinar los esfuerzos elásticos permisibles o su límite de trabajo de un elemento de máquina antes de que falle, las teorías más utilizadas son: teoría de la energía de distorsión o teoría de von Mises-Henky y la teoría de la tensión cortante máxima o teoría de Tresca- Guest.

a. Teoría de la energía de distorsión o teoría de von Mises-Henky

Según (Norton, 1995) “La teoría de von Mises se enfoca en estudiar la energía que se involucra en el cuerpo cuando sufre cambios en su forma debido a los esfuerzos de compresión o tracción”, el fallo ocurre cuando uno de los nodos expuestos a esfuerzos por unidad de volumen supera cierto límite, esta teoría es aplicable y se ajusta más a los ensayos empíricos, además es la más adecuada para materiales dúctiles.

Según la Figura 23, von Mises establece la zona segura contra fluencia donde el diseño trabaja adecuadamente sin fallar y sin ser sobredimensionado.

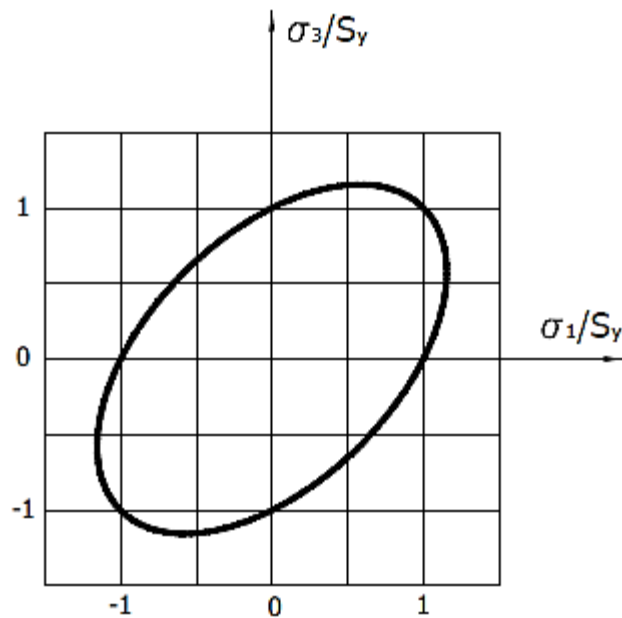


Figura 23. Área segura según von Mises
Fuente: Marin Garcia (2006)

Para calcular el coeficiente de seguridad según este criterio se debe calcular el esfuerzo equivalente de von Mises (σ') para así compararlo con el límite elástico del material utilizado según la ecuación 10.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 \cdot \sigma_3} \quad (9)$$

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (10)$$

b. Teoría de la tensión cortante máxima o teoría de Tresca- Guest

Es un criterio de resistencia estática aplicado a materiales dúctiles. Donde “Tresca se dio cuenta que el titanio presentaba bandas de cortantes brillantes bajo deformaciones unitarias pequeñas, indicando que los metales se deformaban bajo cortante en todas las circunstancias, y que el cortante se localizaba en planos bien definidos.” (Hamrock, Jacobson, & Schmid, 1999, pág. 235). En la Figura 25 podemos ver la zona donde se manifiesta estas deformaciones unitarias.

Los valores que estén dentro del área de la Figura 24, es según Tresca la zona segura donde el material sometido a dichos esfuerzos no fallará.

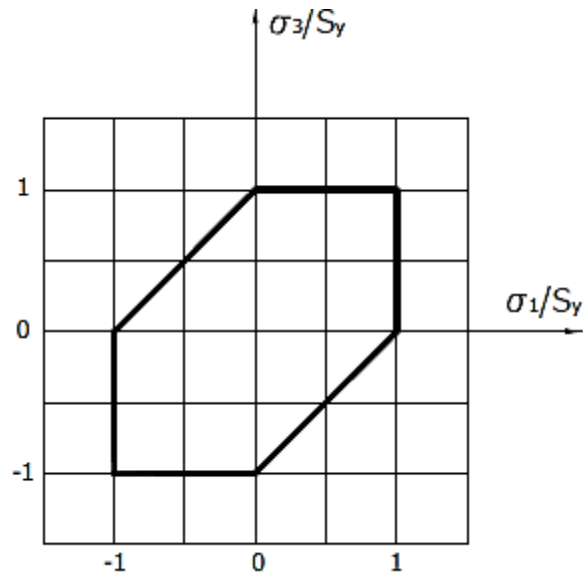


Figura 24. Área segura según Tresca
Fuente: Marin Garcia (2006)

Para aplicar el criterio de Tresca se debe cumplir que:

$$\tau_{max} \leq \frac{S_y}{2} \tag{9}$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \tag{10}$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \tag{11}$$

$$N = \frac{S_y}{2 \cdot \tau_{max}} \tag{12}$$

Donde S_y es el límite elástico del material, τ_{max} es la tensión cortante máxima, σ_1, σ_2 y σ_3 son las tensiones tridimensionales principales ubicados en el círculo de Mohr y N es el factor de seguridad del diseño.

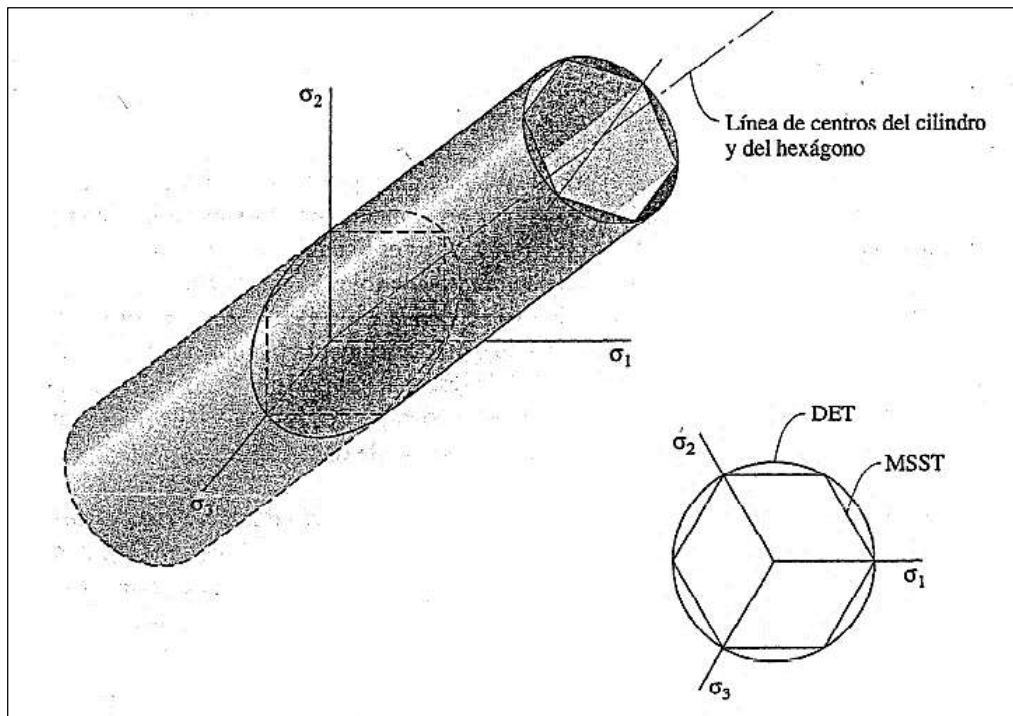


Figura 25. Lugar geométrico tridimensional de la fluencia según Tresca
Fuente: Hamrock, Jacobson y Schmid (1999)

Al comparar la teoría de von Mises y la teoría de Tresca en la Figura 26, se observa que no hay mucha diferencia, además se puede deducir que el diseño aplicando el criterio de Tresca es más seguro que el juicio de von Mises, sin embargo el criterio de von Mises se aproxima más a una situación real.

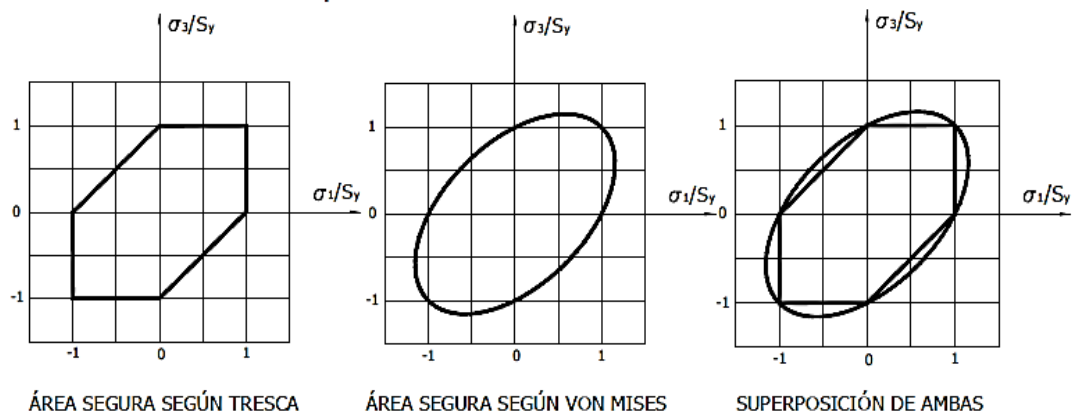


Figura 26. Comparación de la teoría de Tresca y la teoría de Von Mises
Fuente: Marin Garcia, 2006

2.2.3.5 Criterios para la asignación de materiales

La elección del material con el cual se va a fabricar el elemento de máquina, es una de las tareas primordiales para un ingeniero de diseño, debido a que esta influye directamente en el tamaño de la pieza, forma, procesos de fabricación y los costos de manufactura.

De acuerdo a las características y condiciones de funcionamiento, un elemento de máquina se puede fabricar con materiales como metales, polímeros, cerámicos y compuestos. En el proceso de fabricación de elementos de máquina, los metales y sus aleaciones son los más utilizados debido a sus buenas características mecánicas, facilidad de manufactura y su bajo coste de producción.

2.2.3.6 Estudio por elementos finitos

El método de los elementos finitos es una manera de aproximación que permite obtener soluciones a problemas físicos y mecánicos a los que están sometidos una pieza o una estructura, donde la pieza o estructura se divide en varias partes denominadas elementos, el comportamiento físico o mecánico al que está sometido cada elemento se concentra en puntos específicos denominados nodos Figura 27. “los nodos son los puntos donde los elementos se unen con sus adyacentes” (Celigüeta Lizarza, 2011, pág. 69).

Para resolver el problema general se debe resolver las dificultades de cada elemento debido a que están directamente relacionados. Lo que se conoce como problema general es el conjunto de incógnitas de cada elemento. De esta manera, el problema general se desglosa y pasan a convertirse en valores específicos concentrados en los nodos, “el comportamiento general de la pieza o estructura se basa en el comportamiento específico de cada elemento dentro del sólido” (Hurtado Gomez, 2002, pág. 129).

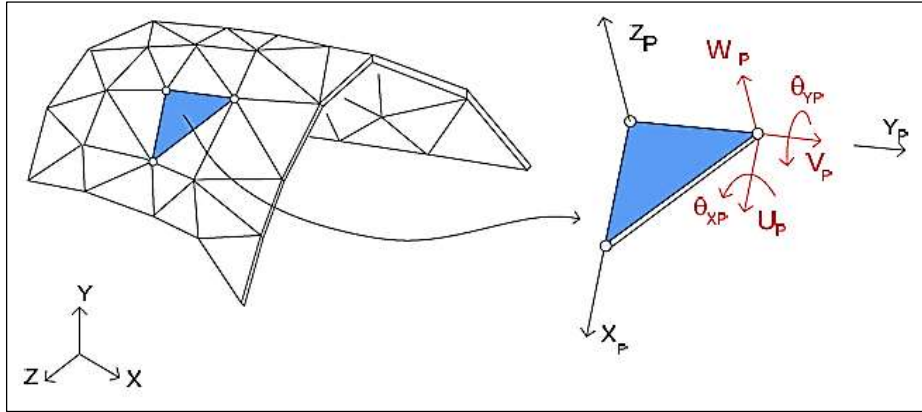


Figura 27. Cáscara modelizada mediante elementos planos
 Fuente: Taylor y Zienkiewicz (1994)

El método de elementos finitos se trata de dividir un cuerpo sólido en partes discretas de aproximación Figura 28. “La manera en que cada elemento se comporta dentro del sólido se obtiene de una interpolación de los valores en los nodos de cada elemento” (Taylor & Zienkiewicz, 1994, pág. 256).

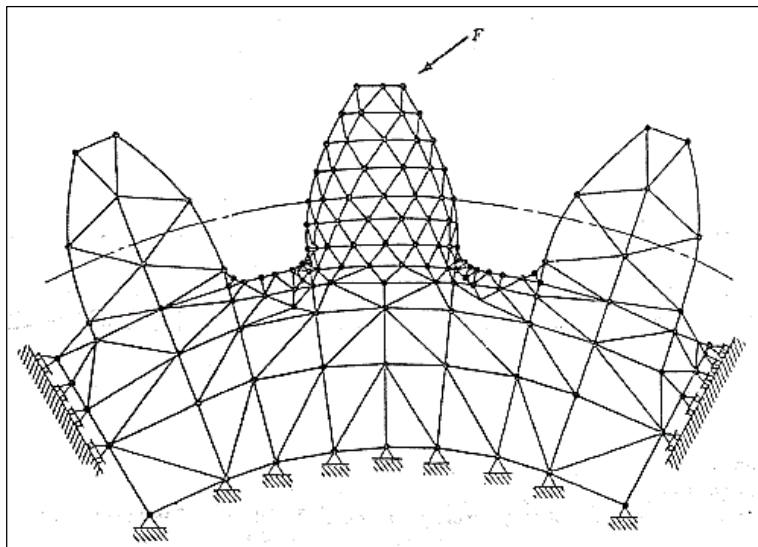


Figura 28. Discretización de elementos
 Fuente: O.C. y R.L. (1994)

La herramienta solidworks nos permite realizar diseños de diferentes elementos de máquina según las necesidades, además nos permite asignar un material al diseño elaborado, una vez aplicado el diseño podemos hacer diferentes estudios como estudios estáticos y estudios dinámicos a través del método de elementos finitos sometiendo a la pieza a cargas a las que estará expuesto. Todos los elementos diseñados en este trabajo están sometidos a cargas estáticas; por lo tanto, solo se realizan estudios estáticos.

2.2.4 Embrague de transmisión de par-motor en automóviles

2.2.4.1 Definición conceptual

En vehículos el componente de mayor demanda en su funcionamiento es el embrague, debido al papel que desempeña en la transmisión de potencia de un vehículo hace que sea indispensable. Por todo ello, este elemento debe contar con cuidados adecuados para evitar el desgaste prematuro, la vida útil de un embrague depende de la manera en que es tratada. “Este elemento de máquina desempeña su papel en la unión entre la caja de cambios y el motor de un vehículo, cuya función es acoplar o desacoplar la transmisión de potencia según se requiera” (Hall, Holowenko, & Laughlin, 1971, pág. 227).

Los frenos y embragues tienen un mismo principio de funcionamiento, ambos elementos tienen el papel de conectar o desconectar flechas en rotación ya sean por

fricción, hidráulicas o mecánicas. “Cuando los dos elementos conectados giran se trata de un embrague, si uno de los elementos se encuentra fijo, el mecanismo es freno” (Norton, 1995, pág. 962).

3.2.4.1 Tipos de embrague

Existen varios métodos de acoplamiento entre dos ejes, como son los de contacto positivos, fricción, sobremarcha o de una vía, magnético y acoplamiento base fluido. Sin embargo, los más utilizados son:

- a. **De fricción:** Existen dos elementos básicos que constituyen el embrague a fricción mecánica, el primero llamado volante de inercia que está conectado directamente al motor y el segundo elemento conecta el motor y la caja de cambios adhiriéndose al volante de inercia debido a la presión ejercida sobre este.
- b. **Electromagnéticos:** Este sistema consiste en implementar al volante de inercia con unos electroimanes que generen campos magnéticos para que con el campo magnético generado se activen polvos magnéticos que permitan hacer el acoplen entre flechas en rotación.
- c. **Hidráulicos:** También conocido como convertidos de par, la base de su funcionamiento puede ser comparada con un par de ventiladores, donde el primero está conectado y funcionando, el segundo está apagado y se ubica frente al primero. Mediante el movimiento del aire que el primero genera se transmitirá el movimiento al segundo ventilador. Esta analogía es lo que se

aplica en embragues hidráulicos donde el medio para transmitir la energía es el aceite y las principales partes son la bomba centrífuga conectada directamente al motor y la turbina que transmite la energía a la caja de cambios.

2.2.4.2 Par-motor y potencia en motores de combustión interna

El par-motor o torque es una magnitud física que permite cuantificar la magnitud de la fuerza por unidad de longitud que genera un motor de combustión sobre un eje que gira sobre sí mismo a una determinada velocidad (rpm). En cambio, la potencia es la relación entre el torque transmitido y la velocidad angular (rpm) que desarrolla un motor cuando está en pleno funcionamiento. En la Figura 29, se puede apreciar la relación entre la potencia, par-motor y el rango de rpm en la que el motor se desempeña.

3,197 cm³
195 kW (265 PS) bei 6.500 min⁻¹
330 Nm von 3.000 bis 5.000 min⁻¹
07/08

3,197 cc
195 kW (265 bhp) at 6,500 rpm
330 Nm from 3,000 to 5,000 rpm

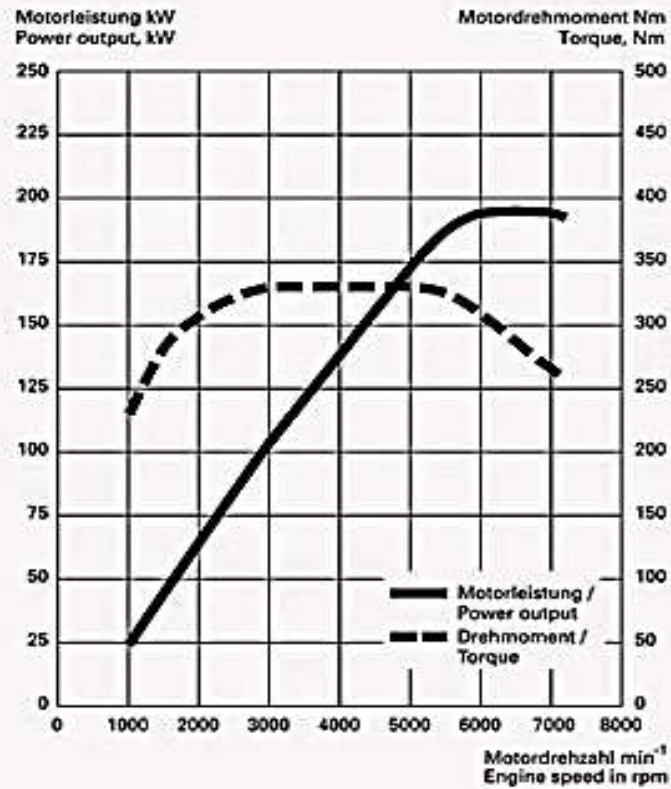


Figura 29. Curva característica de potencia y par-motor en relación con el rpm que desarrolla el motor.
Fuente: Motores AUDI

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Corrientes parásitas: Es descrito por (Edminister, 2000) como “Un fenómeno electromagnético que ocurre cuando un campo magnético variable atraviesa un conductor”.

Inducción magnética: Es descrito por (Barco Ríos, Rojas Calderón, & Restrepo Parra, 2012) como “un proceso mediante el cual los campos magnéticos generan campos eléctricos”.

Paramagnetismo: Es descrito por (K. Cheng, 1998) como “la tendencia de los momentos magnéticos libres (espín u orbitales) a alinearse paralelamente a un campo magnético”.

Ferromagnetismo: Es descrito por (K. Cheng, 1998) como “un fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido”.

Diamagnetismo: Es descrito por (K. Cheng, 1998) como “una propiedad de los materiales que consiste en repeler los campos magnéticos. Es lo opuesto a los materiales paramagnéticos los cuales son atraídos por los campos magnéticos”.

Temperatura de Curie: Es descrito por (Wangsness, 2001) como “la temperatura que por encima de la cual un material ferromagnético pierde sus propiedades magnéticas comportándose de esta manera como un material paramagnético”.

Remanencia: Es descrito por (Wangsness, 2001) como “la persistencia de la imanación en una barra de acero que ha estado sometida a la acción de un campo magnético”.

Plastificación: Es descrito por (Marin Garcia, 2006) como “el momento en que un material empieza a sufrir deformaciones permanentes”.

Límite elástico: Es descrito por (Askeland , Fulay, & Wright, 2011) como “El esfuerzo máximo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones permanentes”.

Vórtice electromagnético: Es descrito por (Bernardo García , 2006) como “la rotación en espiral de electrones”.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo a las características del presente trabajo que es de tipo investigación experimental, se aplica un estudio factorial 3^3 con 3 réplicas. Este diseño nos permite obtener con más precisión la estimación de efectos al relacionar la respuesta y cada uno de las variables. Asignando 3 valores (alto, medio, bajo) para cada factor y aplicando una combinación entre factores se obtiene el comportamiento y la relación entre variables para diferentes circunstancias.

La Tabla 3 muestra todas las combinaciones que se realizan en el proceso experimental para obtener resultados con menor error posible. Donde:

1 = valor alto

-1 = valor bajo

0 = valor medio

Los valores alto, medio, bajo, para cada factor serán asignados previa observación experimental independiente para cada variable.

El diseño experimental busca medir y relacionar las variables para saber el comportamiento en diversas circunstancias, en base a lo obtenido se tendrá la posibilidad de confirmar o rechazar la hipótesis.

Tabla 3
Cuadro de posibilidades de un diseño factorial 3K

N°	FACTOR A (und)	FACTOR B (und)	FACTOR C (und)	RESULTADOS (und)
1	1	1	1	1
2	-1	1	1	1
3	0	1	1	1
4	1	-1	1	1
5	-1	-1	1	1
6	0	-1	1	1
7	1	0	1	1
8	-1	0	1	1
9	0	0	1	1
10	1	1	-1	-1
11	-1	1	-1	-1
12	0	1	-1	-1
13	1	-1	-1	-1
14	-1	-1	-1	-1
15	0	-1	-1	-1
16	1	0	-1	-1
17	-1	0	-1	-1
18	0	0	-1	-1
19	1	1	0	0
20	-1	1	0	0
21	0	1	0	0
22	1	-1	0	0
23	-1	-1	0	0
24	0	-1	0	0
25	1	0	0	0
26	-1	0	0	0
27	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 4
Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Vd: fuerza de inducción electromagnética	Torque	Nm
Vi: Distancia de separación	Distancia	mm
Vi: Intensidad del campo magnético	Campo magnético	Tesla
Vi: Velocidad relativa	Velocidad	RPM

Fuente: Elaboración propia

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

El procedimiento planteado de recolección de datos que ayude a determinar la dependencia entre la variable dependiente de las variables independientes es mediante la observación directa y el uso de fichas de ensayo. Los datos obtenidos se anotarán utilizando fichas con tablas de doble entrada, tal como se aprecia en la Tabla 3. Para los objetivos planteados que contemplen diseñar, se hará uso, como dato, las relaciones de dependencia obtenidas en procedimiento experimental.

3.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Los datos obtenidos de las fichas de ensayo serán procesados mediante la aplicación de un software estadístico (statgraphics) y analizadas haciendo uso de la

estadística de Durwin Watson y el P-valor para aceptar o negar las hipótesis planteadas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Análisis teórico del origen de fuerzas

En el proceso de entender el origen de las fuerzas electromagnéticas estudiadas analizamos de manera vectorial la orientación y la distribución de las fuerzas de Lorentz que se manifiesta para este caso en particular, donde el fenómeno de la inducción electromagnética ocurre en un disco de metal paramagnético. En la Figura 30 se tiene el análisis vectorial del origen de las fuerzas de Lorentz \vec{F} que actúan sobre una partícula cargada (electrones de valencia) cuando un campo magnético estable \vec{B} se mueve a lo largo de una superficie de aluminio con una velocidad \vec{V} .

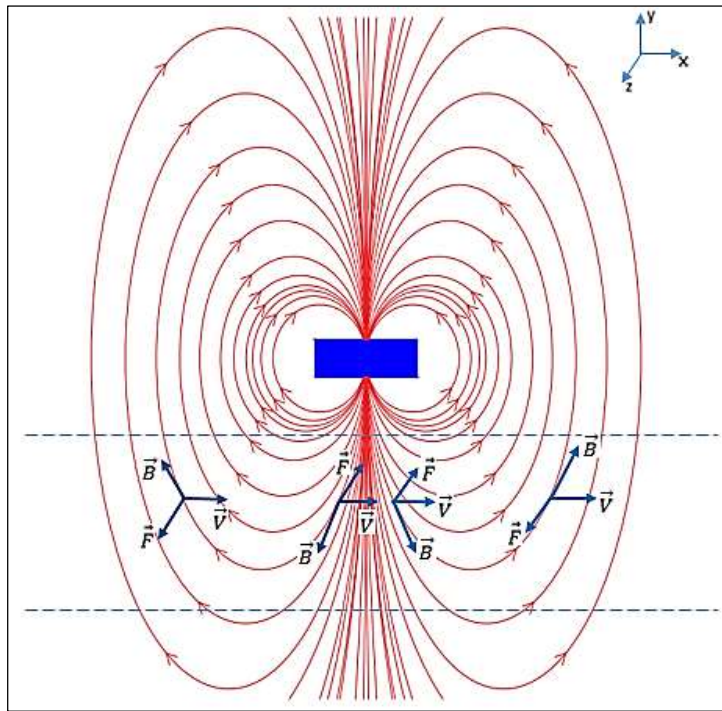


Figura 30. Análisis vectorial de las fuerzas de Lorentz (vista B-B Figura 32)
Fuente: Elaboración propia

Sabiendo que el campo magnético de un imán permanente es una magnitud vectorial y se distribuye alrededor del imán en forma de líneas de campo, en la Figura 31 tenemos una representación de una de las líneas del campo magnético alrededor del imán. Para efectos de análisis se considera la intersección del campo con un plano, donde dicha intersección forma dos círculos concéntricos tal como se aprecia en la Figura 31, estos círculos representan los puntos donde existe una interacción entre el material paramagnético (aluminio) y el campo magnético. Estos círculos se toman como referencia de un elemento diferencial para un buen análisis del proceso de inducción y la trayectoria de los electrones de valencia dentro del aluminio.

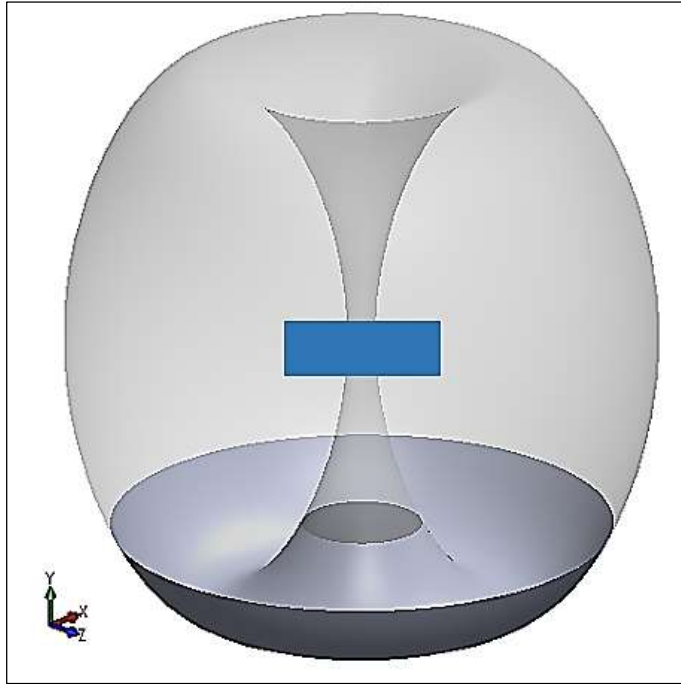


Figura 31. Campo magnético tridimensional
Fuente: Elaboración propia

Para un mejor análisis de la orientación de las fuerzas de Lorentz que se manifiestan alrededor de los círculos de intersección, se evaluó bajo diferentes puntos de vista, representadas por las letras (A, B, C, D, E y F) de la Figura 32. Donde cada vista representa un plano de corte del campo magnético para una misma dirección del vector velocidad V , estas vistas permiten observar adecuadamente el comportamiento de la fuerza resultante distribuida alrededor de los círculos cuando el campo magnético se mueve con una velocidad V sobre el disco de aluminio.

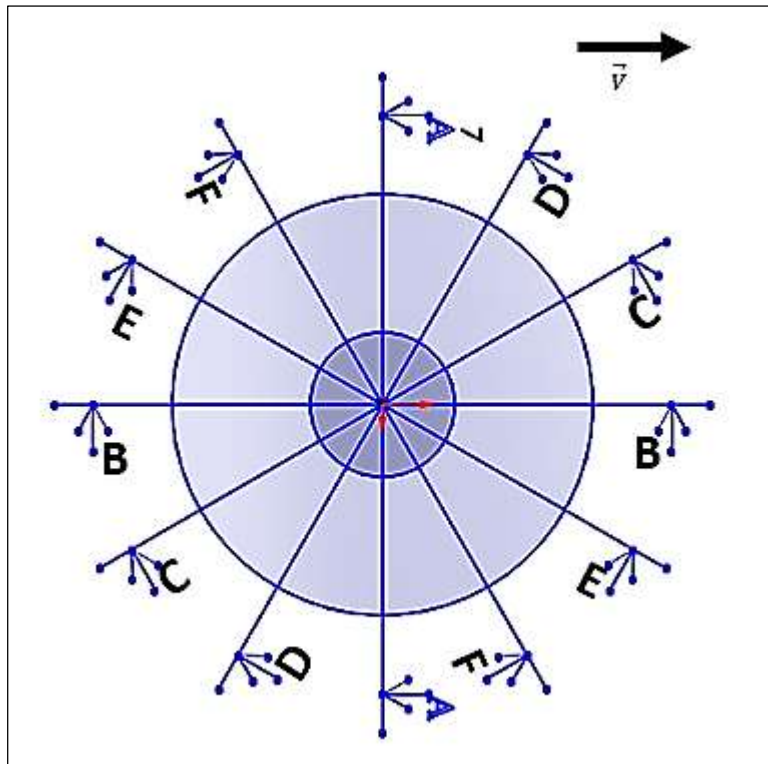


Figura 32. Círculos de intersección con diferentes planos para análisis de fuerzas.

Fuente. Elaboración propia

Evaluando uno de los planos de corte del campo magnético tenemos la vista A-A donde el vector velocidad es perpendicular al plano representado por la Figura 33. Según la ley de Lorentz explicada en el capítulo anterior nos dice que la fuerza que actúa sobre una partícula cargada en movimiento en el interior de un campo magnético siempre es perpendicular al plano que forman los vectores de velocidad y campo magnético. En la Figura 30 se muestra el análisis vectorial de la fuerza sobre una partícula cargada, donde la fuerza tiene diferentes direcciones evaluadas según el punto donde se encuentre el electrón, esta diferencia ocurre básicamente

porque el vector campo magnético en un punto determinado es el vector tangente a la curva representada. En la Figura 33 las fuerzas F_1 y F_2 representan las fuerzas sobre círculo con mayor diámetro y las fuerzas F_3 y F_4 representan las fuerzas sobre el círculo de menor diámetro. Haciendo una descomposición vectorial tenemos los componentes verticales y horizontales de la fuerza de Lorentz, donde el componente horizontal de la fuerza, permite observar con claridad la trayectoria del movimiento de los electrones de valencia dentro del material paramagnético en el proceso de inducción electromagnética estudiada.

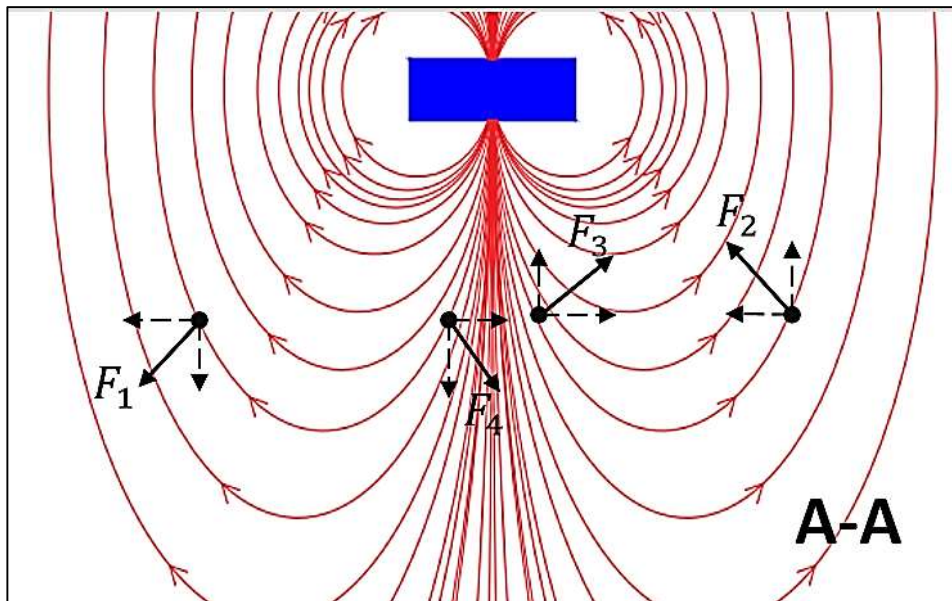


Figura 33. Análisis vectorial de las fuerzas de Lorentz en la vista A-A de la Figura 32.

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en consideración la ley de Lorentz en la Figura 34 se tiene una distribución de las fuerzas alrededor de las dos circunferencias estudiadas, donde

se observa que dependiendo del punto evaluado el ángulo de la fuerza con respecto a la horizontal varía a lo largo de la circunferencia; sin embargo, la dirección de las fuerzas desde el punto de vista superior no varía tal como se muestra en (a) de la Figura 34, las fuerzas conservan su orientación en (a) porque al evaluar los vectores velocidad y campo magnético de sistema, el vector velocidad no cambia su dirección ni su sentido.

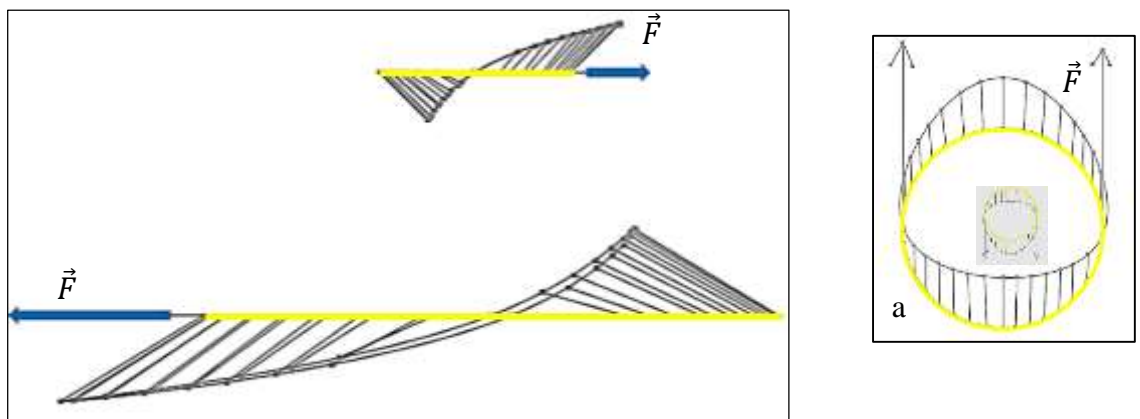


Figura 34. Distribución de fuerzas de Lorentz alrededor de las circunferencias de la Figura 32.
Fuente: Elaboración propia

Considerando las componentes horizontales de la fuerza de Lorentz representada en las Figura 33 y considerando también la manera en que estas se distribuyen alrededor de los círculos en la Figura 34. Se puede graficar los correspondientes vectores de la fuerza alrededor del círculo de la Figura 32 para diferentes puntos de vista representadas por la Figura 35.

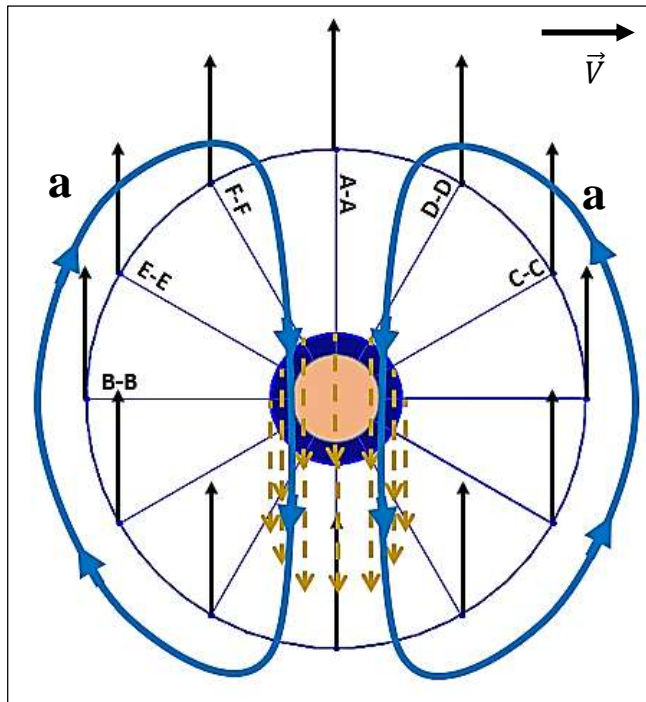


Figura 35. Trayectoria del movimiento de los electrones de valencia
Fuente: Elaboración propia

Donde los vectores de color negro representan las componentes horizontales de la fuerza alrededor del círculo de mayor diámetro, en cambio los vectores representados por el color dorado representan la manera en que las fuerzas se distribuye alrededor de la circunferencia de menor diámetro. Evaluando las fuerzas distribuidas en ambos círculos se puede observar que existe una gran concentración de fuerzas alrededor del círculo de menor diámetro, afectando en todo el trayecto a las fuerzas del círculo exterior dando como resultante fuerzas con una sola dirección. Teniendo en cuenta el equilibrio de fuerzas podemos trazar la trayectoria que un electrón sufre cuando se mueve dentro de las circunferencias estudiadas, esta trayectoria esta representada por las curvas (a) de la Figura 35.

Para efectos de análisis las curvas (a) de la Figura 35 se consideran circunferencia distribuidas por todo el espacio que abarca el campo magnético, en la Figura 36 se representa con circunferencias la trayectoria de los electrones de valencia del aluminio evaluado en diferentes puntos de la interacción con el campo magnético.

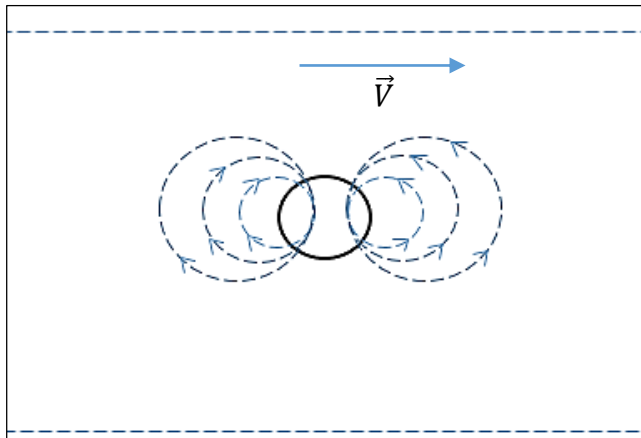


Figura 36. Representación del movimiento de los electrones de valencia dentro del aluminio.
Fuente: Elaboración propia

Considerando que el aluminio tiene en su estructura atómica tres electrones de valencia y que la intensidad del proceso de inducción depende de dicho valor. En la Figura 37 tenemos una vista de sección representada de las infinidad de curvas o circunferencia que se manifiestan en la interacción del campo magnético y el material paramagnético. Siguiendo el análisis hecho en la Figura 35 se observa la formación de torbellinos de electrones, obteniendo de esta manera, electroimanes temporales, que es la fuente principal de fuerza que se pretende aprovechar.

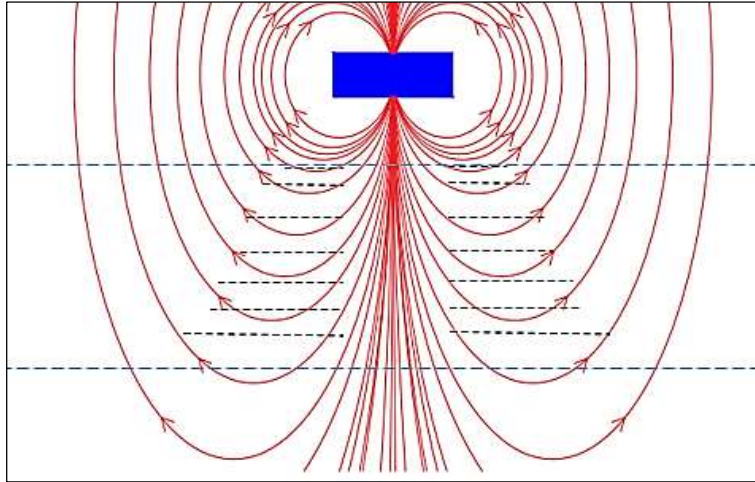


Figura 37. Formación de torbellinos de electrones de valencia dentro del material paramagnético (aluminio).
Fuente: Elaboración propia

Las fuerzas que se pretenden aprovechar en el presente trabajo de investigación, son básicamente la interacción de dos campos magnéticos de igual o diferentes polaridades. Se sabe que al interactuar dos imanes con polos magnético iguales se manifiesta una fuerza de repulsión y al interactuar dos imanes con polos magnéticos diferentes aparece una fuerza de atracción mutua, ambas fuerzas varían dependiendo de la distancia de separación entre las fuentes de campo magnético. Considerando este concepto básico del magnetismo se puede explicar el origen de las fuerzas estudiadas. En la Figura 36 los vórtices de electrones que se forman delante y posterior del imán tienen sentidos de giro opuestos, así se sabe que el electroimán temporal formado por el primer vórtice genera por la ley de Faraday-Lenz un campo magnético con la misma polaridad que el campo magnético del imán, obtenido de esta manera una fuerza de repulsión, en cambio el último

torbellino de acuerdo a la ley de Faraday-Lenz tiene diferente polaridad que el campo magnético del imán, generando así una fuerza de atracción. Gracias a esta diferencia de giro de los vórtices se obtiene una fuerza resultante, que es la suma de la fuerza de repulsión y la fuerza de atracción entre el imán y los electroimanes temporales.

4.1.2 Análisis mecánico de la relación entre la fuerza electromagnética y las variables estudiadas

Siguiendo el diseño experimental se asigna, previo análisis, valores alto, medio y bajo a cada variable independiente, para así de esta manera determinar la relación entre variables, con este fin se ha construido un banco de prueba que permita medir y controlar cada una de las variables en diferentes circunstancias. En la Figura 38 se tiene el banco de prueba que se utilizó en el proceso.

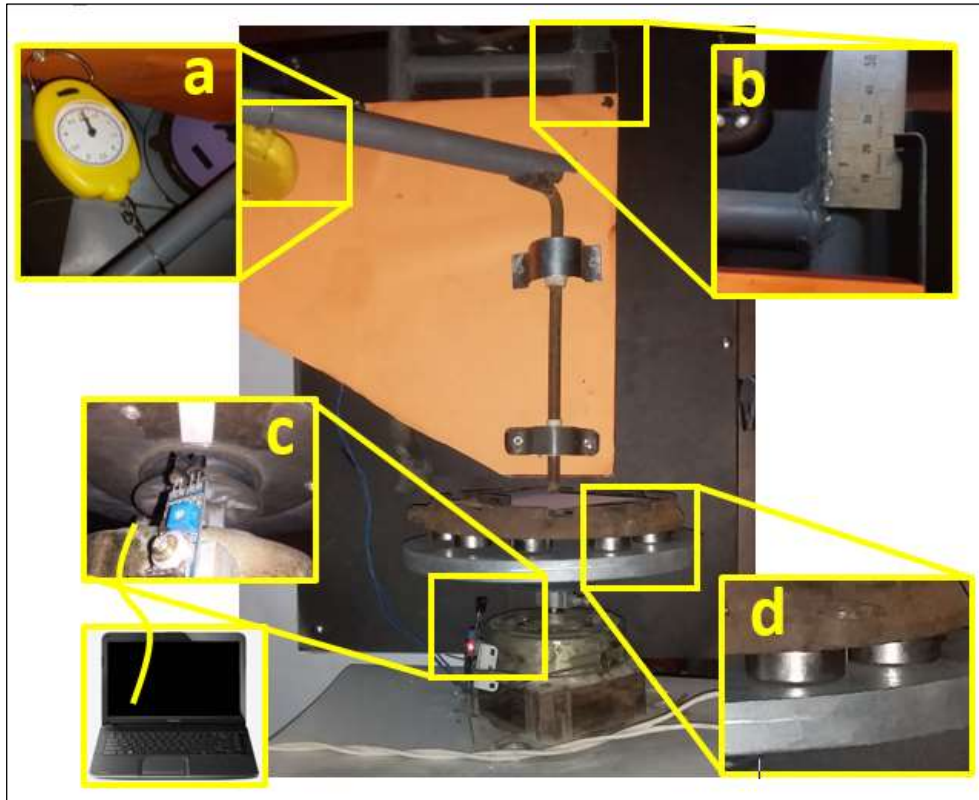


Figura 38. Banco de prueba utilizado para determinar el par transmitido en diversas circunstancias.
Fuente: Elaboración propia

Los materiales implementados para el proceso experimental del presente trabajo representado por la Figura 38 fueron:

- **Motor eléctrico:** Con una potencia de 1 hp, alimentación monofásica 220 v a 60 Hz, velocidad de 1 725 rpm y un torque de 5,7 N-m
- **Controlador PWM:** Alimentación monofásica 220 v de 50 – 60 Hz
- **Disco de aluminio:** De aluminio con una pureza del 99 %, diámetro 230 mm y 15 mm de espesor, usado como material paramagnético.

- **Disco de acero:** Con un diámetro de 200 mm usado como soporte para los imanes y a la vez conectado a un eje en L que permite medir la magnitud de la fuerza transmitida.
- **Imanes de neodimio:** Con un diámetro de 30 mm y espesor de 10 mm grado N50.
- **Sensor infrarrojo:** Para contabilizar la cantidad de RPM del motor, que va conectado a un microcontrolador (arduino) y la lectura de esta se hace a través de una laptop,
- **Balanza reloj:** Con capacidad máxima de 5 Kg y una precisión de 0,05 Kg
- **Banco de prueba:** Estructura que permita el movimiento vertical del disco en donde van montado los imanes para poder controlar la distancia de separación del proceso.

Al realizar pruebas preliminares se determinó y se le asignaron los 3 valores significativos a cada variable, que permita medir la relación entre variables, de esta manera obtenemos los datos de la Tabla 5.

Tabla 5
Datos de trabajo de las variables

Variab les	Alto	Medio	Bajo
Distancia (mm)	31	21	11
Campo magnético (T)	3,70	2,22	0,74
Velocidad (RPM)	1 800	960	120

Fuente: Elaboración propia

Según el diseño aplicado tenemos 27 combinaciones para poder relacionar las variables, de esta manera tenemos los datos de la Tabla 6 donde incluye en los resultados 3 réplicas.

Tabla 6
Datos obtenidos de las pruebas experimentales

N°	Distancia (mm)	Campo magnético (T)	Velocidad (RPM)	Torque (N-m)		
				Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1	11	0,74	120	0,375	0,375	0,300
2	21	0,74	120	0,225	0,225	0,225
3	31	0,74	120	0,150	0,150	0,150
4	11	2,22	120	0,450	0,675	0,450
5	21	2,22	120	0,300	0,300	0,375
6	31	2,22	120	0,225	0,225	0,225
7	11	3,70	120	0,975	1,200	1,275
8	21	3,70	120	0,600	0,750	0,600
9	31	3,70	120	0,300	0,375	0,375
10	11	0,74	960	1,050	1,125	1,125
11	21	0,74	960	0,375	0,375	0,375
12	31	0,74	960	0,300	0,300	0,300
13	11	2,22	960	2,325	3,300	3,300
14	21	2,22	960	0,975	0,900	0,975
15	31	2,22	960	0,375	0,375	0,375
16	11	3,70	960	4,650	4,800	4,950
17	21	3,70	960	1,200	1,875	1,800
18	31	3,70	960	0,375	0,600	0,525
19	11	0,74	1800	1,200	1,125	1,200
20	21	0,74	1800	0,450	0,450	0,45
21	31	0,74	1800	0,225	0,300	0,300
22	11	2,22	1800	3,525	3,525	3,600

23	21	2,22	1800	1,050	1,050	1,050
24	31	2,22	1800	0,450	0,375	0,375
25	11	3,70	1800	6,000	6,225	6,300
26	21	3,70	1800	1,950	1,800	1,875
27	31	3,70	1800	0,600	0,600	0,600

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos realizamos un análisis estadístico que nos permite contrastar los objetivos y las hipótesis planteada, en la Tabla 7 se muestra el análisis de varianza, conjuntamente con el valor P de cada variable y las correlaciones correspondientes.

Tabla 7
Análisis de varianza para TORQUE

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
A: Distancia	17,063	1	17,063	443,14	0,0000
B: Campo magnético	4,35102	1	4,35102	113,00	0,0000
C: Velocidad	1,49633	1	1,49633	38,86	0,0000
AA	5,47253	1	5,47253	142,12	0,0000
AB	19,2502	1	19,2502	499,94	0,0000
AC	17,3264	1	17,3264	449,98	0,0000
BB	0,105035	1	0,105035	2,73	0,1035
BC	7,08891	1	7,08891	184,10	0,0000
CC	2,34722	1	2,34722	60,96	0,0000
AAB	1,35005	1	1,35005	35,06	0,0000
AAC	2,1463	1	2,1463	55,74	0,0000

ABB	0,018802	1	0,0188021	0,49	0,4872
ABC	6,22711	1	6,22711	161,72	0,0000
ACC	1,6688	1	1,6688	43,34	0,0000
BBC	0,002552	1	0,0025520	0,07	0,7977
BCC	0,376302	1	0,376302	9,77	0,0027
Total error	2,46433	64	0,0385052		
Total (corr.)	175,679	80			

Fuente: Elaboración propia

Luego del análisis estadístico aplicado con la ayuda de software statgraphics obtenemos los siguientes datos:

R-cuadrado = 98, 5973 % (bondad del ajuste)

R-cuadrado (ajustada por d.f.) = 98,2466 %

Error estandar de estimación = 0,196227

Error absoluto medio = 0,128532

Estadístico de Durbin Watson = 0,6218

Según los resultados estadísticos la bondad de ajuste obtenido es de 98,2466 %, por lo que podemos afirmar que la varianza de los datos está dentro los valores óptimos necesarios.

OPTIMIZAR LA RESPUESTA

Además del análisis de varianza el software nos permite obtener el valor óptimo para la variable dependiente $T=6,16794$ N-m, este valor está condicionado con los límites establecidos en la Tabla 5. Según la Tabla 8 este valor se obtiene cuando la distancia de separación es el mínimo posible, el campo magnético y la velocidad relativa son lo máximo posible.

Tabla 8
Valor óptimo para el Torque

Factor	Bajo	Alto	Optimo
Distancia	11,0	31,0	11,0
Campo magnético	0,74	3,7	3,7
Velocidad	120,0	1,800,0	1 800,0

Fuente: Elaboración propia

Para responder al objetivo general y poder calcular los parámetros óptimos para diseñar el embrague magnético es necesario contar con una ecuación que relacione todas las variables, por tanto, el software utilizado nos facilita dicha ecuación 13.

$$\begin{aligned}
 \text{TORQUE} = & -1,75577 + 0,198488*\mathbf{D} + 0,783823*\mathbf{B} + 0,404696\mathbf{E}-2*\mathbf{V} - \\
 & 0,435069\mathbf{E}-2*\mathbf{D}^2 - 9,7237\mathbf{E}-2*\mathbf{D}*\mathbf{B} - 0,304562\mathbf{E}-3*\mathbf{D}*\mathbf{V} + 8,04331\mathbf{E}-2*\mathbf{B}^2 + \\
 & 0,157814\mathbf{E}-2*\mathbf{B}*\mathbf{V} - 0,12452\mathbf{E}-5*\mathbf{V}^2 - 0,180713\mathbf{E}-2*\mathbf{D}*\mathbf{B}^2 + 0,222246\mathbf{E}- \\
 & 2*\mathbf{D}*\mathbf{B}*\mathbf{V} + 5,2851\mathbf{E}-8*\mathbf{D}*\mathbf{V}^2 - 1\mathbf{m}69573\mathbf{E}-7*\mathbf{B}*\mathbf{V}^2 \\
 & \dots\dots\dots(13)
 \end{aligned}$$

Donde D: Es la distancia de separación, B: Es el campo magnético, y V: Es la velocidad relativa.

Según la Figura 39 tenemos la ilustración del tipo de distribución de los datos estudiados, mostrando en color azul las variables cuya incidencia es negativa y gris si la incidencia de la variable es positiva. Además, según la imagen se puede observar la manera en que los datos se distribuyen, asemejándose a la campana de Gauss de una distribución normal.

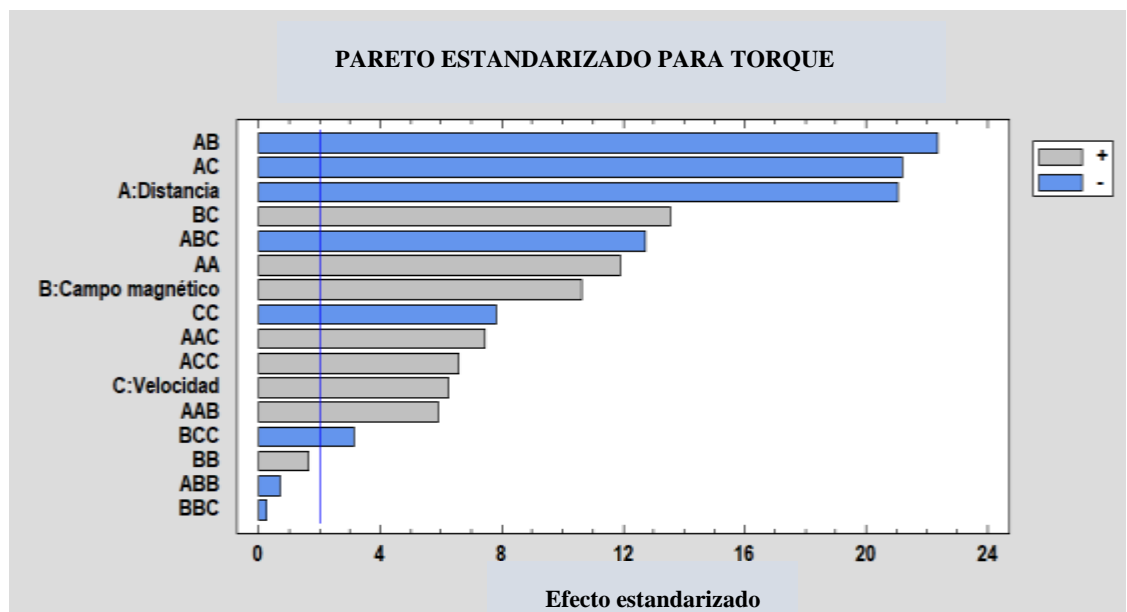


Figura 39. Gráfica de Pareto estandarizado para torque
Fuente: Elaboración propia

Considerando los objetivos planteados nace la necesidad de saber la manera en que se comportan, y el efecto que tiene sobre el torque cada variable dentro del rango establecido, de esta manera poder proyectar o extrapolar datos para utilizar

en los diseños. Según la Figura 40 se puede apreciar el comportamiento de cada variable independiente bajo las condiciones planteadas.

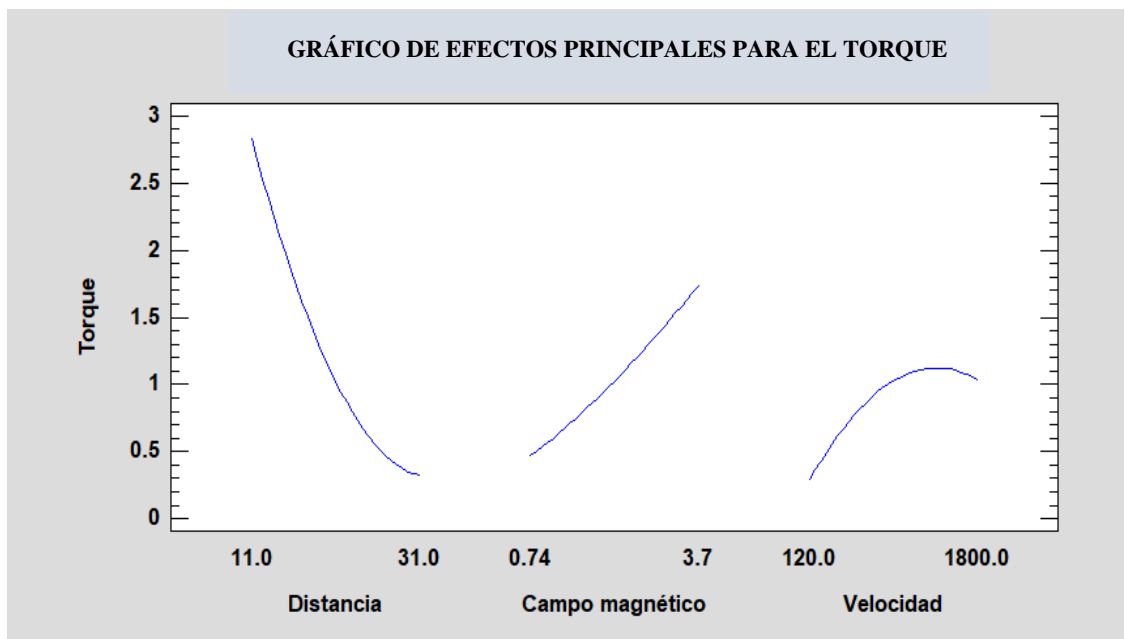


Figura 40. Gráfica de efectos principales para el torque
Fuente: Elaboración propia

La Figura 41 permite observar la manera en que los datos se distribuyen y el nivel de influencia de estas sobre la variable dependiente. Según la Figura 41 se sabe que la variable distancia de separación es el que más influye en la determinación de torque.

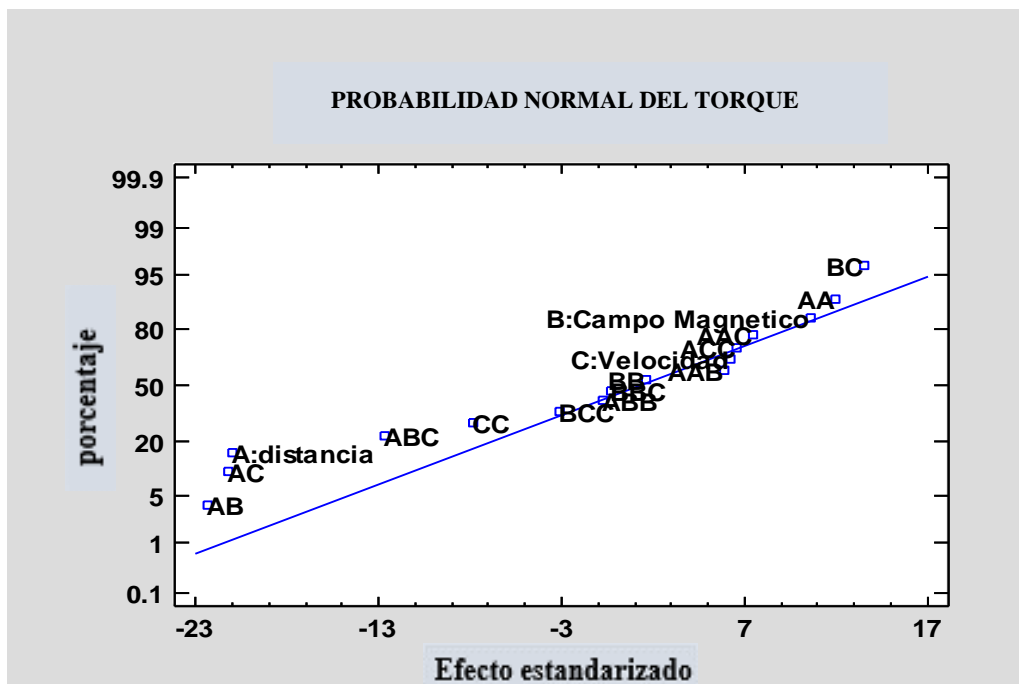


Figura 41. Probabilidad normal de torque
Fuente: Elaboración propia

CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

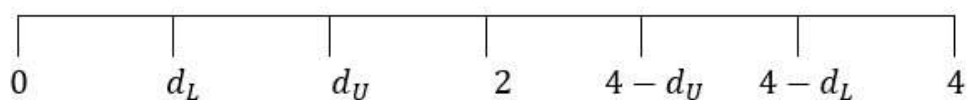
Prueba de hipótesis general

H1: Es posible lograr el diseño de un sistema de embrague basado en los principios de la ley de Faraday-Lenz para la transmisión de torque en vehículos.

H0: No es posible lograr el diseño de un sistema de embrague basado en los principios de la ley de Faraday-Lenz para la transmisión de torque en vehículos.

El valor de R^2 (coeficiente de correlación) es de 98,25 % el cual tiene una significancia sobre los resultados de las medidas obtenidas en las distintas pruebas que son adecuadas para los datos.

Según la estadística Durbin-Watson tenemos una serie de condiciones que nos permite aceptar o rechazar la hipótesis nula (H_0).



Si $0 \leq DW < d_L \rightarrow$ Rechazamos H_0

Si $d_L < DW < d_U \rightarrow$ Test no concluyente

Si $d_U < DW < 4 - d_U \rightarrow$ No existe autocorrelación de primer orden

Si $4 - d_U < DW < 4 - d_L \rightarrow$ Test no concluyente

Si $4 - d_L < DW \leq 4 \rightarrow$ No tenemos suficientes evidencias significativas para rechazar H_0

Donde d_L y d_U son los límites inferior y superior respectivamente, cuyos valores depende de la cantidad de pruebas realizadas y de la cantidad de variables independientes estudiadas, estos valores se pueden tabular utilizando los datos de la tabla adjunto en el anexo 1. Para un número de pruebas de 27 y 3 variables independientes tenemos $d_L = 1,16$ y $d_U = 1,65$.

De acuerdo a los datos obtenidos del análisis estadístico tenemos $DW = 0,6218$ haciendo uso de las condiciones del estadístico Durbin-Watson, estamos en la condición de rechazar la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

Prueba de hipótesis específicos

Hipótesis específica 1

H₁: Es realizable determinar la relación entre la distancia de separación y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

H₀: No es realizable determinar la relación entre la distancia de separación y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

El valor de P sobre la distribución estadística de Fisher-Snedecor (F) es de: $P < 0,0001$ siendo altamente significativo para un alfa 0,05, por lo que se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 .

En virtud a la estadística determinada hay bastante certeza sobre las medidas realizadas con respecto de la variable distancia de separación sobre el torque.

Hipótesis específica 2

H₁: Es probable determinar la relación entre la intensidad del campo magnético y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

Ho: No es probable determinar la relación entre la intensidad del campo magnético y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

El valor de P sobre la distribución estadística de Fisher-Snedecor (F) es de: $P < 0,0001$ siendo altamente significativo para un alfa 0,05, por lo que se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 .

En virtud a la estadística determinada hay bastante certeza sobre las medidas realizadas con respecto de la variable intensidad del campo magnético sobre el torque.

Hipótesis específica 3

H1: Es presumible determinar la relación entre la velocidad de transmisión y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

Ho: No es presumible determinar la relación entre la velocidad de transmisión y el torque transmitido mediante el proceso electromagnético.

El valor de P sobre la distribución estadística de Fisher-Snedecor (F) es de: $P < 0,0001$ siendo altamente significativo para un alfa 0,05, por lo que se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 .

En virtud a la estadística determinada hay bastante certeza sobre las medidas realizadas con respecto de la variable de velocidad de transmisión sobre el torque.

4.1.3 Consideraciones de diseño

Existen diferentes tipos de motores de combustión interna cada una con diferentes características como potencia, torque, rango de rpm de funcionamiento. De acuerdo a nuestros objetivos se considera en la Figura 42 el torque máximo y mínimo que entrega un motor de combustión interna dependiendo de la potencia y del rango de rpm en el que funcionan.

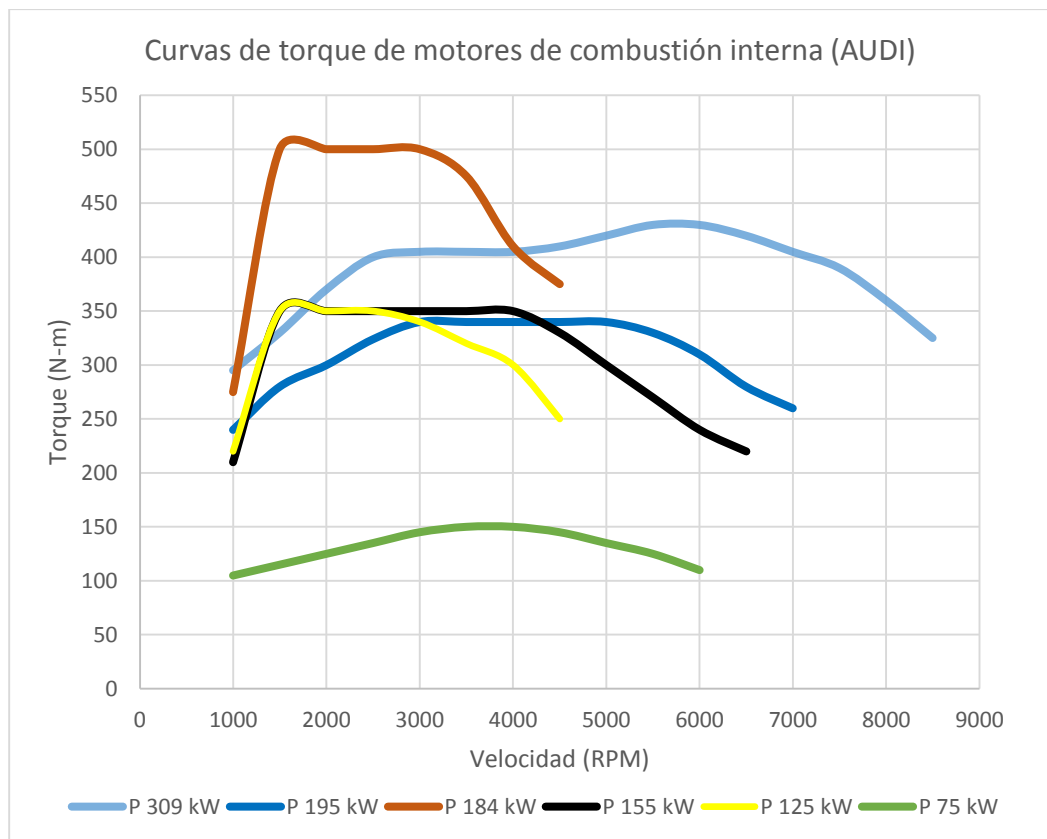


Figura 42. Curva de torque de motores AUDI para diferentes potencias
Fuente: Motores AUDI

Para el diseño del sistema de embrague se tomará como dato un torque máximo de 500 N-m, de esta manera se abarca un rango de diferentes motores en el que se puede implementar el diseño.

Considerando los datos obtenidos y los valores de funcionamiento de los motores analizados en la Figura 42 se hace una propuesta de diseño que contemple el control de las variables estudiadas. Los análisis de los componentes se efectúan aplicando un estudio por elementos finitos a las principales partes del diseño cuyos planos se adjuntan en los anexos del presente trabajo.

4.1.4 Análisis de diseño

Basado en los datos obtenidos del proceso experimental y según las necesidades de funcionamiento, se propone el diseño de un embrague magnético como muestra la Figura 43, basado en los datos obtenidos. Sabemos que, para el proceso electromagnético es indispensable una velocidad relativa, por esta razón el diseño del embrague propuesto trabaja en dos etapas, en la primera etapa se utiliza el proceso electromagnético para transmitir hasta aproximadamente un 90 % del par-motor y la segunda etapa permite la transmisión del 100 % del par-motor.

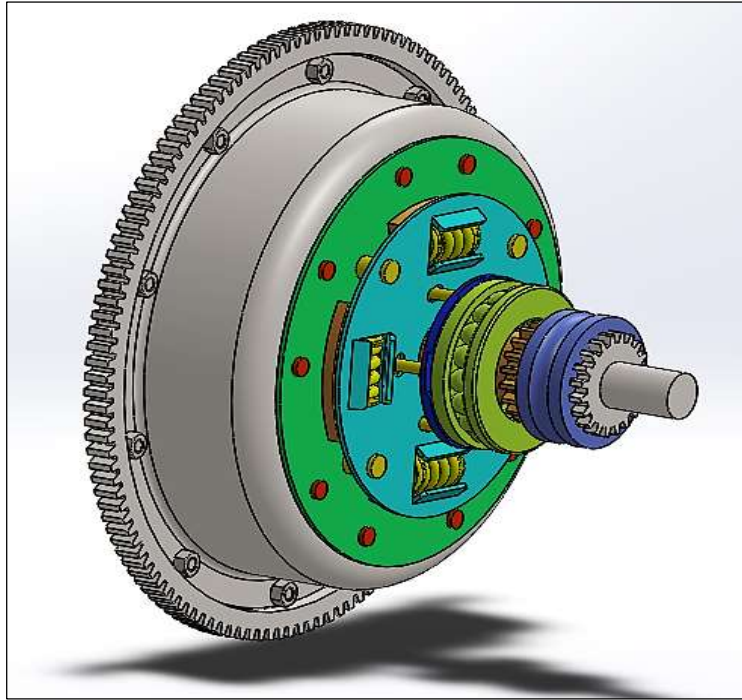


Figura 43. Embrague magnético
Fuente: Elaboración propia

Primera etapa: Ya sea durante el desacople o acople del par transmitido interviene el proceso electromagnético, donde según la Figura 44, el proceso de transmisión se logra a través de (1) volante de inercia; este elemento se conecta directamente al eje de salida del motor y a través de pernos este transmite el torque al plato presor (2), dentro del plato presor se encuentra montado el soporte de imanes que a través de muelles se encuentra normalmente acoplado (3), entre los imanes y el disco de aluminio existe una separación mínima de aproximadamente 0.5 mm, (4) a través del proceso electromagnético el torque es transmitido hacia el disco de aluminio que está fijo a través de pernos al eje que conecta a la caja de

cambios (5). La distancia de separación entre el disco de aluminio y los imanes son controlados mediante palancas que se accionan por el pedal que controla el conductor (6).

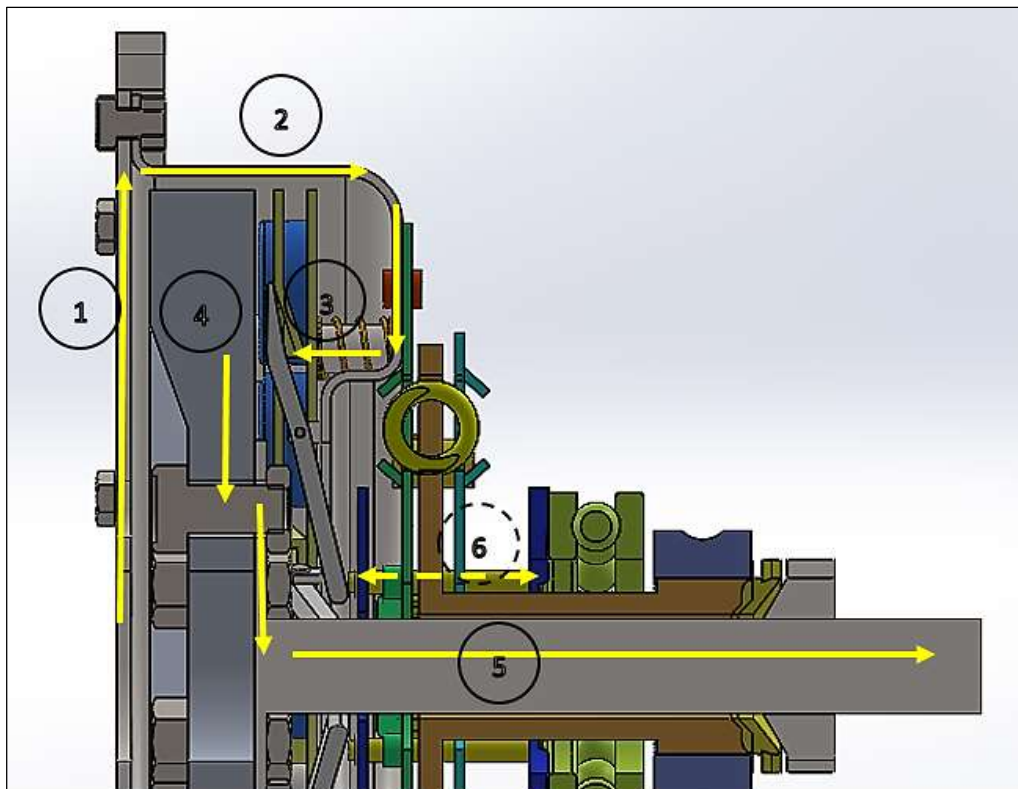


Figura 44. Primera fase, transmisión de torque hasta un 90 %
Fuente: Elaboración propia

Segunda etapa: Debido a que el sistema electromagnético no logra transmitir el 100 % del par-motor es indispensable implementar un mecanismo que complete el proceso, en la Figura 45 se muestra la manera en que se completa el proceso de transmisión del 100 % del torque. Mediante el volante de inercia (1) se logra

transmitir el par hasta el plato presor (2), donde a través de remaches se logra unir dos discos uno fijo y el otro separado a cierta distancia con el fin de alojar los muelles (3), entre los discos antes mencionados se encuentra un disco intermedio que transmite el torque mediante los muelles (4) cuyo fin es amortiguar las fluctuaciones del motor, el disco intermedio se conecta a través de unos engranajes (6) al eje que conecta a la caja de cambios (7), de esta manera se logra transmitir el 100 % del torque del motor.

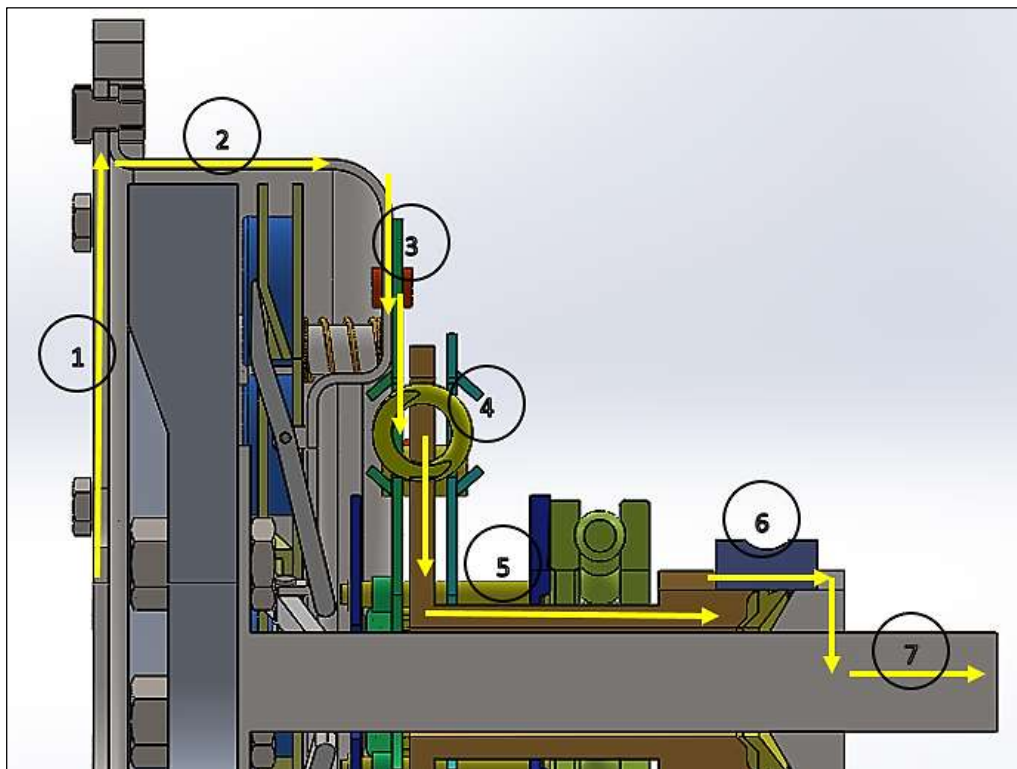


Figura 45. Segunda fase, transmisión de torque del 100 %
Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Comparativa de características de diferentes embragues

Considerando que el embrague a fricción y el embrague hidráulico son los comúnmente utilizados, además, teniendo en cuenta las principales características en cuanto a su funcionamiento, mantenimiento, costos de manufactura, en la Tabla 9 se realiza un análisis y comparación respectivos, donde se estiman algunos valores para el embrague magnético en base a la observación.

Tabla 9

Cuadro comparativo de las principales características de embragues bajo condiciones de trabajo en vehículos de transporte urbano

CARACTERÍSTICAS	EMBRAGUE A FRICCIÓN	EMBRAGUE HIDRÁULICO	EMBRAGUE MAGNÉTICO
Proceso de transmisión	Fricción mecánica	Fuerza hidrodinámica	Fuerza electromagnética
Vida útil	300 000 km	Igual al del vehículo.	Sin determinar
Costos de mantenimiento	S/. 650	S/. 2 000	Bajo
Frecuencia de mantenimiento	4 meses	30 000 Km	Sin determinar
Costo de manufactura	1 200	2 500	1 500
Consumo de combustible	Normal	Alto	Normal
Comportamiento en proceso de acople y desacople	Brusca	Suave	Suave

Fuente: Elaboración propia

Según la Tabla 9 se puede afirmar que el comportamiento que se logró con el embrague magnético es similar al comportamiento de un embrague hidráulico, donde el acoplamiento entre ejes es de manera progresiva o suave. Además, debido a que la arquitectura del embrague magnético es similar a un embrague a fricción no presenta un consumo adicional de combustible en comparación con el embrague

hidráulico. En cuanto a los costos de mantenimiento podemos afirmar que son inferiores a los demás sistemas. Sin embargo, el costo de manufactura está en la media de ambos debido a que en el embrague magnético es indispensable una fuente de campo magnético cuyo costo es elevado. En cuanto a la vida útil del embrague magnético se puede deducir que sería equivalente a la vida útil del vehículo al que se le instale.

4.2 DISCUSIÓN

Para determinar el origen de las fuerzas estudiadas se recurre a la ley de Lorentz que establece que, si una partícula cargada atraviesa un campo magnético a una velocidad determinada, esta partícula experimentará una fuerza cuya magnitud y dirección depende de la magnitud de la carga, velocidad a la que se mueve y campo magnético. Para el presente trabajo, se considera los electrones de valencia como partículas cargadas, además, se analizó para diferentes puntos entre la intersección del campo magnético y el material paramagnético el comportamiento de la fuerza de Lorentz, lo que llevó al resultado obtenido en la Figura 35 obteniendo como resultado dos vórtices o torbellinos de electrones situados delante y posterior del campo magnético intersecado al disco de aluminio, que a su vez estos vórtices son los que producen el campo magnético de igual polaridad en el primer vórtice y de diferente polaridad en el último vórtice.

De la Figura 40 se deduce la relación entre la variable torque y las variables independientes, donde se aprecia que el torque transmitido se incrementa a medida que se disminuye la distancia de separación, por el contrario, solo se obtiene el incremento en el torque si se incrementan los valores de campo magnético y velocidad relativa. Como observación adicional en el proceso experimental se observó que existe una gran diferencia en los valores obtenidos al alternar la polaridad de los imanes y ponerlos en una sola dirección; sin embargo, el comportamiento en ambos casos es el mismo, de la Figura 46 se puede deducir que

al alternar la polaridad magnética de los imanes, los vórtices de electrones formados en el disco de aluminio, entre un imán y otro, están con sentidos de giro opuestos, esto hace que disminuya el espacio donde se forman normalmente los vórtices de electrones, incrementado considerablemente su velocidad angular. Con este incremento también aumenta la intensidad del campo magnético generado, de esta manera se logra incrementar la **distancia de interacción expuesta en la¿?**

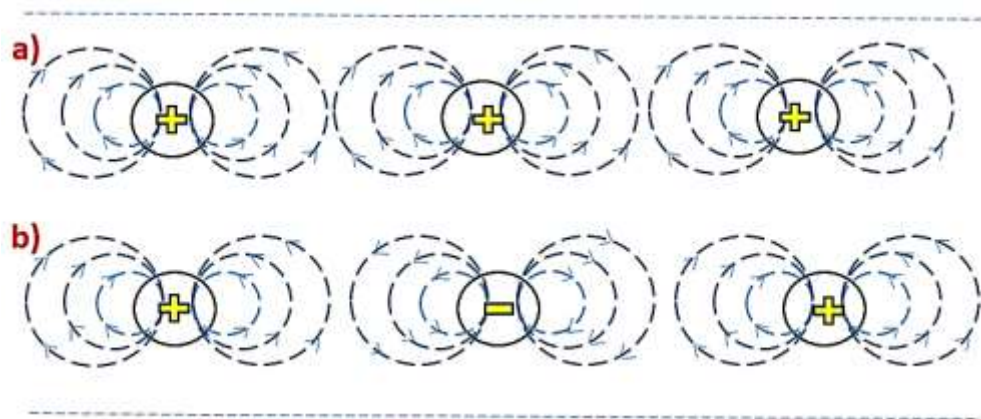


Figura 46. Campos magnéticos ordenados de manera diferente a) campo magnético unidireccional b) campo magnético alternado
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura 40 se ha comprobado la afirmación de (Gallo, 2013) donde supone que la fuerza generada se podría incrementar con imanes de neodimio, además afirma que las tensiones y corrientes inducidas en el disco de cobre son proporcionales a la velocidad relativa entre los imanes y el disco.

El proceso electromagnético se debe al movimiento de electrones o la corriente que circula dentro del material. El proceso estudiado es básicamente el

aprovechamiento de las corrientes inducidas o corrientes parásitas que se quiere evitar en un transformador para disminuir la pérdida de energía en forma de calor. Durante el proceso experimental se observó un ligero incremento de la temperatura en el disco de aluminio, sin embargo, en este trabajo no se consideró como una de las principales variables que influyen en la determinación del torque. Este hecho concuerda con lo que afirma (Gallo, 2013) acerca del incremento de temperatura.

Para tener un diseño funcional de un embrague magnético los principales componentes para la transmisión de par-motor son; una fuente de campo magnético (imanes de neodimio) y un material paramagnético (disco de aluminio), y para el dimensionamiento de estos se hace uso de la ecuación 13 donde a una distancia de 5 mm, para un campo magnético de 3,7 teslas y una velocidad relativa de 3 000 rpm se tiene un torque de 130 N-m. según la curva de torque de motores AUDI presentados en la Figura 42 este valor es suficiente para un motor de 75 Kw. Según (Gallo, 2013) la variación de la potencia transmitida se lograría acercando o alejando el disco de cobre de los imanes, además, de acuerdo a los datos obtenidos en la Figura 40 sabemos que incrementando o disminuyendo la distancia de separación se logra un buen control del torque transmitido.

El estudio presenta limitaciones debido a la falta y disponibilidad de materiales e instrumentos de calidad, motor de alta potencia cercana a los motores de combustión interna para poder obtener y calcular las dimensiones adecuadas para un embrague magnético funcional.

CONCLUSIONES

Según la experiencia realizada se logró diseñar un sistema de embrague utilizando principios electromagnéticos para la transmisión de torque, con una intervención de aproximadamente 90 % en el proceso.

Si la distancia de separación supera los 25 mm, la magnitud del torque transmitido disminuye hasta aproximadamente el 90 %, lo que indica que sería necesario un mínimo de 25 mm para lograr la desconexión de transmisión de torque.

El sistema planteado llega a transmitir un máximo de 90 % del torque, debido a que es indispensable una velocidad relativa de aproximadamente 120 rpm para generar los vórtices electromagnéticos dentro del disco de aluminio, lo que hace necesario la implementación de un mecanismo complementario que complete el proceso y pueda transmitir el 100 % del torque.

Según la manera en que se ordenen la polaridad de los campos magnéticos, varía considerablemente la magnitud de la fuerza generada, esta variación se debe a que en el proceso electromagnético el sentido de giro de los vórtices depende de la polaridad del campo magnético con la que interactúan los electrones de valencia del material.

Sabiendo que el campo magnético de un imán tiene 2 polos, además considerando lo que se logró demostrar sobre la manera en que el orden de estos afecta a la fuerza

generada. Sería una buena opción aprovechar ambos lados del campo magnético para incrementar la eficiencia del mecanismo.

De acuerdo al comportamiento en el proceso de transmisión, el diseño propuesto tiene una analogía con el convertidor de par o embrague hidráulico ya que ambos necesitan un sistema o mecanismo que permita completar el proceso y lograr transmitir el 100 % de la potencia del motor.

Para la transmisión de torque en motores de alta potencia sería necesario implementar un embrague magnético con 2 o más etapas o capas similar a embragues de dos o más discos.

RECOMENDACIONES

En el proceso experimental no se consideró la temperatura como una variable principal; sin embargo, se apreció un ligero incremento de temperatura en el disco de aluminio lo que en un proceso de funcionamiento continuo de un vehículo llevaría a incrementarse considerablemente, por este motivo, se sugiere determinar la dependencia e implementar un sistema de refrigeración forzada para un rango óptimo de funcionamiento.

Para obtener datos más precisos se sugiere elaborar un prototipo e implantar en un vehículo de menor potencia (VW escarabajo) o utilizar motores eléctricos de aproximadamente 20 a 30 hp.

Para comparar la bondad de los datos en los hallazgos obtenidos en esta experiencia se sugiere calcular a nivel atómico la relación de todas las variables estudiadas desde un punto de vista de física aplicada.

Para determinar el material más óptimo considerando costos y disponibilidad, se sugiere hacer pruebas con diferentes materiales paramagnéticos o diamagnéticos tales como; cobre, plata, estaño, cinc, platino, titanio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

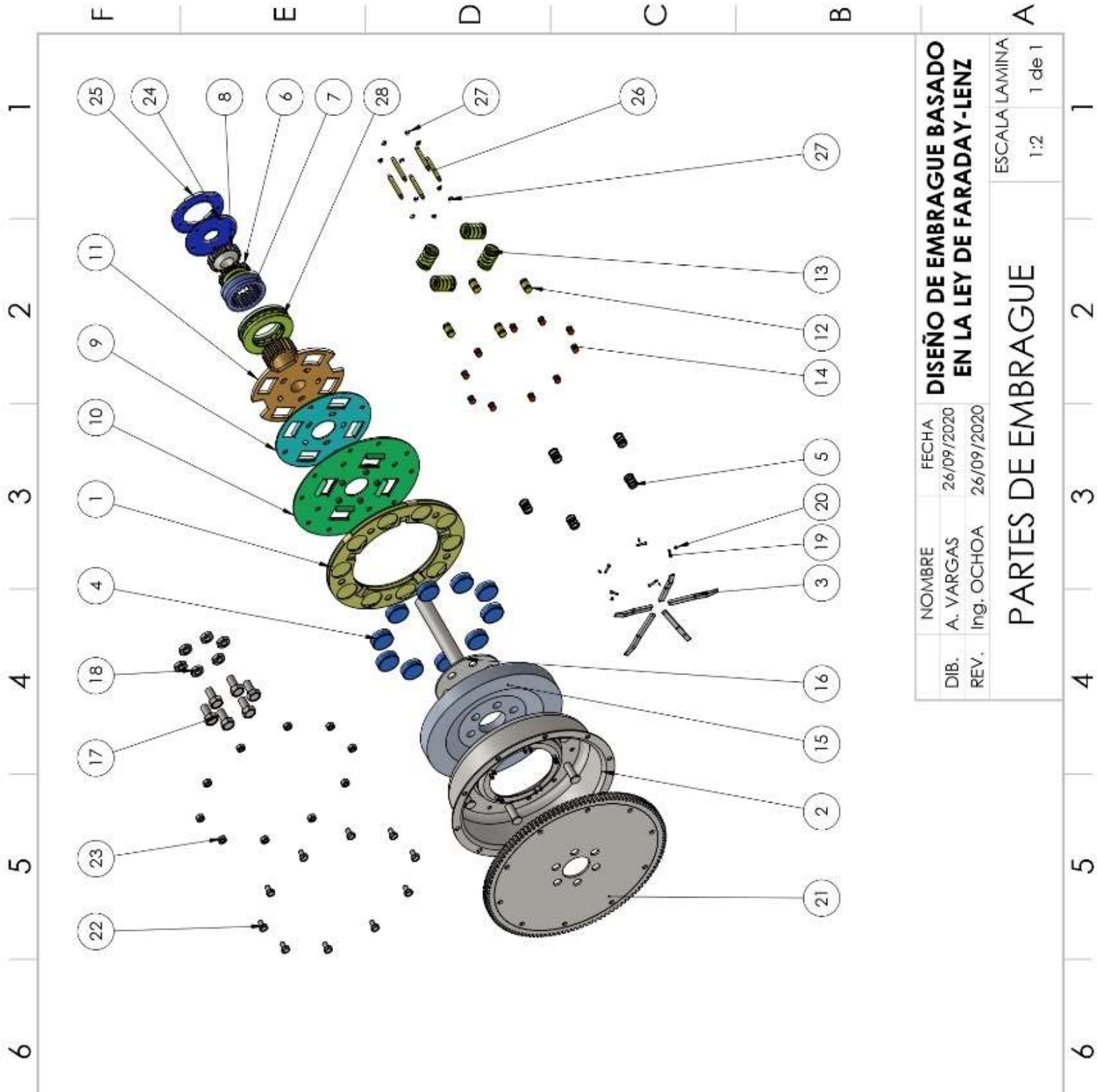
1. Ashby y Jones. (2015). *Materiales para Ingeniería I*. Uk: Reverte.
2. Askeland , D., Fulay, P. y Wright, W. (2011). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. México: Cengage Learning.
3. Barco Ríos, H., Rojas Calderón, E. y Restrepo Parra, E. (2012). *Física principios de electricidad y magnetismo*. Colombia: U. Manizales Colombia.
4. Bernardo Garcia , O. (2006). *Fundamentos de Electromagnetismo*. U. Granada: Universidad de Granada.
5. Camacho, J. y Sosa, V. (2013). *Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry*. Revista mexicana de física. pp. 8-17.
6. Celigüeta Lizarza, J. T. (2011). *Método de los Elementos Finitos para análisis estructural*. San Sebastián: Tecnun.
7. Cordero S., P. (2017). *Electromagnetismo*. Chile: Editorial Universitaria.
8. Edminister, J. (2000). *Electromagnetismo*. Mc Graw Hill.
9. Estela Raffino, M. (2019). *Concepto.de*. Obtenido de Concepto.de: <https://concepto.de/campo-magnetico/> (02 de abril de 2019).
10. Gallo, O. (2013). *Acoplamiento de alto deslizamiento con imanes anulares para prueba de motores eléctricos*. Ciencia, docencia y tecnología. pp. 231-248.
11. Garcia Russi, L. y Trigos Guevara, W. (2014). *Electromagnetismo*. Santander: S/E.
12. H. Hayt, W. y A. Buck, J. (2007). *Teoría Electromagnética*. México: Mc Graw-Hill.
13. Hall, A. S., Holowenko, A. R. y Laughlin, H. G. (1971). *Diseño de Máquinas*. Colombia: McGraw-hill.
14. Hamrock, B., Jacobson, B. y Schmid, S. (1999). *Elementos de Máquina*. México: McGraw-Hill.
15. Hurtado Gomez, J. E. (2002). *Introducción al Análisis Estructural por Elementos Finitos*. Colombia.
16. K. Cheng, D. (1998). *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*. México: Pearson Education.

17. Marin Garcia, J. (2006). *Apuntes de Diseño de Máquinas*. Club Universitario.
18. Norton, R. (1995). *Diseño de Máquinas*. Pearson.
19. Shigley, J. y Mitchell, L. (1985). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: Impresores y Editores S.A.
20. Smith, W. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Florida: Mc Grau Hill.
21. Taylor, R. L. y Zienkiewicz, O. C. (1994). *El Método de los Elementos Finitos*. Barcelona: McGraw-Hill.
22. Wangsness, R. (2001). *Campos Electromagnéticos*. México: Editorial Limusa.

ANEXO 1: LÍMITES DURBIN-WATSON

$\alpha = .05$										
	k = 1		k = 2		k = 3		k = 4		k = 5	
n	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU
6	0.61	1.4								
7	0.7	1.36	0.47	1.9						
8	0.76	1.33	0.56	1.78	0.37	2.29				
9	0.82	1.32	0.63	1.7	0.46	2.13	0.3	2.59		
10	0.88	1.32	0.7	1.64	0.53	2.02	0.38	2.41	0.24	2.82
11	0.93	1.32	0.66	1.6	0.6	1.93	0.44	2.28	0.32	2.65
12	0.97	1.33	0.81	1.58	0.66	1.86	0.51	2.18	0.38	2.51
13	1.01	1.34	0.86	1.56	0.72	1.82	0.57	2.09	0.45	2.39
14	1.05	1.35	0.91	1.55	0.77	1.78	0.63	2.03	0.51	2.3
15	1.08	1.36	0.95	1.54	0.82	1.75	0.69	1.97	0.56	2.21
16	1.1	1.37	0.98	1.54	0.86	1.73	0.74	1.93	0.62	2.15
17	1.13	1.38	1.02	1.54	0.9	1.71	0.78	1.9	0.67	2.1
18	1.16	1.39	1.05	1.53	0.93	1.69	0.92	1.87	0.71	2.06
19	1.18	1.4	1.08	1.53	0.97	1.68	0.86	1.85	0.75	2.02
20	1.2	1.41	1.1	1.54	1	1.68	0.9	1.83	0.79	1.99
21	1.22	1.42	1.13	1.54	1.03	1.67	0.93	1.81	0.83	1.96
22	1.24	1.43	1.15	1.54	1.05	1.66	0.96	1.8	0.96	1.94
23	1.26	1.44	1.17	1.54	1.08	1.66	0.99	1.79	0.9	1.92
24	1.27	1.45	1.19	1.55	1.1	1.66	1.01	1.78	0.93	1.9
25	1.29	1.45	1.21	1.55	1.12	1.66	1.04	1.77	0.95	1.89
26	1.3	1.46	1.22	1.55	1.14	1.65	1.06	1.76	0.98	1.88
27	1.32	1.47	1.24	1.56	1.16	1.65	1.08	1.76	1.01	1.86
28	1.33	1.48	1.26	1.56	1.18	1.65	1.1	1.75	1.03	1.85
29	1.34	1.48	1.27	1.56	1.2	1.65	1.12	1.74	1.05	1.84
30	1.35	1.49	1.28	1.57	1.21	1.65	1.14	1.74	1.07	1.83
31	1.36	1.5	1.3	1.57	1.23	1.65	1.16	1.74	1.09	1.83
32	1.37	1.5	1.31	1.57	1.24	1.65	1.18	1.73	1.11	1.82
33	1.38	1.51	1.32	1.58	1.26	1.65	1.19	1.73	1.13	1.81
34	1.39	1.51	1.33	1.58	1.27	1.65	1.21	1.73	1.15	1.81
35	1.4	1.52	1.34	1.58	1.28	1.65	1.22	1.73	1.16	1.8

ANEXO 2: PLANOS



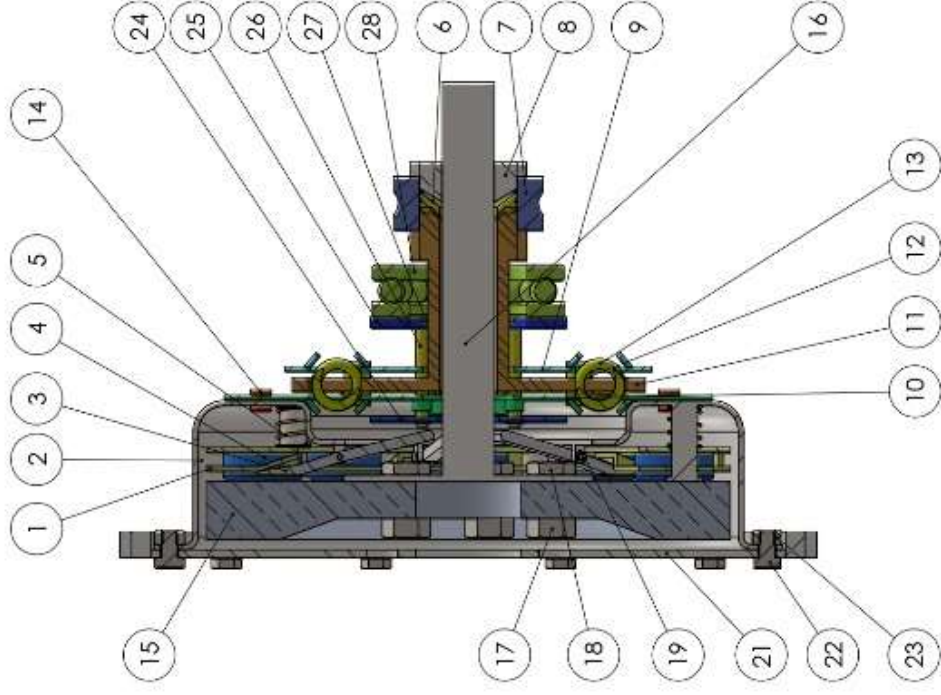
N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	CANTIDAD
1	soporte de imanes	1
2	plato presor	1
3	palanca de control de separación	5
4	imanes de neodimio N50	10
5	resorte de empuje	5
6	anillo sincronizador	1
7	conector 100	1
8	engrane fijo	1
9	rondana lateral	1
10	rondana de contacto	1
11	maza & engranaje 100	1
12	perno tope	4
13	resorte principal	4
14	remache plat-rondana	10
15	disco de aluminio	1
16	eje de conexión - caja de cambios	1
17	B18.6.7M - M10 x 1.5 x 20 Indented HHMS --	6
18	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M10 x 1.5, with 1.6mm WAF -D-N	6
19	pasador	5
20	B27.7M - 3CM1-2	5
21	volante de inercia	1
22	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M6 x 1.0 x 10 -10WN	10
23	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M6 x 1 -D-N	10
24	disco de contacto empuje	1
25	disco de contacto rodamiento	1
26	perno tope - control	5
27	B27.8M - 3FM1-5	10
28	rodamiento de presión	1

DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ	
NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

PARTES DE EMBRAGUE

ESCALA LAMINA 1:2 1 de 1

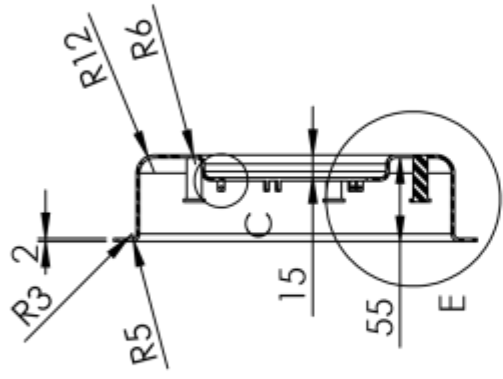
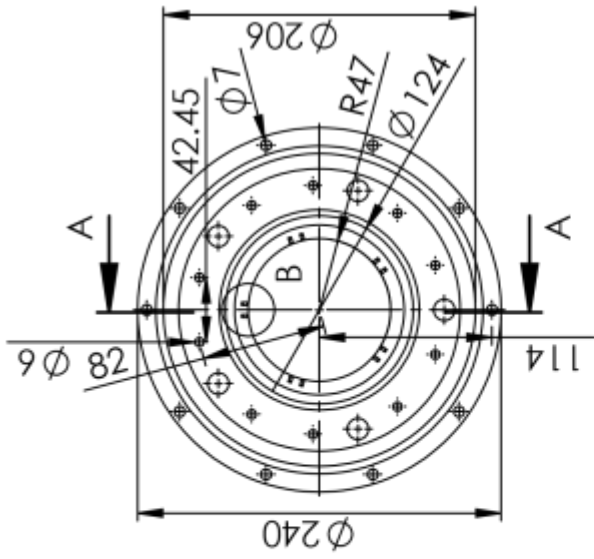
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	soporte de imanes	1
2	plato presor	1
3	palanca de control de separación	5
4	imanes de neodimio N50	10
5	resorte de empuje	5
6	anillo sincronizador	1
7	conector 100	1
8	engrane fijo	1
9	rondana lateral	1
10	rondana de contacto	1
11	maza & engranaje 100	1
12	perno tope	4
13	resorte principal	4
14	remache plat-rondana	10
15	disco de aluminio	1
16	eje de conexión - caja de cambios	1
17	B18.67M - M10 x 1.5 x 20 Indented HHMS -- 20N	6
18	B18.2.4.5M - Hex Jam nut, M10 x 1.5, with 16mm WAF --D-N	6
19	pasador	5
20	B27.7M - 3CM1-2	5
21	volante de inercia	1
22	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M6 x 1.0 x 10 --10WN	10
23	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M6 x 1 --D-N	10
24	disco de contacto empuje	1
25	disco de contacto rodamiento	1
26	perno tope - control	5
27	B27.8M - 3FM1-5	10
28	AFBMA 24.1.5 - 45TA12 - Full/DE.NC.Full_68	1



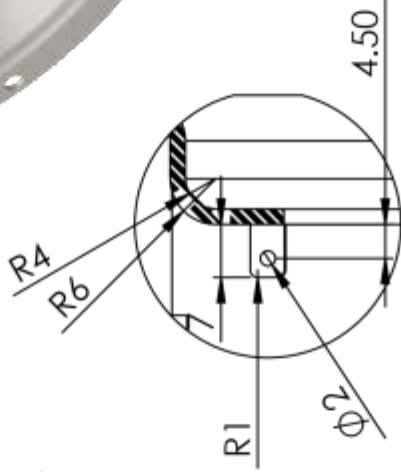
DIB.	NOMBRE	FECHA	DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY - LENZ
REV.	A. VARGAS	26/09/2020	
	Ing. OCHOA	26/09/2020	

ENSAMBLAJE GENERAL

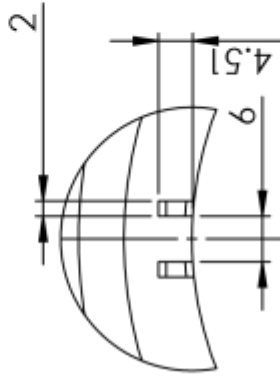
ESCALA LAMINA
1:2
1 de 1



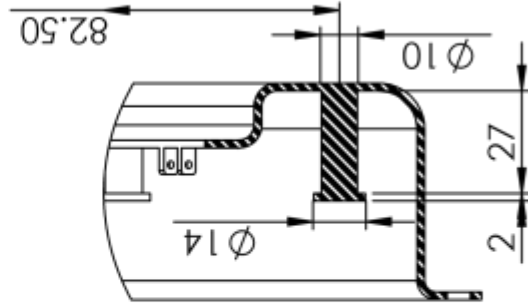
SECCIÓN A-A



DETALLE C
ESCALA 1:1



DETALLE B
ESCALA 1:1



DETALLE E
ESCALA 1:2

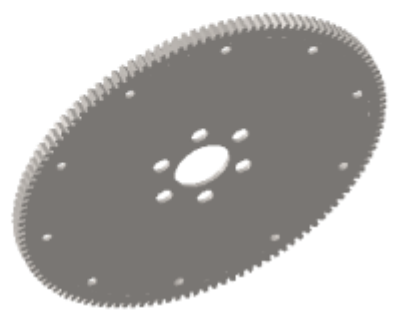
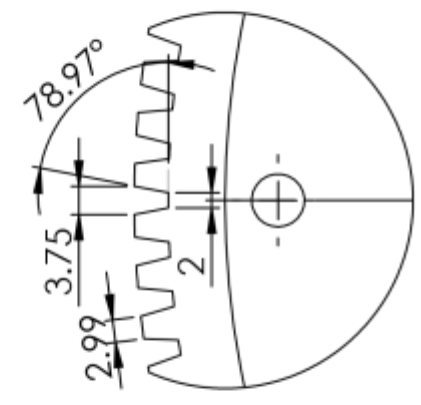
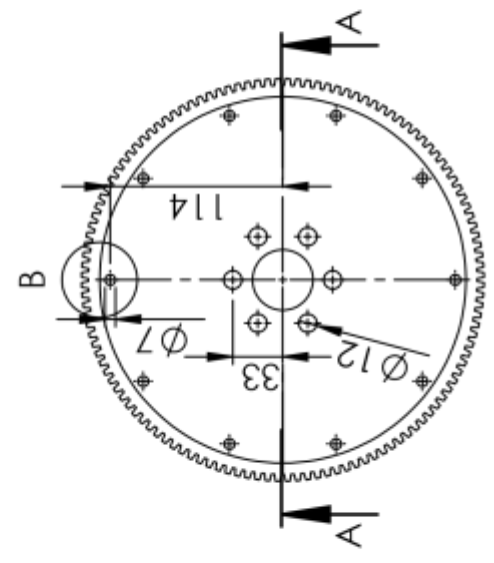


**DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO
EN LA LEY DE FARADAY - LENZ**

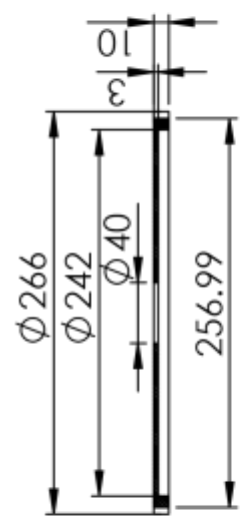
NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

PLATO PRESOR

ESCALA	LAMINA
1:5	1 de 1

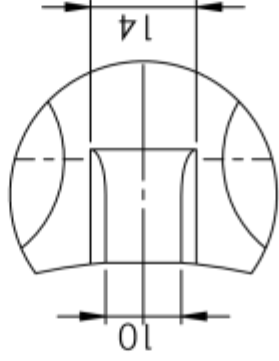
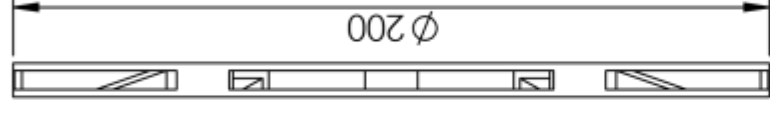
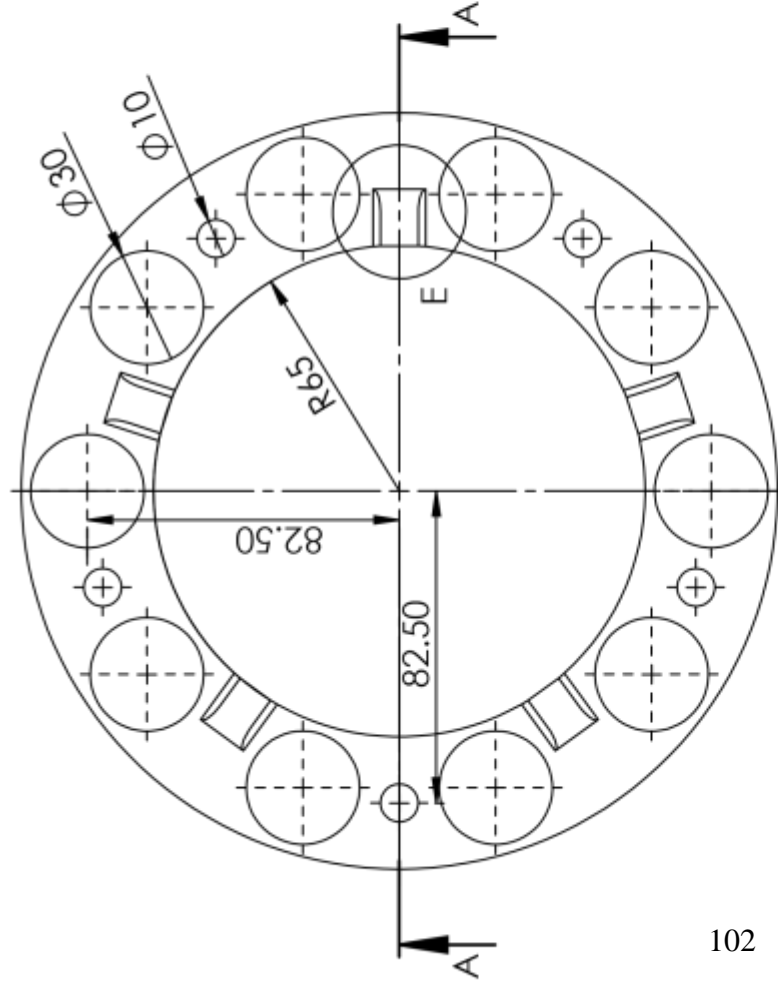


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

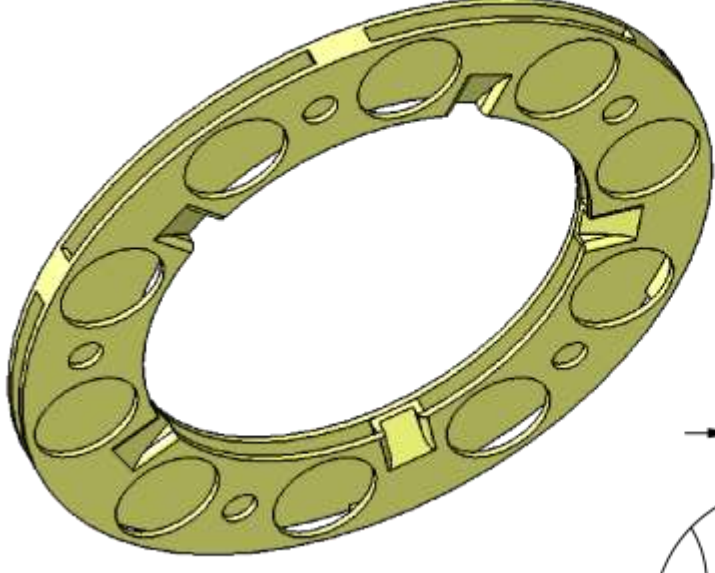


SECCIÓN A-A

DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ		ESCALA LAMINA	
NOMBRE	FECHA	1:5	1 de 1
DIB. A. VARGAS	26/09/2020		
REV. Ing. OCHOA	26/09/2020		
VOLANTE DE INERCIA		ESCALA LAMINA	
		1:5 1 de 1	



DETALLE E
ESCALA 1:1

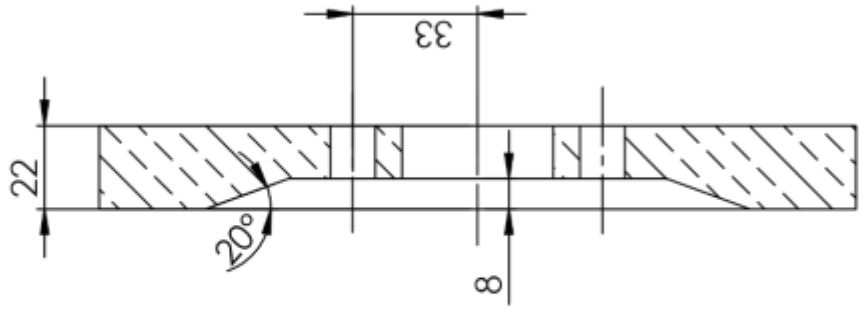
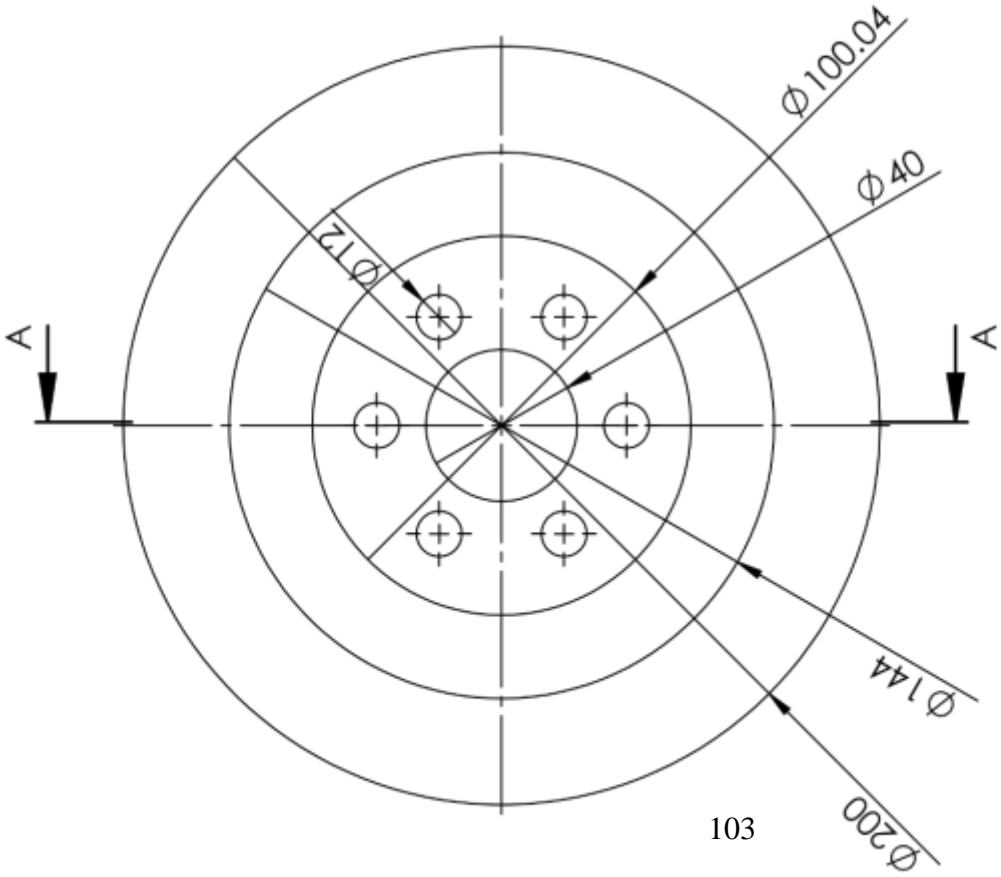


NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

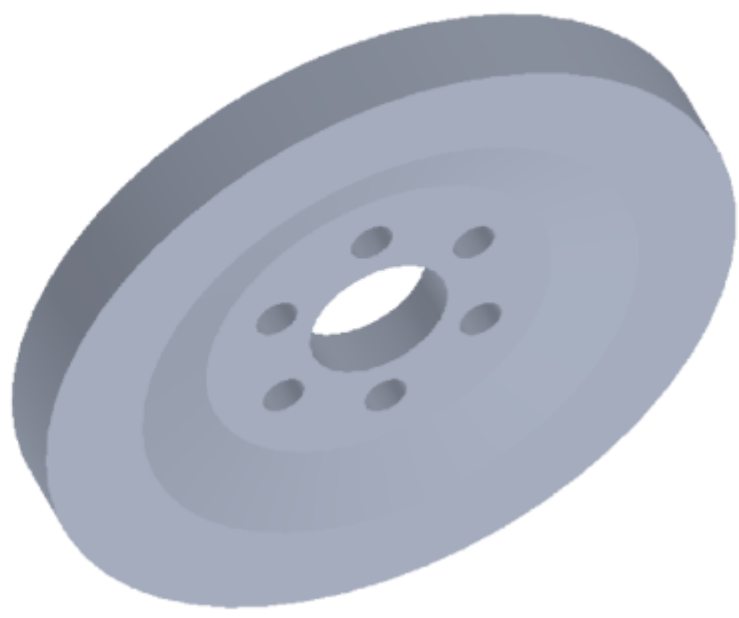
DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ

ESCALA LAMINA
1:2 1 de 1

SOPORTE DE IMANES



SECCIÓN A-A
ESCALA 1:2



**DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO
EN LA LEY DE FARADAY-LENZ**

NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

ESCALA LAMINA
1:2 1 de 1

DISCO DE ALUMINIO

A

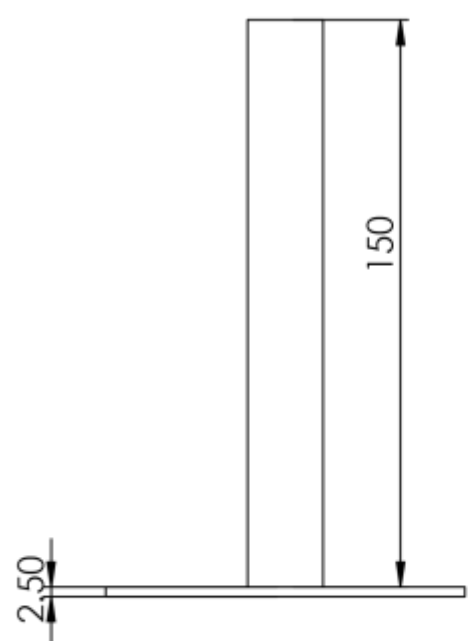
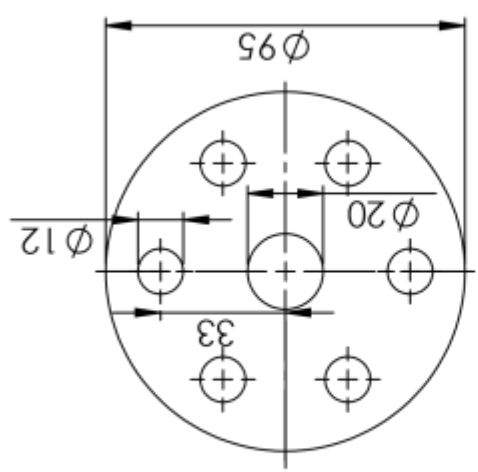
1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6

D

C

B

A

1
2
3
4
5
6

**DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO
EN LA LEY DE FARADAY-LENZ**

NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

ESCALA LAMINA
1:2 1 de 1

EJE DE CONECCION

1
2
3
4
5
6

D

C

B

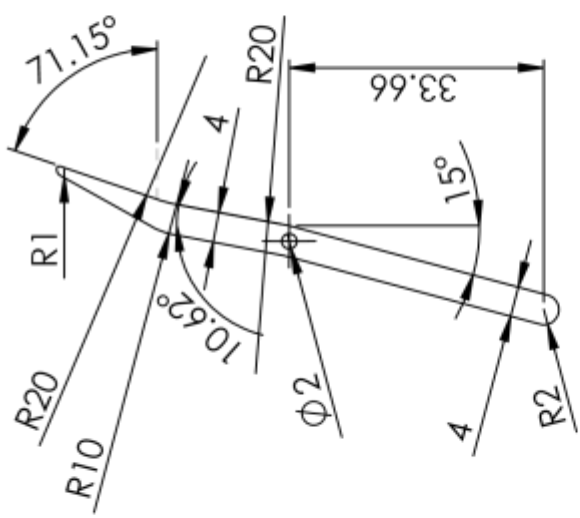
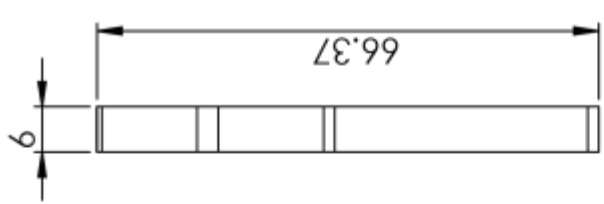
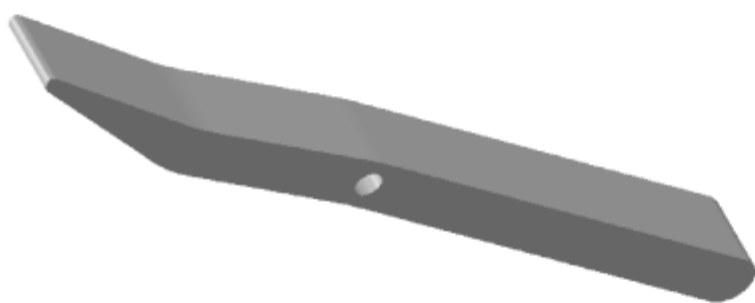
A

D

C

B

A

1
2
3
4
5
6

DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ		NOMBRE	FECHA
DIB.	A. VARGAS		26/09/2020
REV.	Ing. OCHOA		26/09/2020

PALANCA DE CONTROL		ESCALA LAMINA	
		1:1	1 de 1

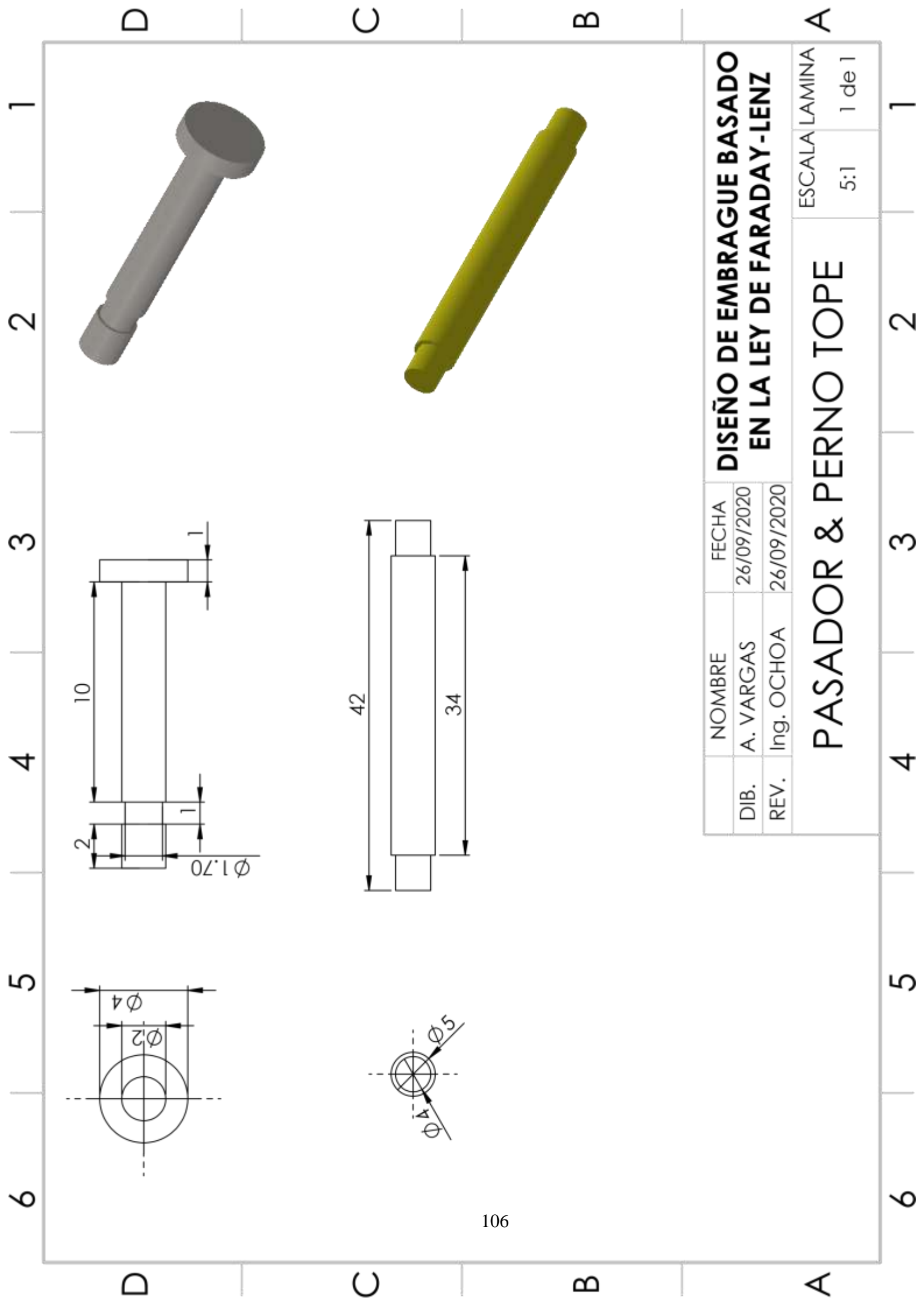
1
2
3
4
5
6

D

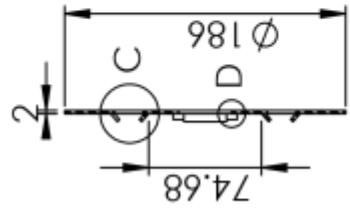
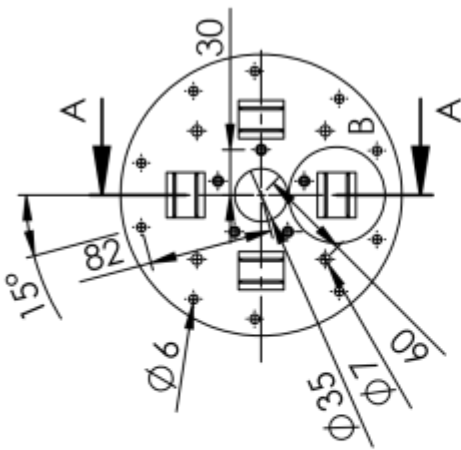
C

B

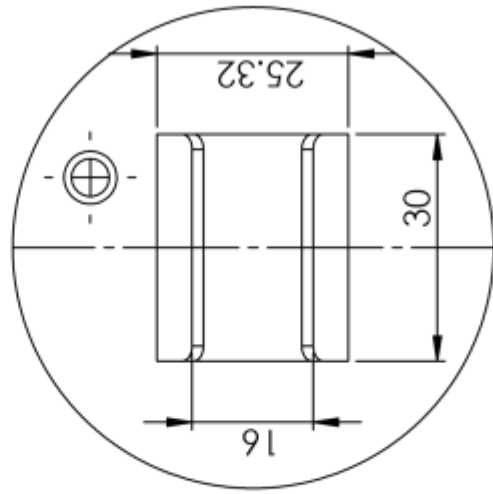
A



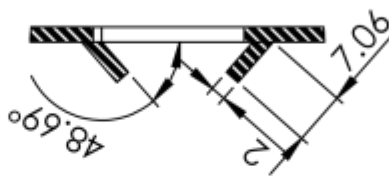
NOMBRE		FECHA	
A. VARGAS		26/09/2020	
REV.		Ing. OCHOA	
		26/09/2020	
DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY - LENZ			
PASADOR & PERNO TOPE		ESCALA LAMINA	
		5:1	
		1 de 1	



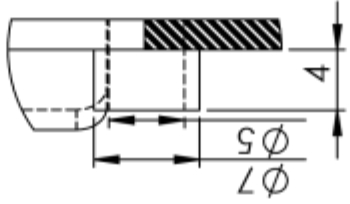
SECCIÓN A-A
ESCALA 1:5



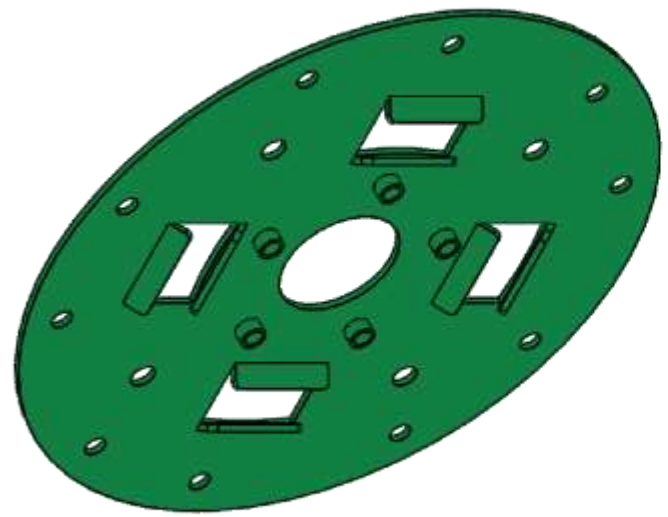
DETALLE B
ESCALA 1:1



DETALLE C
ESCALA 1:1



DETALLE D
ESCALA 2:1

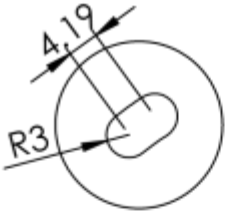
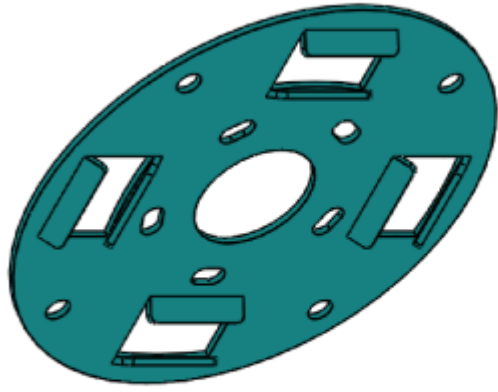


DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ

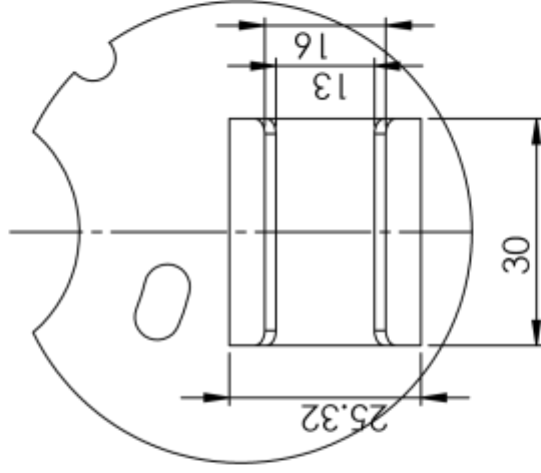
NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

ESCALA LAMINA
1:5
1 de 1

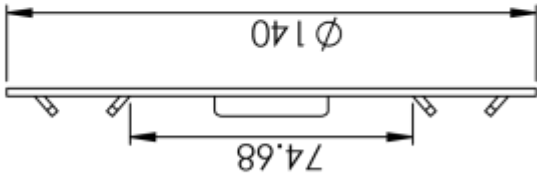
RONDANA DE CONTACTO



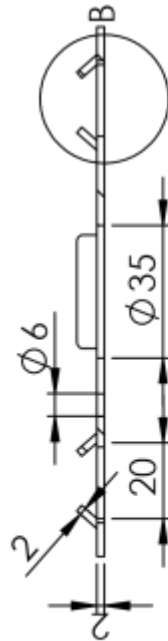
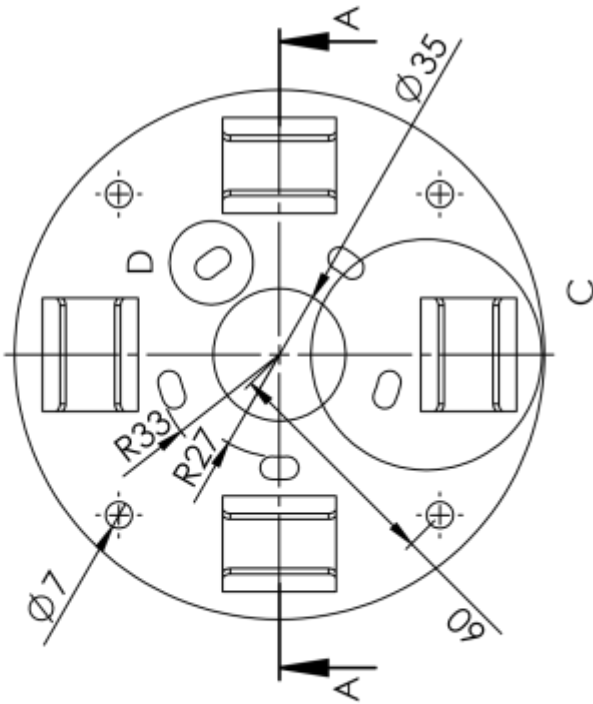
DETALLE D
ESCALA 1:1



DETALLE C
ESCALA 1:1



DETALLE B
ESCALA 1:1



SECCIÓN A-A

DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY - LENZ		ESCALA LAMINA	
NOMBRE	FECHA	1:2	1 de 1
DIB. A. VARGAS	26/09/2020		
REV. Ing. OCHOA	26/09/2020		

RONDANA LATERAL

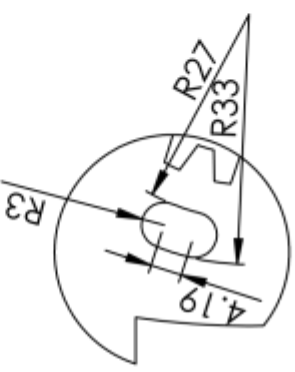
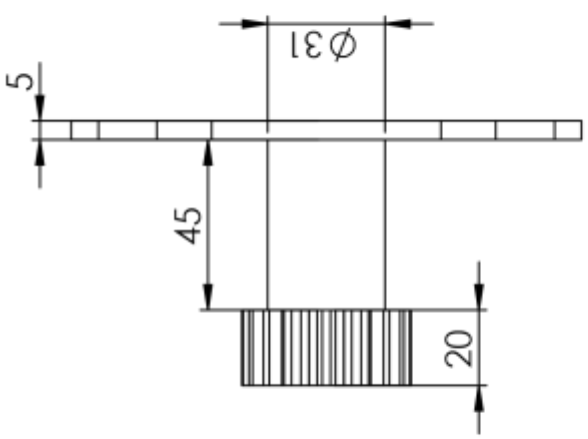
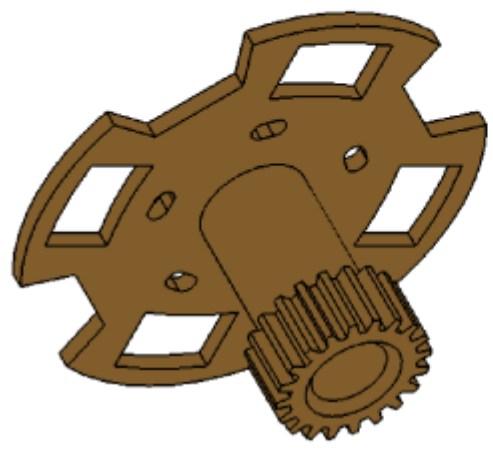
D

C

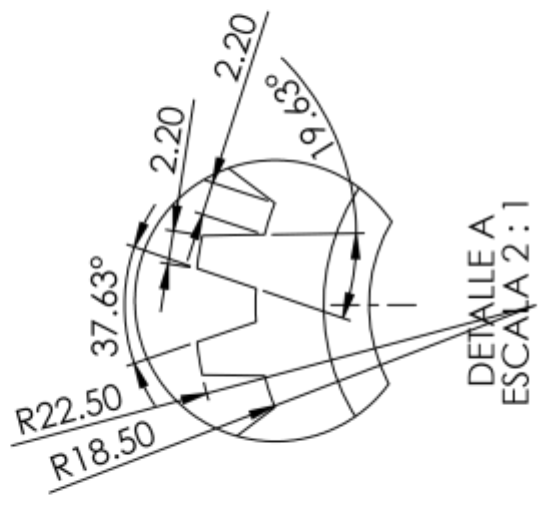
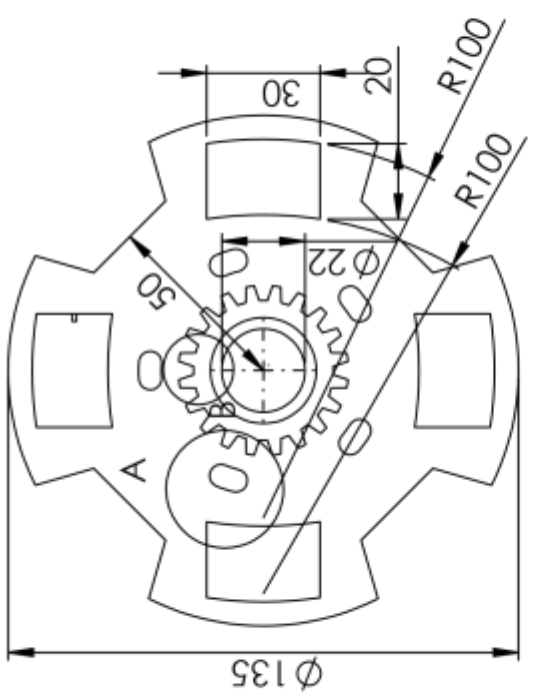
B

A

1 2 3 4 5 6



DETALLE B
ESCALA 1 : 1



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY - LENZ

NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/04/2020
Ing. OCHOA	26/04/2020

ESCALA LAMINA
1:2 1 de 1

MAZA Y ENGRANE 100

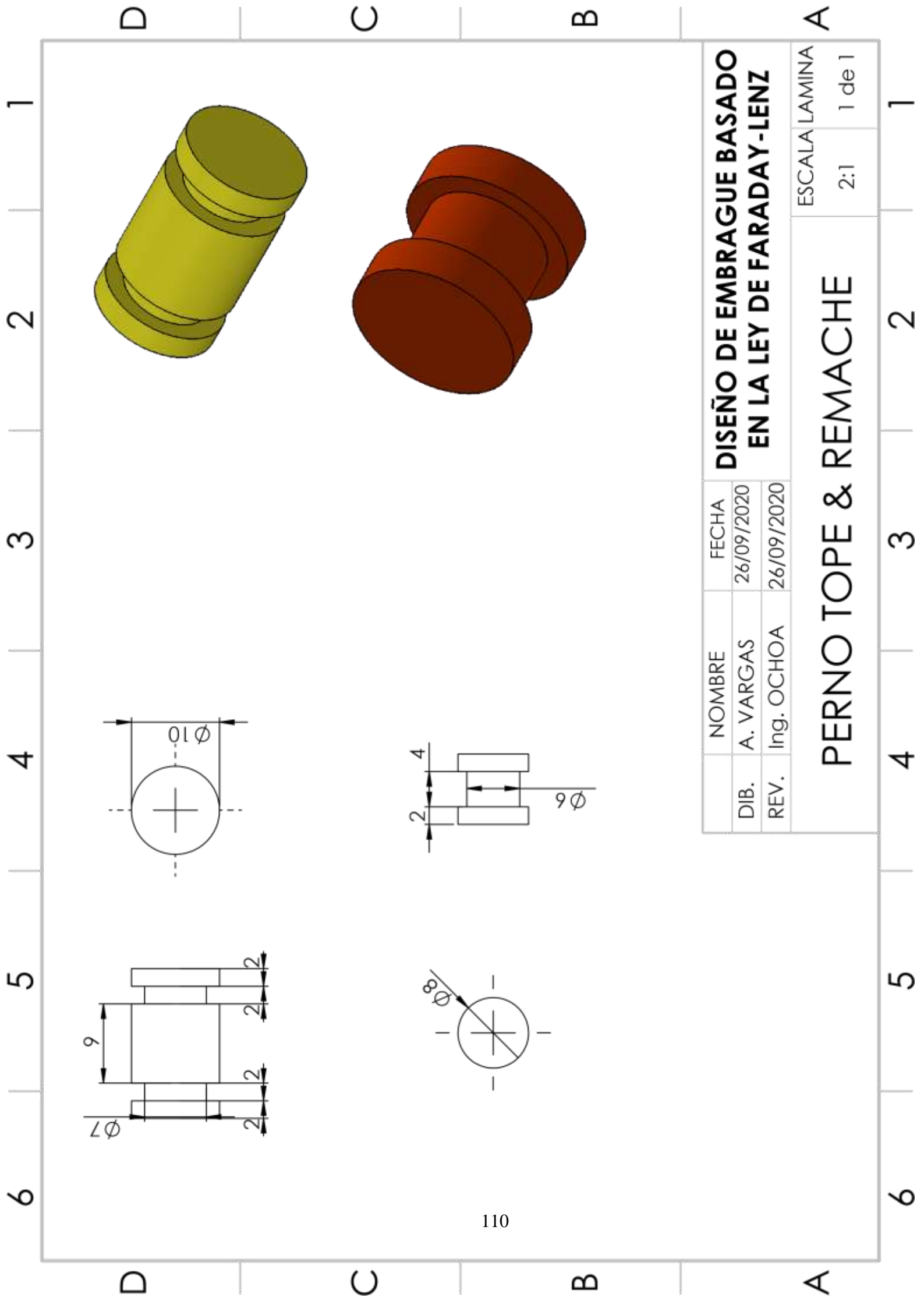
D

C

B

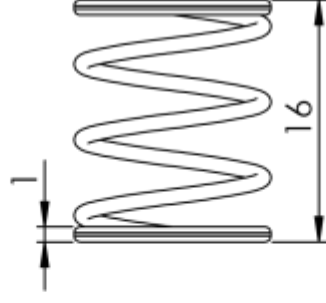
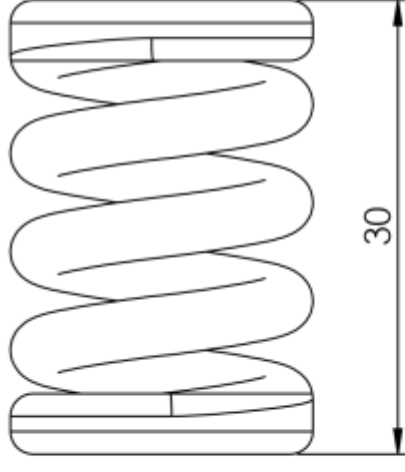
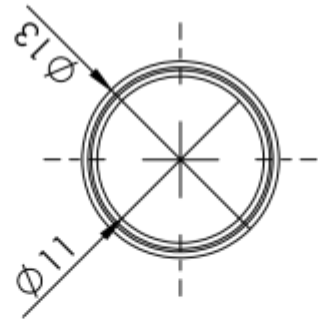
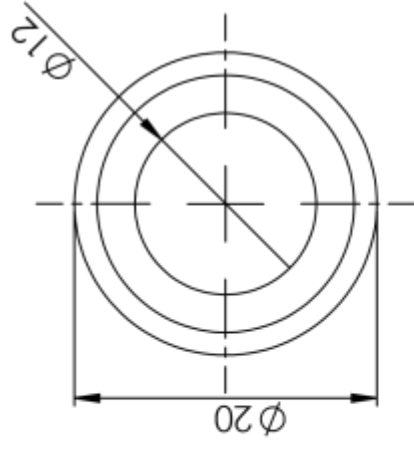
A

6 5 4 3 2 1



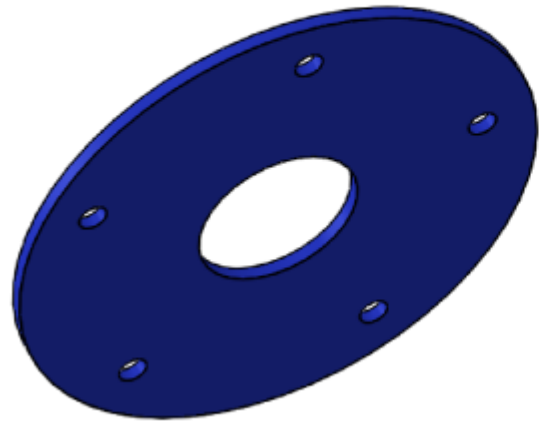
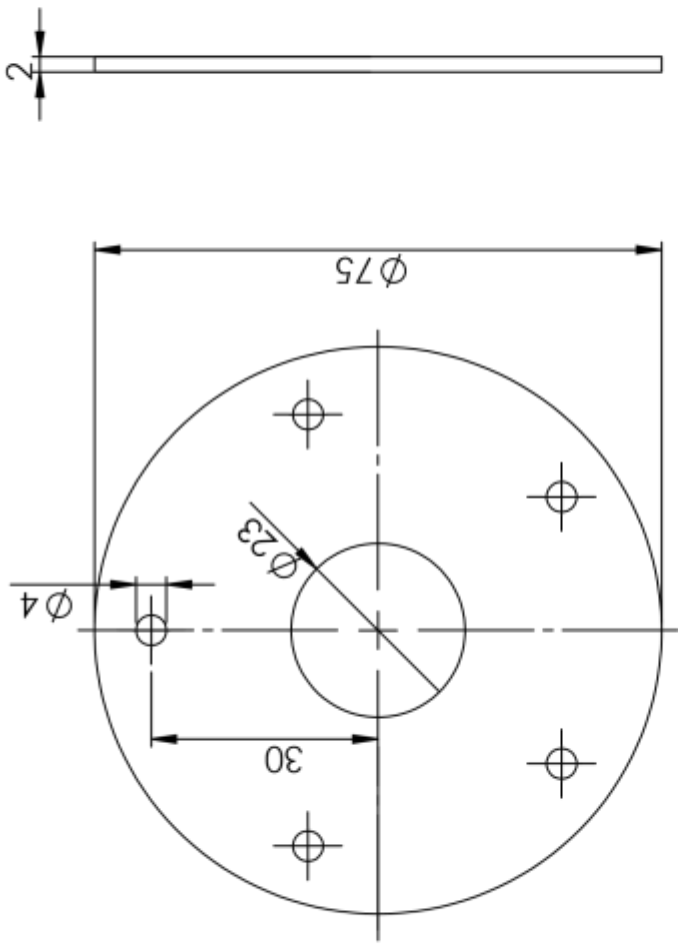
DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ		NOMBRE	FECHA
DIB.	A. VARGAS	26/09/2020	
REV.	Ing. OCHOA	26/09/2020	

PERNO TOPE & REMACHE		ESCALA LAMINA
		2:1
		1 de 1



DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ		RESORTES	
NOMBRE	FECHA	ESCALA LAMINA	
A. VARGAS	26/09/2020	2:1	1 de 1
REV.	Ing. OCHOA	26/09/2020	

III



NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ

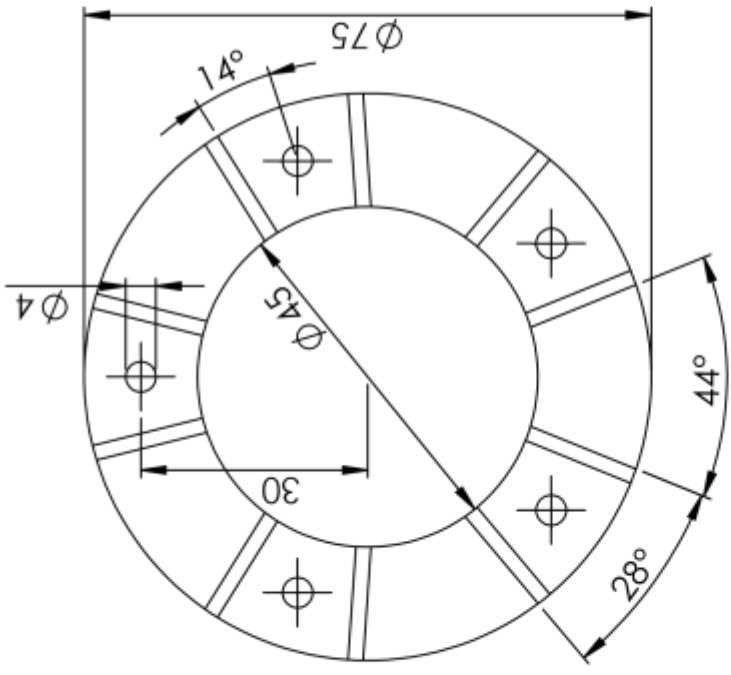
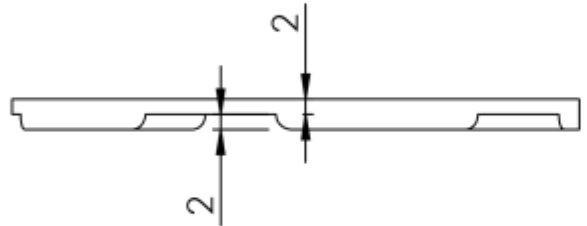
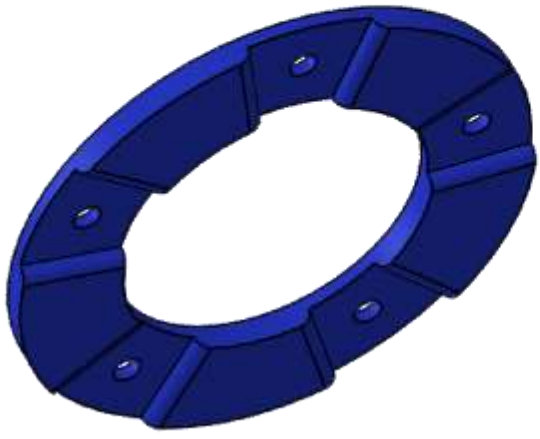
DISCO DE CONTACTO		ESCALA LAMINA
		1:2 1 de 1

D

C

B

A



DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ

NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
REV. Ing. OCHOA	26/09/2020

ESCALA LAMINA
1:1 1 de 1

DISCO DE CONTACTO ROD.

D

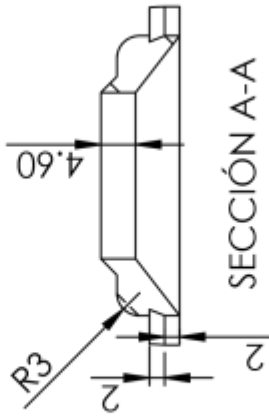
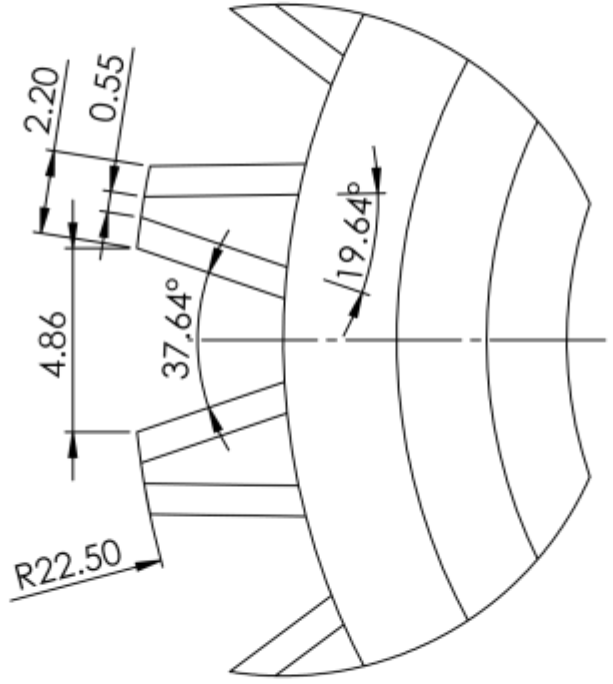
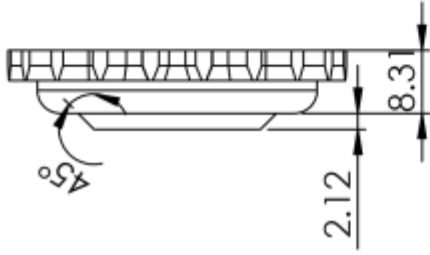
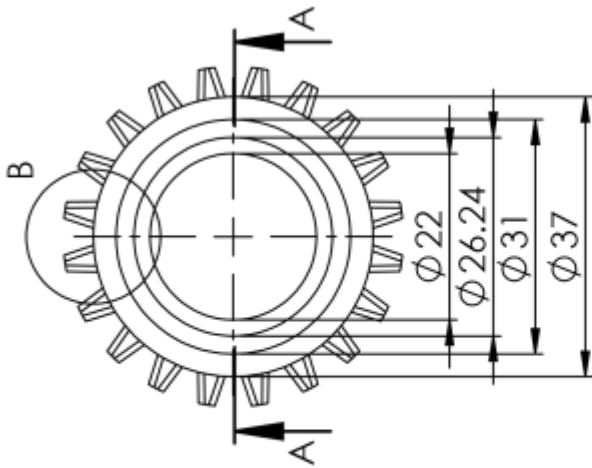
C

B

A

1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6



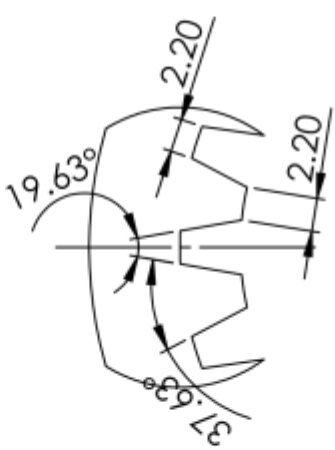
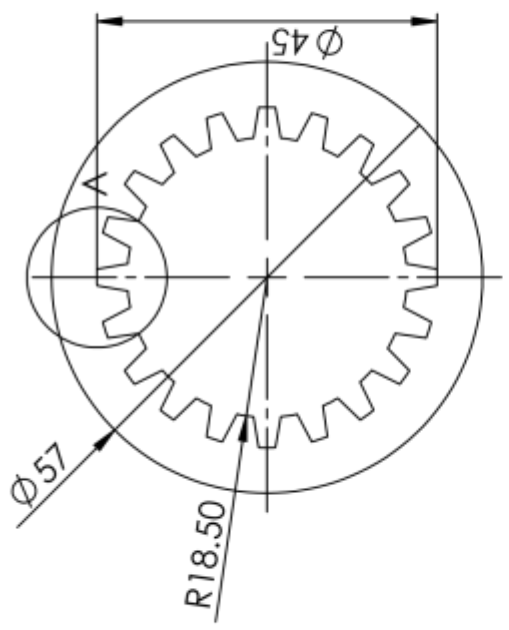
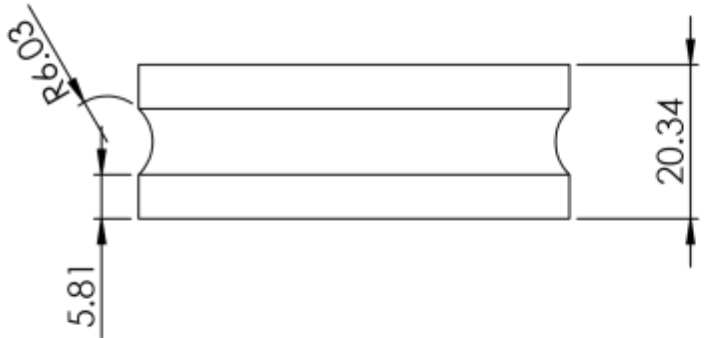
DETALLE B
ESCALA 5 : 1

**DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO
EN LA LEY DE FARADAY-LENZ**

NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

ESCALA LAMINA
1:1
1 de 1

ANILLO SINCRONIZADOR



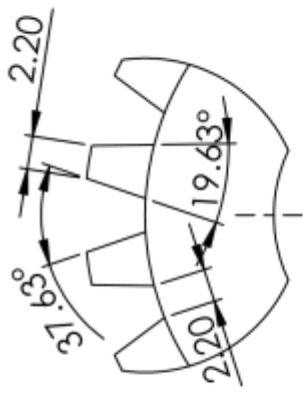
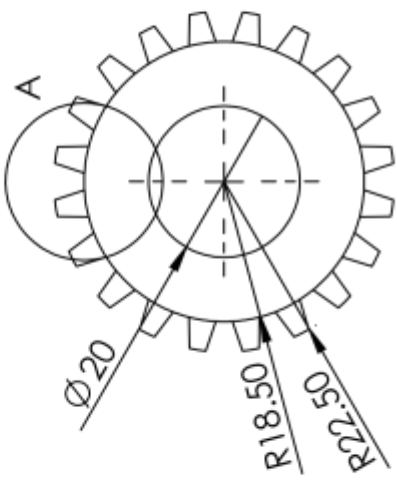
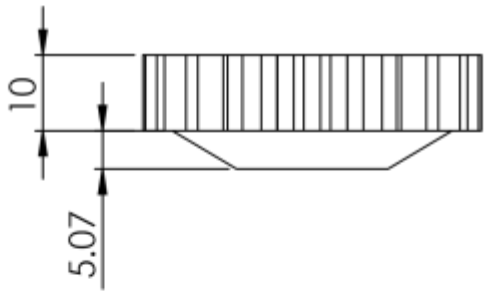
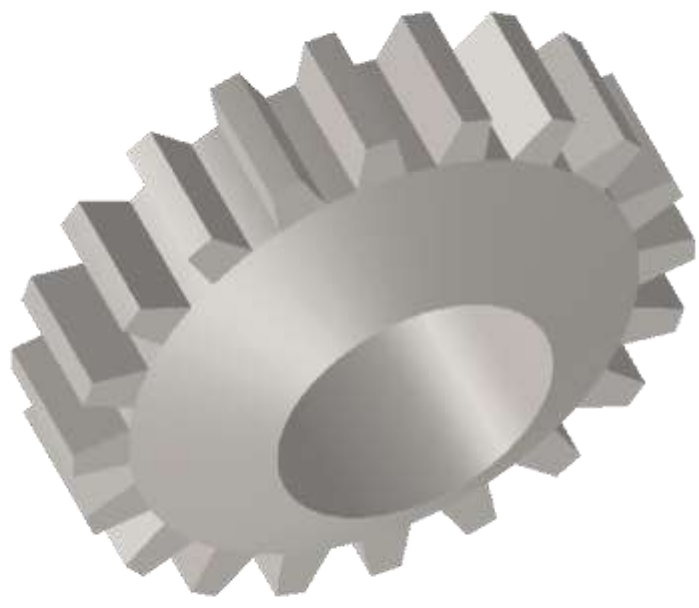
DETALLE A
ESCALA 2:1

DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY - LENZ

NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
Ing. OCHOA	26/09/2020

ESCALA LAMINA
1:1 1 de 1

CONECTOR 100



DETALLE A
ESCALA 2:1



DISEÑO DE EMBRAGUE BASADO EN LA LEY DE FARADAY-LENZ	
NOMBRE	FECHA
A. VARGAS	26/09/2020
REV.	Ing. OCHOA
	26/09/2020

ENGRANAJE FIJO	
ESCALA LAMINA	
1:1	1 de 1


ANEXO 3: ANÁLISIS ESTÁTICO

ANÁLISIS ESTÁTICO PLATO PRESOR

Información del modelo

 <p>Nombre: plato presor</p>			
Sólidos			
Referencia	como	Propiedades físicas	Ruta y Fecha
Cortar-Extruir11 	Sólido	Masa: 1.24453 kg Volumen: 0.000159556 m ³ Densidad: 7800 kg/m ³ Peso: 12.1964 N	E:\tesis\diseño\plato presor.SLDPRT May 14 19:58:53 2020

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: 1.7030 (28Cr4) Tipo: Isotrópico/elástico Límite elástico: 6.5e+008 N/m² Límite de tracción: 8.5e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin	Sólido 1(Cortar- Extruir11)(plat o presor)
Datos de curva: N/A		

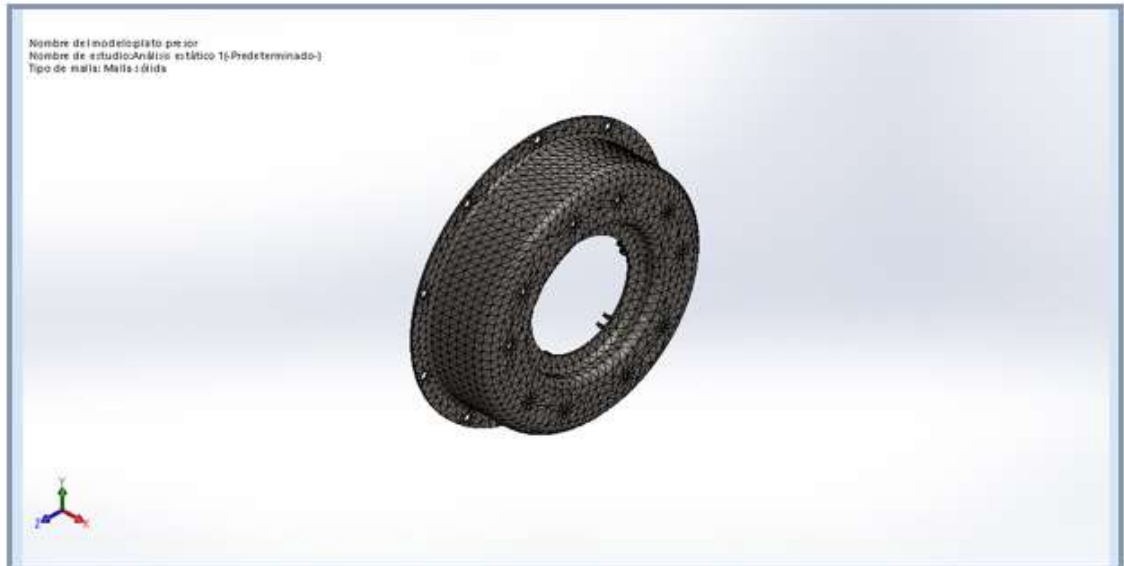
Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-2		Entidades: 5 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-7.02927	-6.96465	1.48917	10.0067
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 10 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m

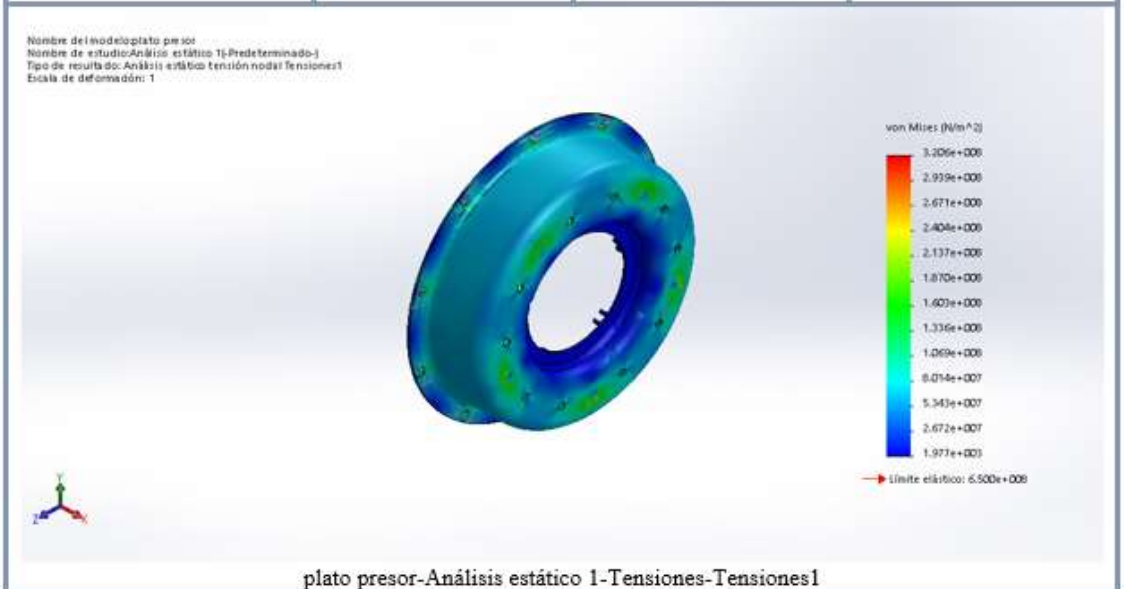
Información de malla – detalles

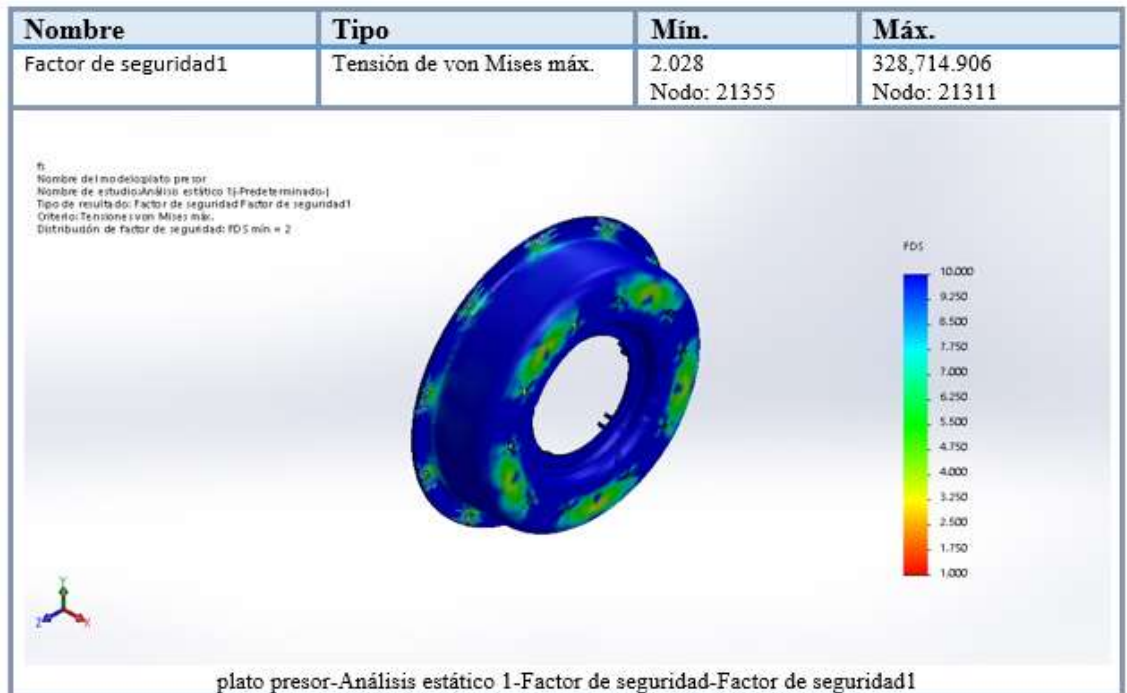
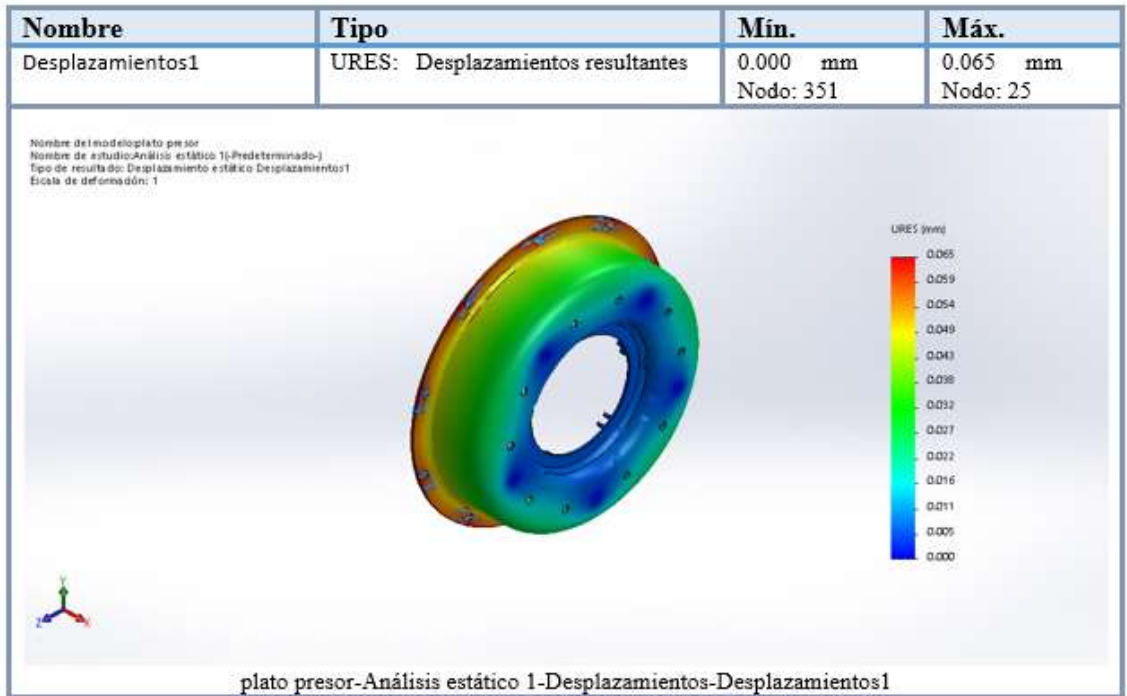
Número total de nodos	23797
Número total de elementos	11347
Cociente máximo de aspecto	22.09
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	22.7
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.388
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:09
Nombre de computadora:	PCSOLUTION



Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Min.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	1.977e+003N/m ² Nodo: 21311	3.206e+008N/m ² Nodo: 21355





ANÁLISIS ESTÁTICO 2- PLATO PRESOR

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 10 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0.262077	0.751327	0.172775	0.814265
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga		
Torsión-1		Entidades: 10 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m		

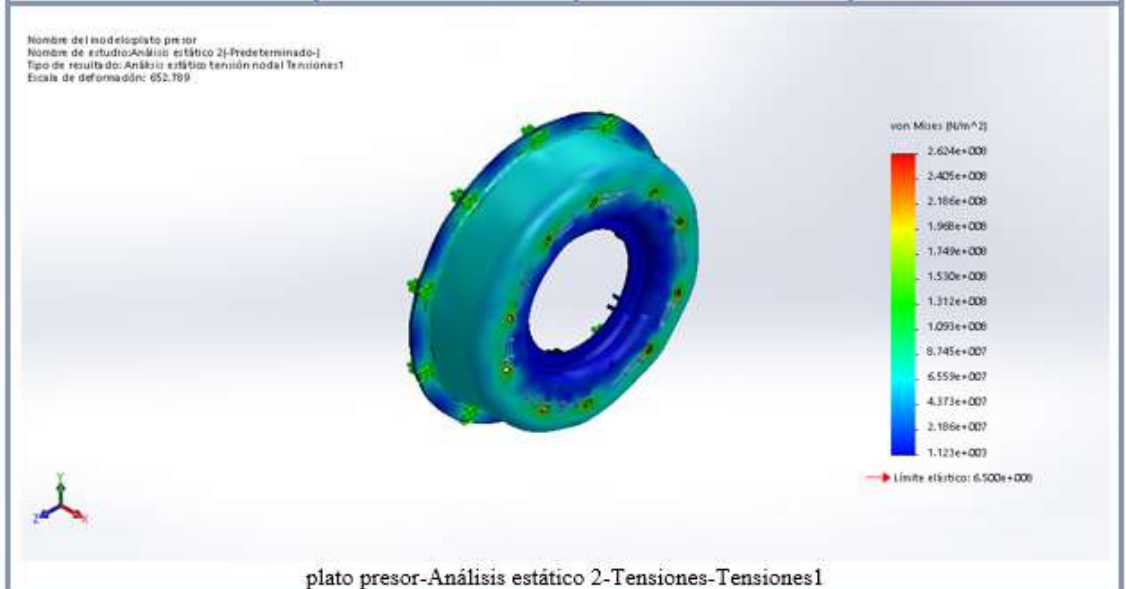
Información de malla – detalles

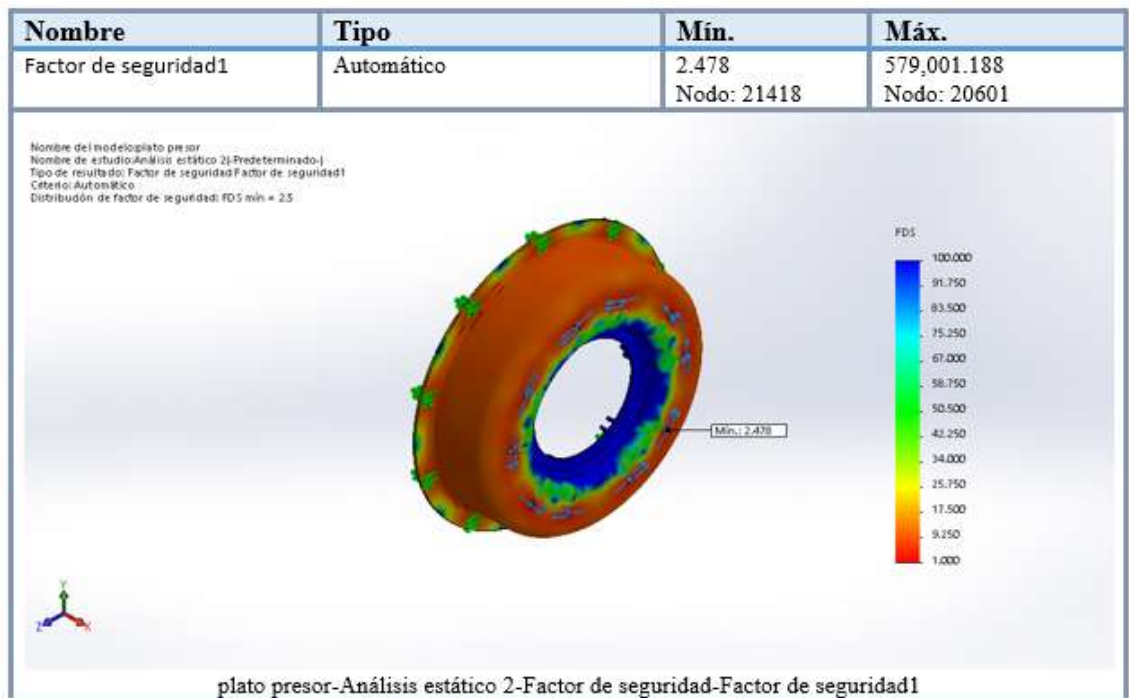
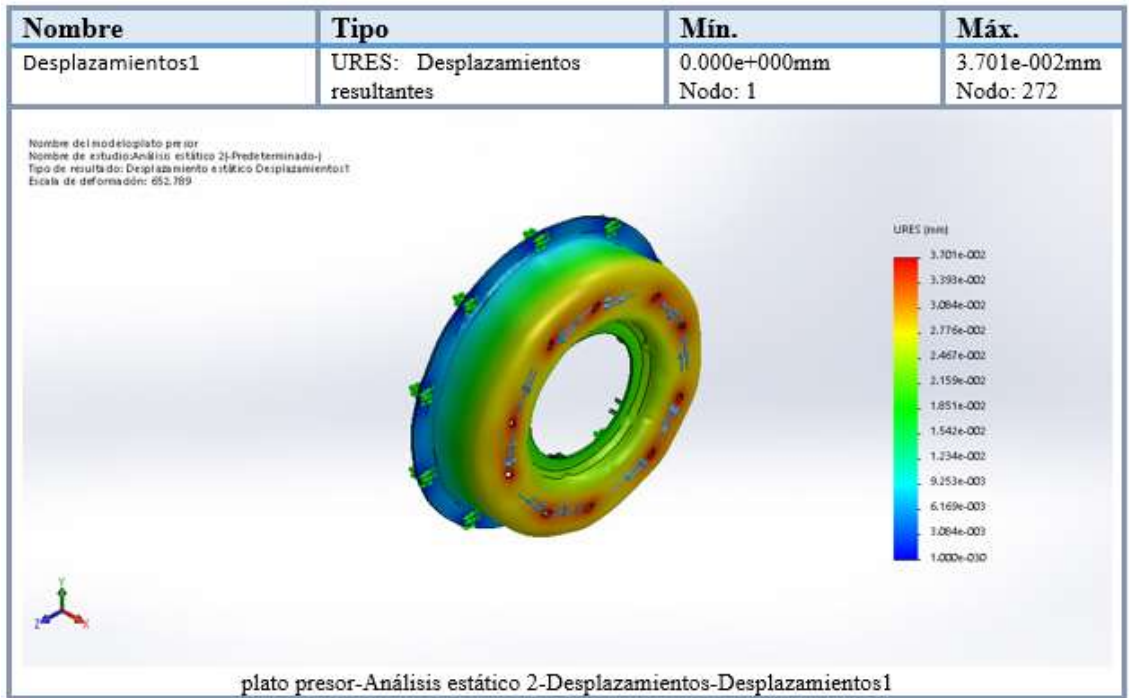
Número total de nodos	22745
Número total de elementos	10875
Cociente máximo de aspecto	17.697
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	18.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	1
% de elementos distorsionados (Jacobina)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:09
Nombre de computadora:	PC SOLUTION



Resultados del estudio


Nombre	Tipo	Min.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	1.123e+003N/m ² Nodo: 20601	2.624e+008N/m ² Nodo: 21418






ANÁLISIS ESTÁTICO - SOPORTE DE IMANES


Información del modelo

			
Nombre del modelo: soporte de imanes Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Redondeo4 	Sólido	Masa:0.456057 kg Volumen:5.84688e-005 m ³ Densidad:7800 kg/m ³ Peso:4.46936 N	E:\tesis\diseño\soporte de imanes.SLDPRT May 03 21:10:20 2020

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: 1.5918 (17CrNi6-6) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 2.95594e+008 N/m² Límite de tracción: 6e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin	Sólido 1(Redondeo4)(soporte de imanes)
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 10 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0.000155807	-0.0136227	-0.0027239	0.0138932
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 10 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m

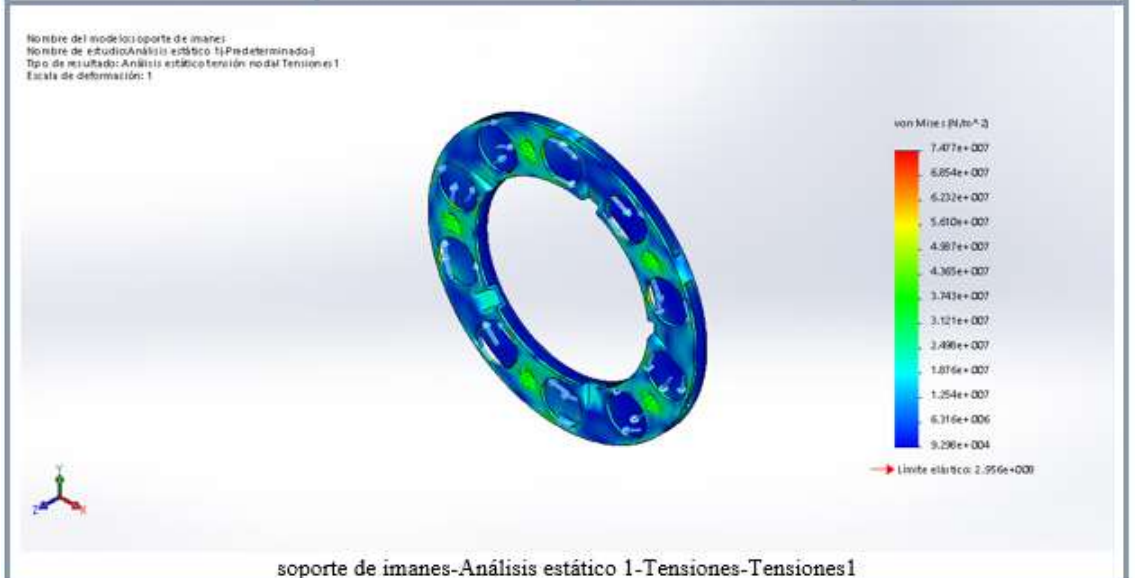
Información de malla – detalles

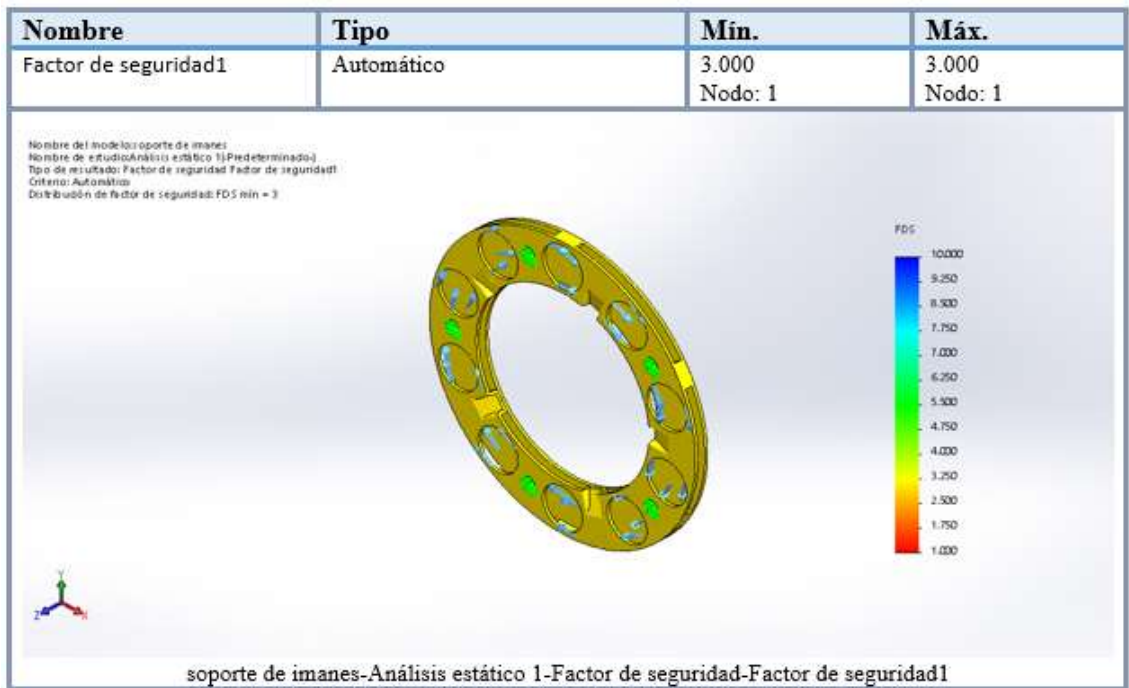
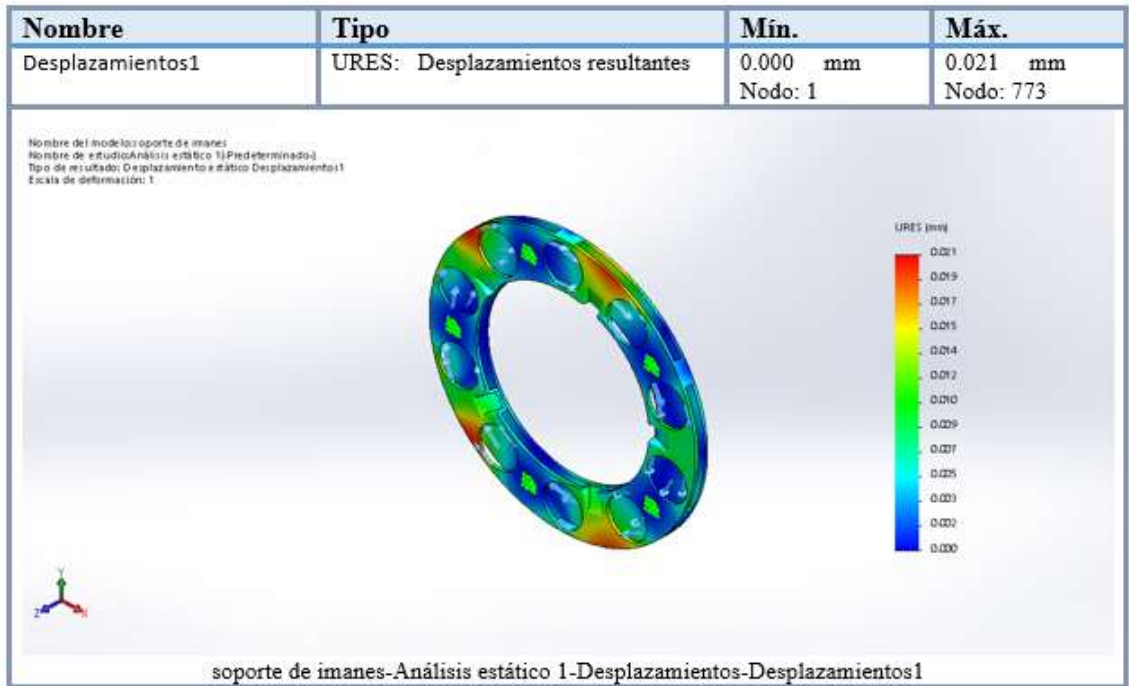
Número total de nodos	18407
Número total de elementos	8347
Cociente máximo de aspecto	8.9707
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	74.8
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:05
Nombre de computadora:	PCSOLUTION



Resultados del estudio

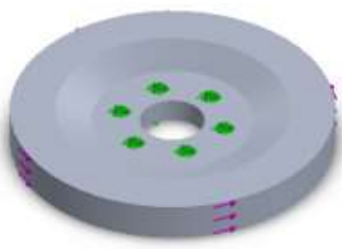

Nombre	Tipo	Min.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	9.298e+004 N/m ² Nodo: 15508	7.477e+007 N/m ² Nodo: 1166






ANÁLISIS ESTÁTICO – DISCO DE ALUMINIO

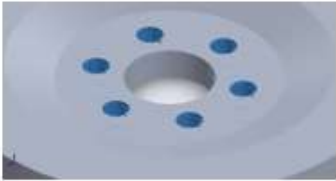
Información del modelo

 <p style="margin-top: 10px;">Nombre del modelo: disco de aluminio Configuración actual: Predeterminado</p>			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
<p style="text-align: center;">Cortar-Extruir4</p> 	Sólido	<p style="margin: 0;">Masa: 1.59459 kg</p> <p style="margin: 0;">Volumen: 0.000569496 m³</p> <p style="margin: 0;">Densidad: 2800 kg/m³</p> <p style="margin: 0;">Peso: 15.627 N</p>	<p style="margin: 0;">E:\tesis\diseño\disco de aluminio.SLDPRT</p> <p style="margin: 0;">May 04 15:38:39 2020</p>

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 3.1255 (EN-AW 2014) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 2.4e+008 N/m² Límite de tracción: 3.95e+008 N/m² Módulo elástico: 7e+010 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.3897 Densidad: 2800 kg/m³ Módulo cortante: 2.7e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 2.4e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Cortar-Extruir4)(disc o de aluminio)</p>
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 6 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0.132691	0.143277	0.0014106	0.195287
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

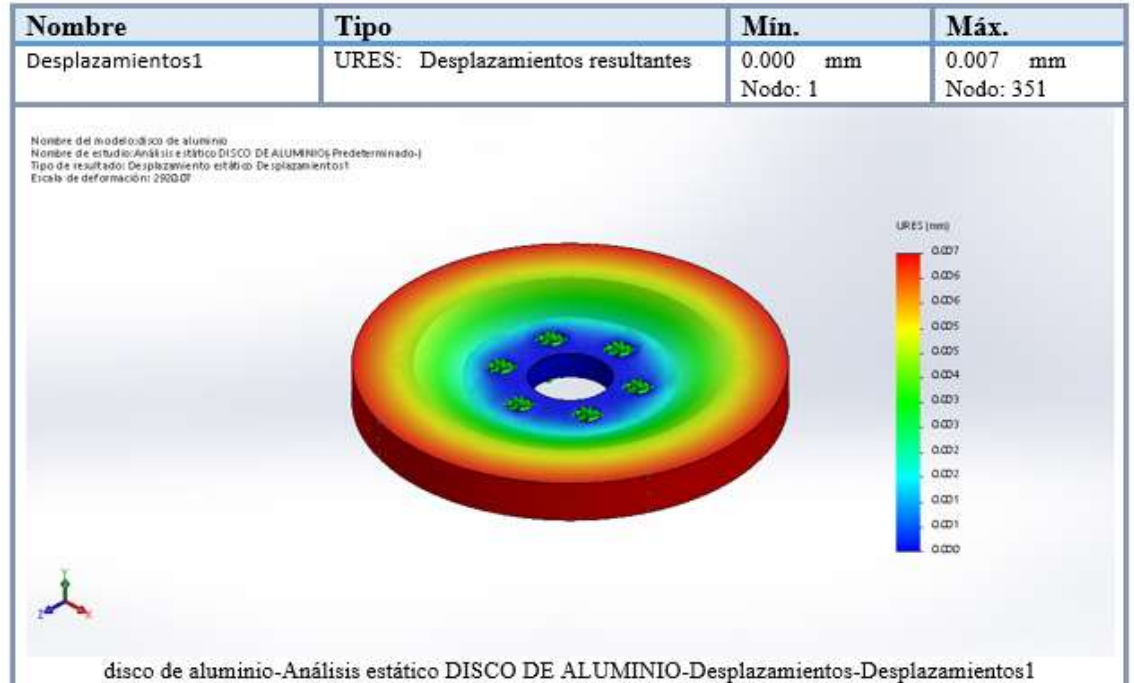
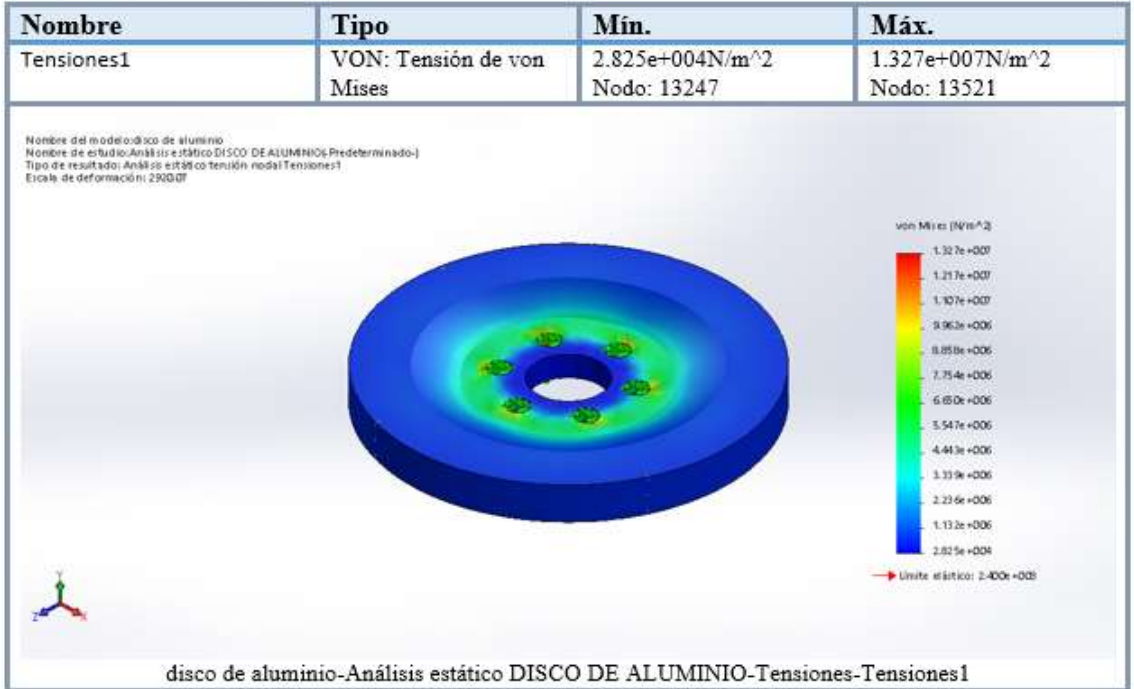
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		<p>Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m</p>

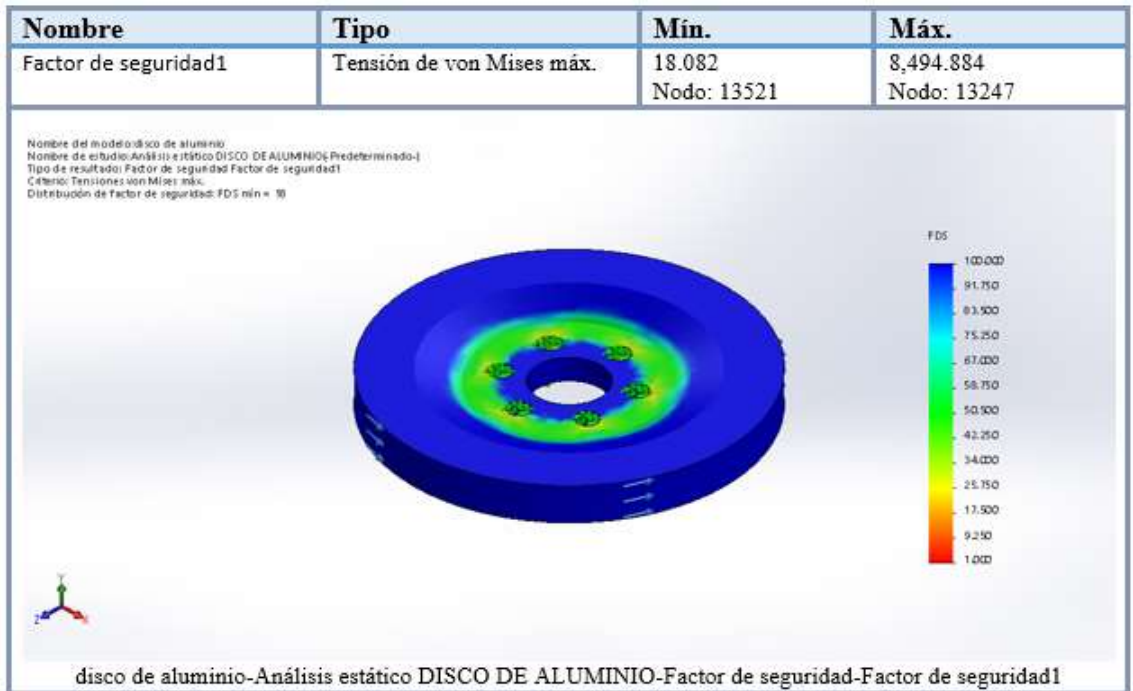
Información de malla – detalles

Número total de nodos	13606
Número total de elementos	8204
Cociente máximo de aspecto	4.0027
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99.2
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:06
Nombre de computadora:	PCSOLUTION



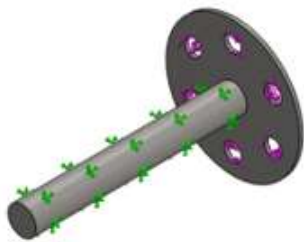

Resultados del estudio



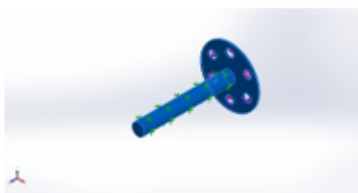


ANÁLISIS ESTÁTICO – EJE DE CONEXIÓN


Información del modelo

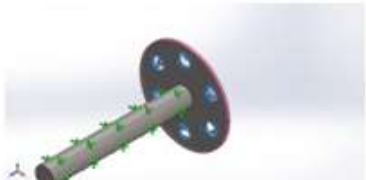
			
Nombre del modelo: eje de coneccion - caja de cambios Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Saliente-Extruir2 	Sólido	Masa:0.492554 kg Volumen:6.3148e-005 m ³ Densidad:7800 kg/m ³ Peso:4.82703 N	E:\tesis\diseño\ejec de coneccion - caja de cambios.SLDPRT Dec 04 17:24:41 2019

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: 1.7030 (28Cr4) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 6.5e+008 N/m² Límite de tracción: 8.5e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin	Sólido 1(Saliente-Extruir2)(eje de coneccion - caja de cambios)
Datos de curva:N/A		

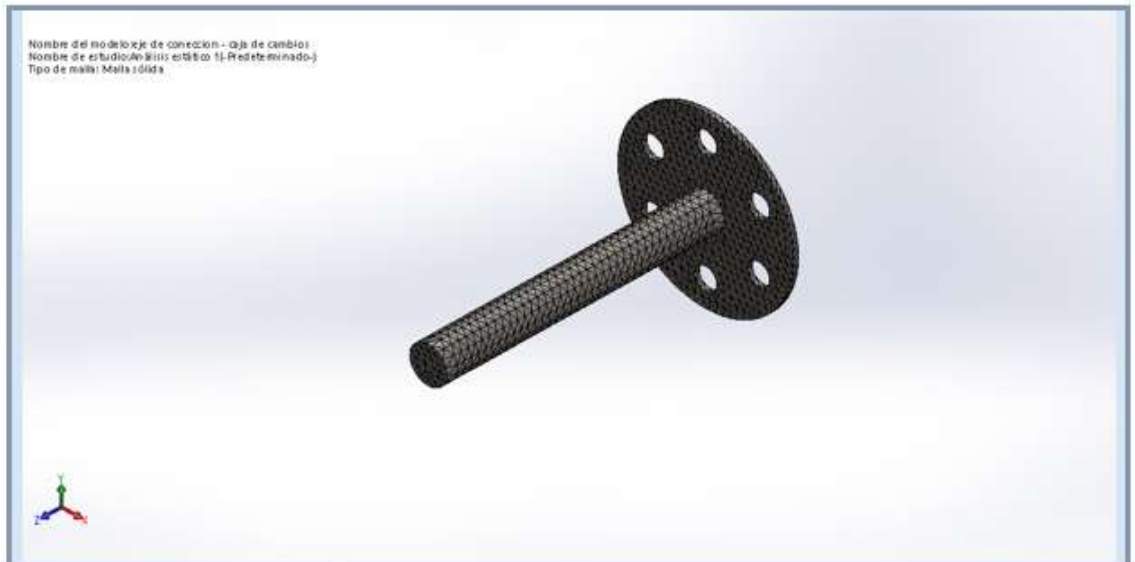
Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	1.93675	2.25059	2.03807	3.60137
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 6 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 400 N.m

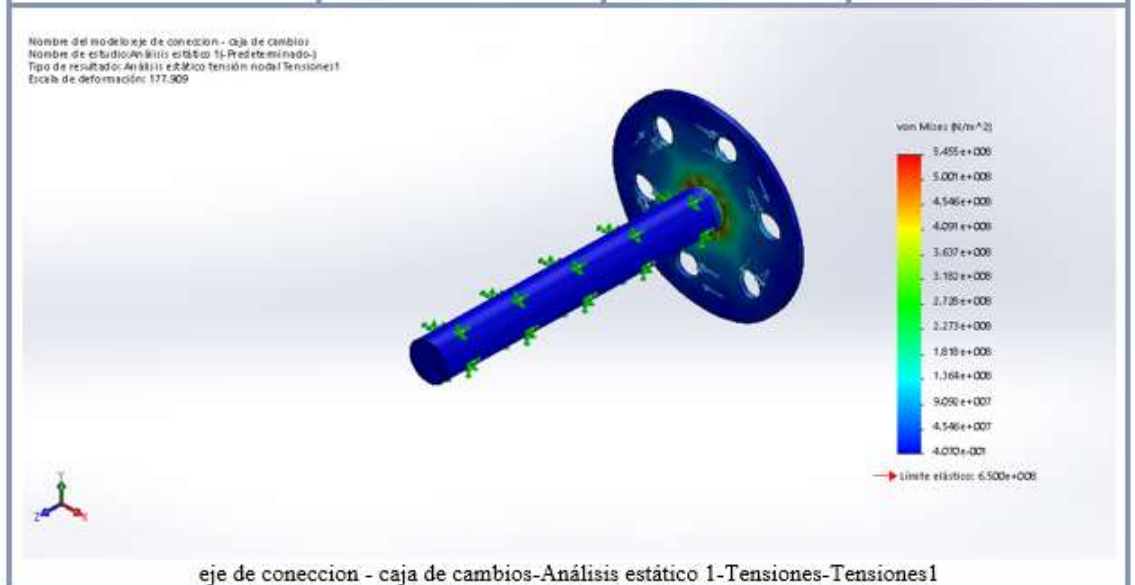
Información de malla – detalles

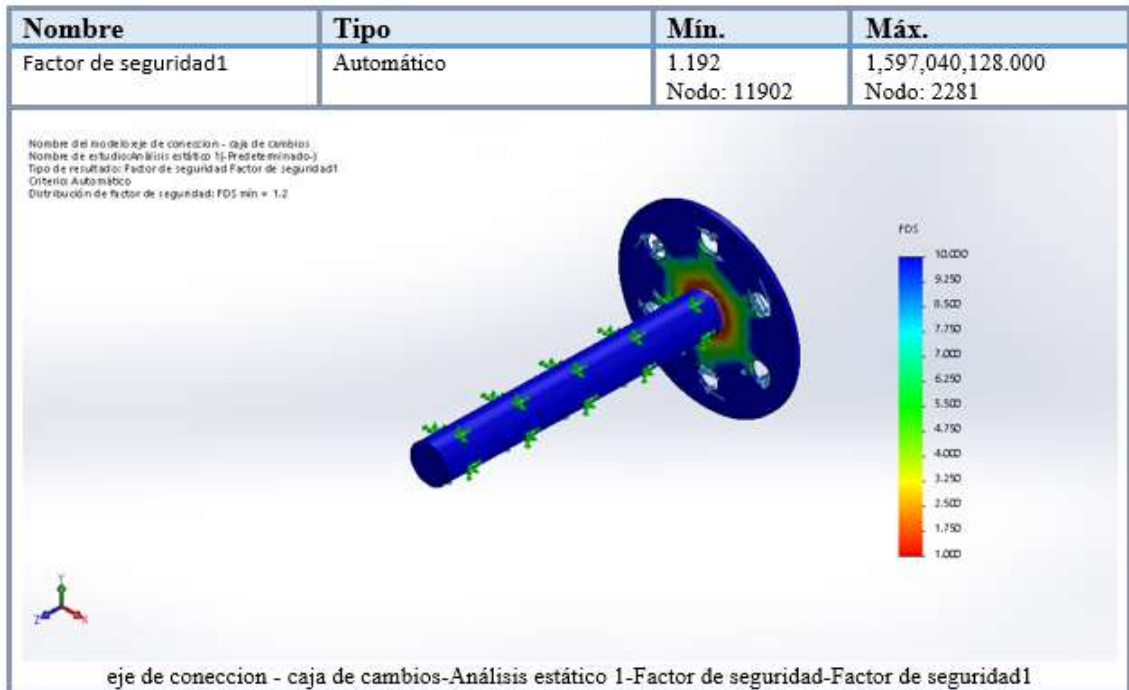
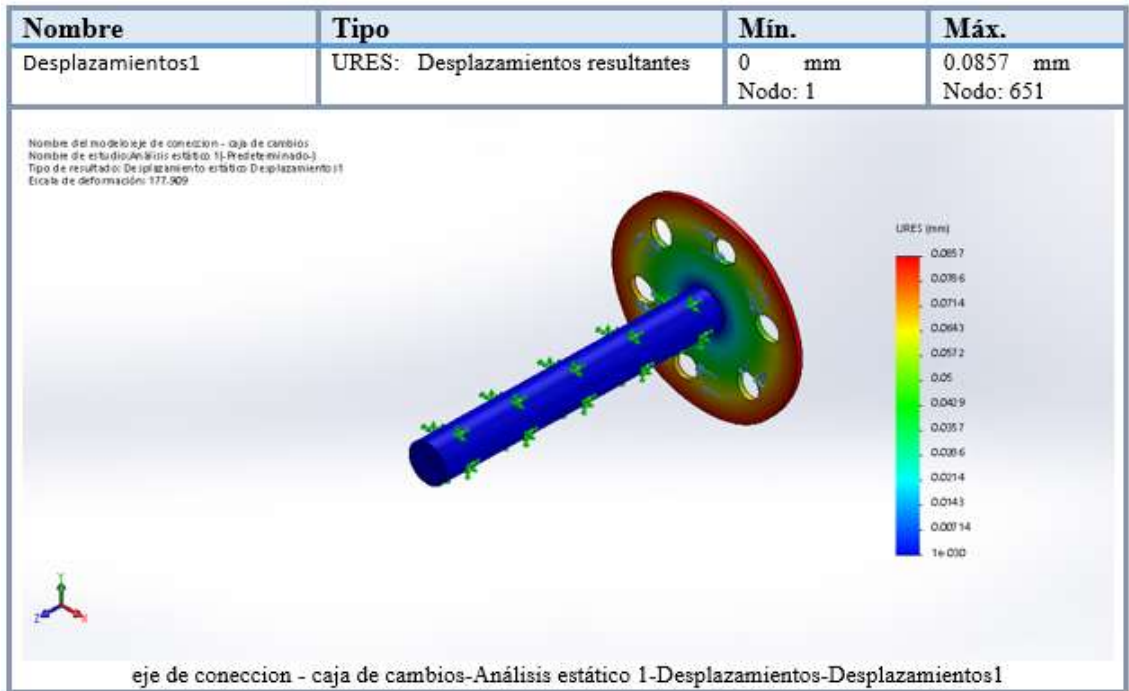
Número total de nodos	13628
Número total de elementos	7662
Cociente máximo de aspecto	5.3601
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	97.9
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:01
Nombre de computadora:	PCSOLUTION



Resultados del estudio



Nombre	Tipo	Min.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	4.070e-001N/m ² Nodo: 2281	5.455e+008N/m ² Nodo: 11902






ANÁLISIS ESTÁTICO – RONDANA DE CONTACTO

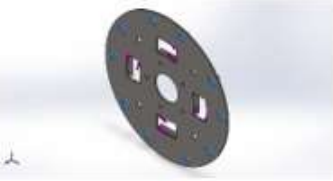
Información del modelo

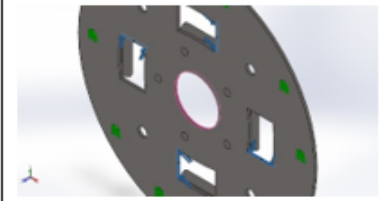
 <p>Nombre del modelo: rondana de contacto Configuración actual: Predeterminado</p>			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Redondeo2 	Sólido	Masa: 0.286593 kg Volumen: 3.67427e-007 m ³ Densidad: 7800 kg/m ³ Peso: 0.0280861 N	E:\tesis\diseño\cople 100\rondana de contacto.SLDPRT feb 04 17:04:30 2020

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 1.7030 (28Cr4) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 6.5e+008 N/m² Límite de tracción: 8.5e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin</p>	Sólido rondana de contacto
Datos de curva:N/A		

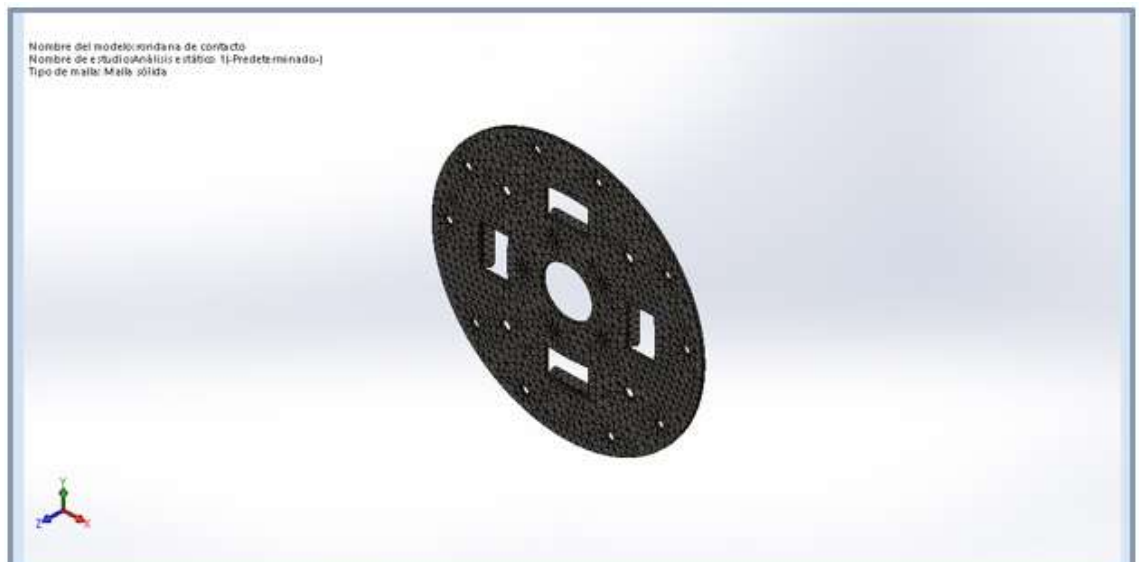
Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 10 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0.0361176	-0.126499	0.0151348	0.132422
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

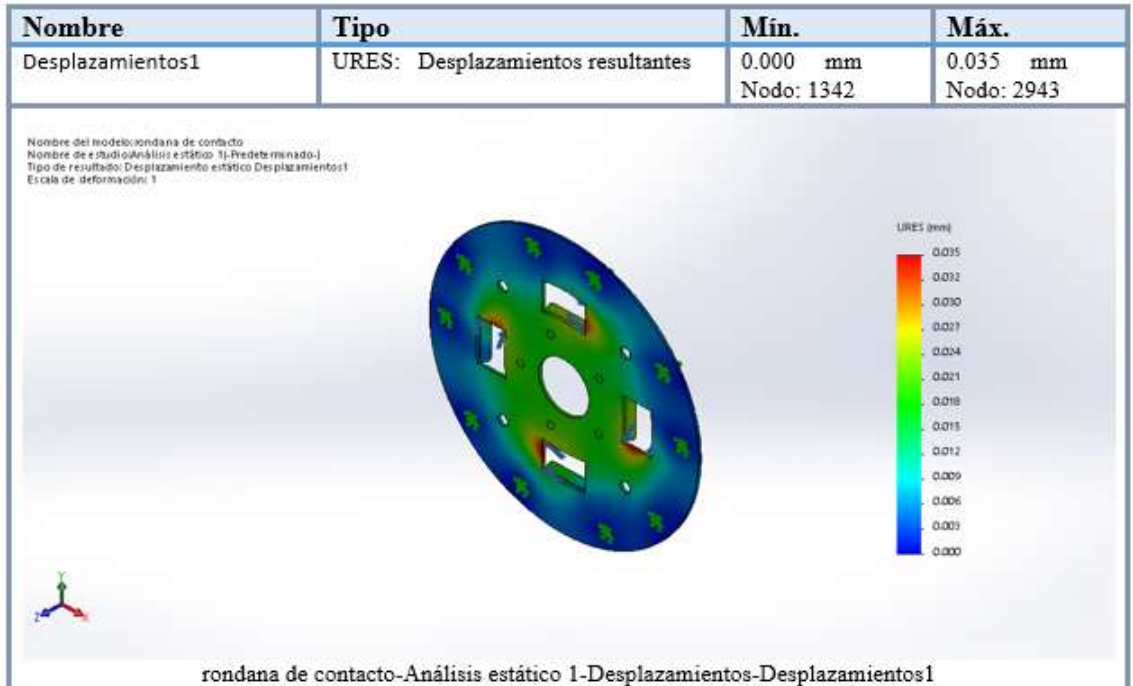
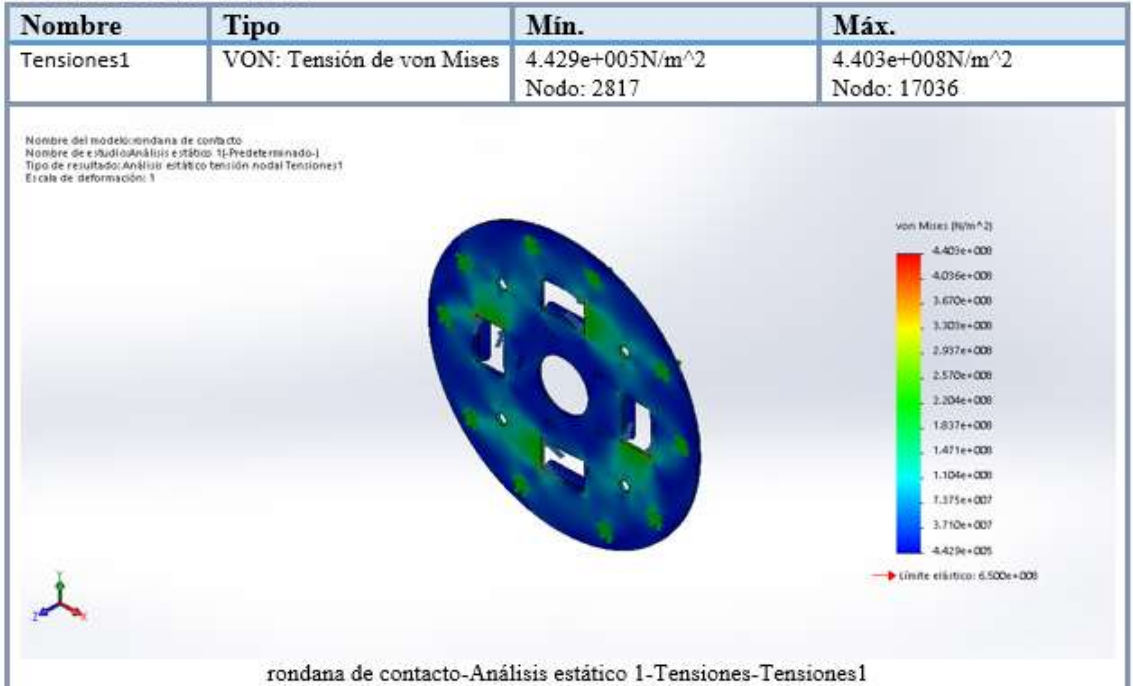
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 4 cara(s) Referencia: Cara<1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m

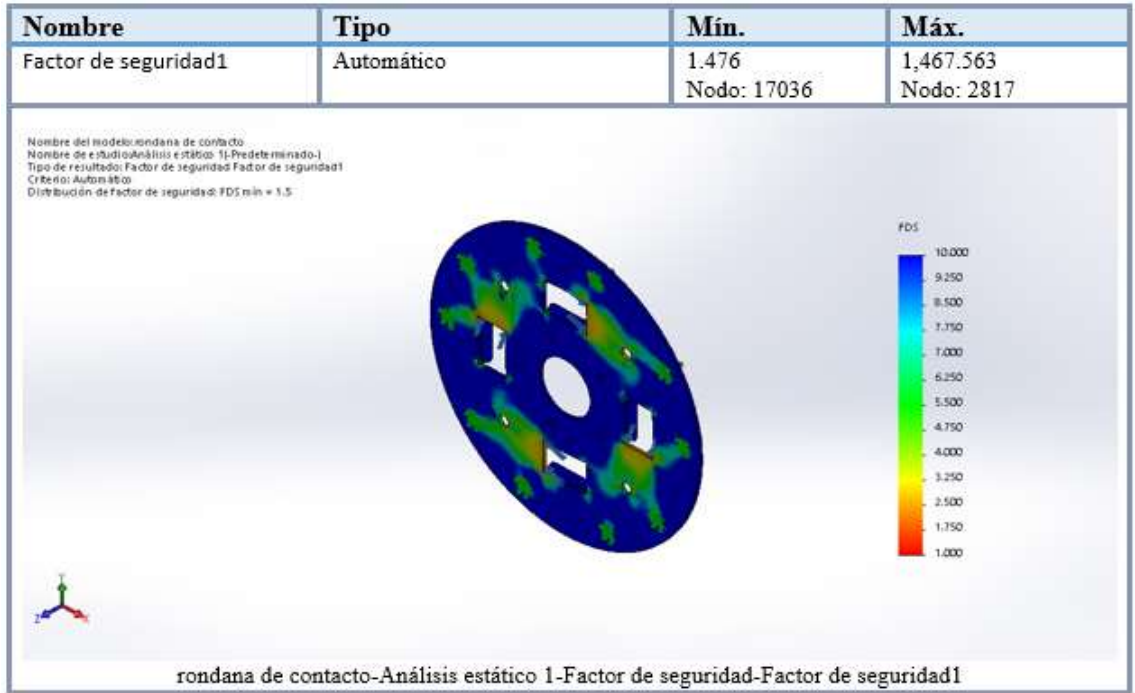
Información de malla – detalles

Número total de nodos	17978
Número total de elementos	8405
Cociente máximo de aspecto	10.657
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	81.2
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.0238
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:03
Nombre de computadora:	PCSOLUTION



Resultados del estudio






ANÁLISIS ESTÁTICO – RONDANA LATERAL

Información del modelo




Nombre del modelo: rondana lateral
Configuración actual: Predeterminado

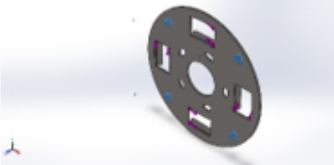
Sólidos

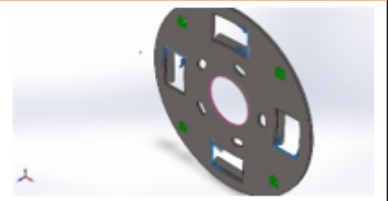
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Redondeo8 	Sólido	Masa:0.286593 kg Volumen:3.67427e-007 m ³ Densidad:7800 kg/m ³ Peso:0.280861 N	E:\tesis\diseño\cople 100\rondana lateral.SLDPRT feb 04 09:40:42 2020

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 1.7030 (28Cr4) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 6.5e+008 N/m² Límite de tracción: 8.5e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin</p>	Sólido rondana lateral
Datos de curva:N/A		

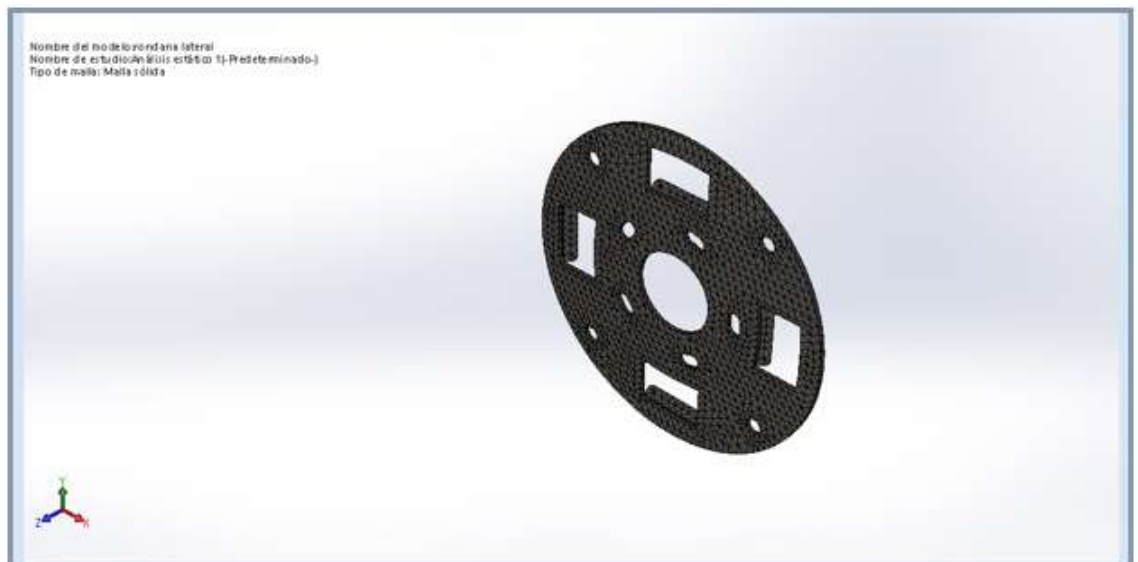
Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 4 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0.0133286	0.0719452	0.0324297	0.080034
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

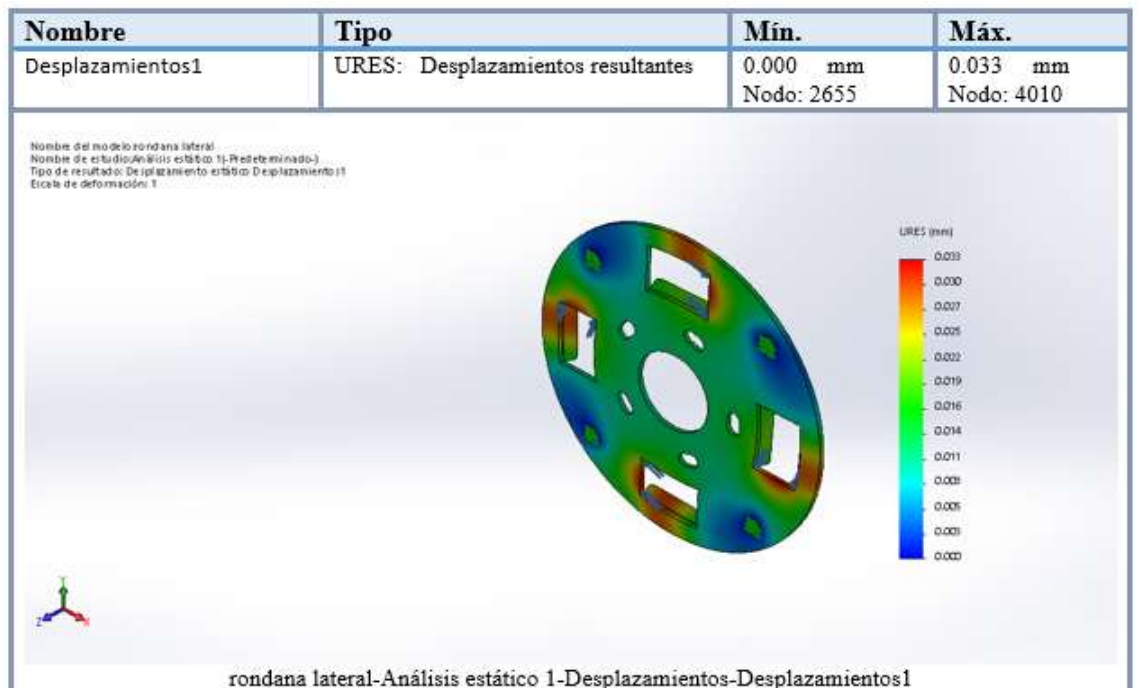
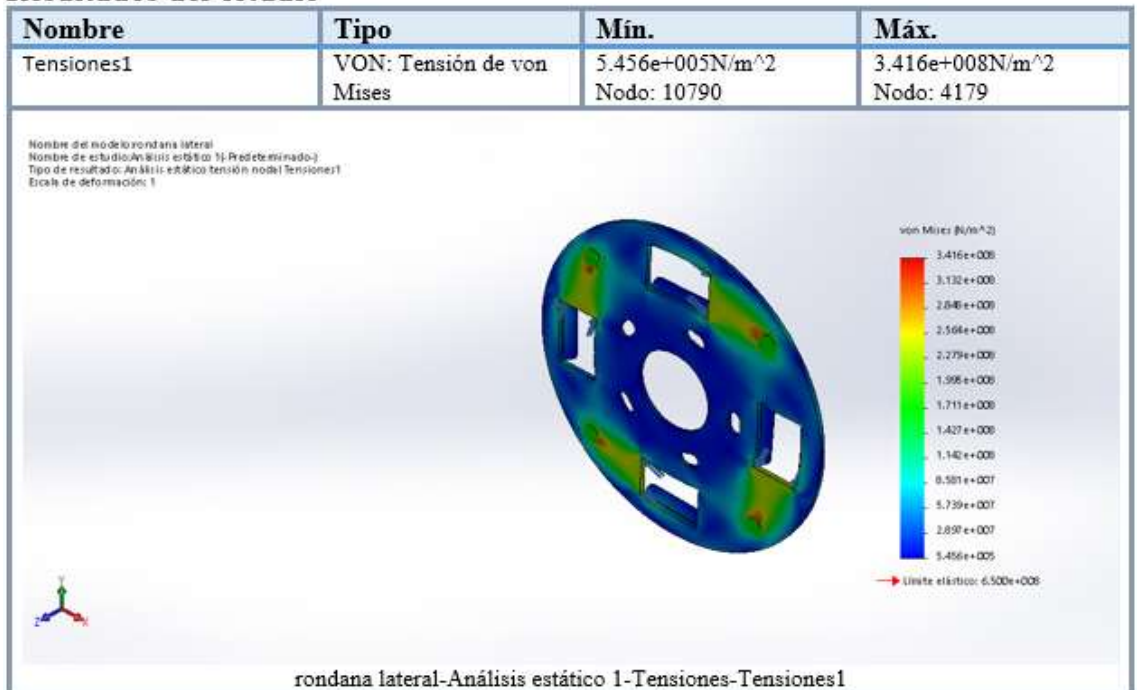
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 4 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m

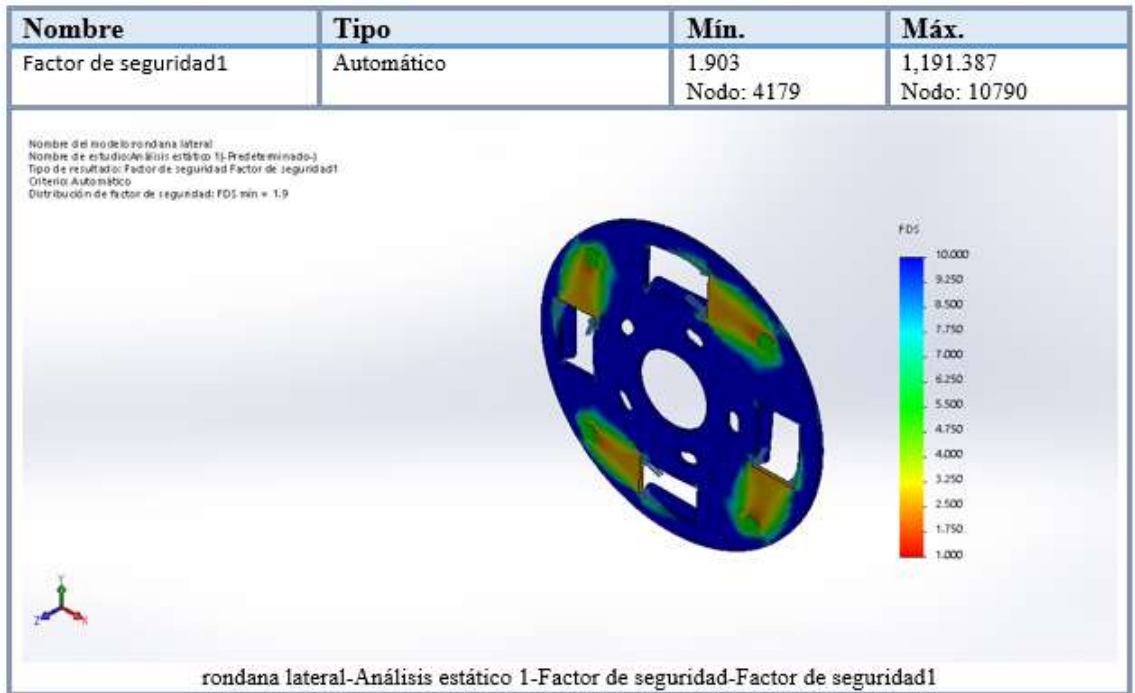
Información de malla – detalles

Número total de nodos	16485
Número total de elementos	7735
Cociente máximo de aspecto	8.7536
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	94.1
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:03
Nombre de computadora:	PC SOLUTION





Resultados del estudio



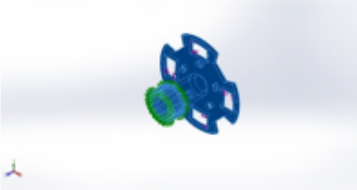


ANÁLISIS ESTÁTICO – MASA Y ENGRANAJE

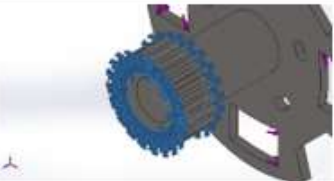
Información del modelo

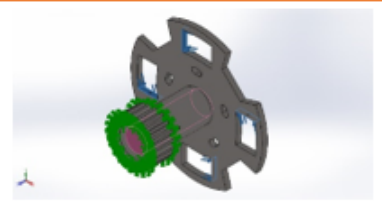
 <p style="margin-top: 20px;">Nombre del modelo: maza & engranaje 100 Configuración actual: Predeterminado</p>			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
<p style="text-align: center;">Cortar-Extruir5</p> 	Sólido	<p>Masa:0.616914 kg Volumen:7.97047e-005 m³ Densidad:7740 kg/m³ Peso:6.04576 N</p>	<p>E:\tesis\diseño\cople 100\maza & engranaje 100.SLDPRT Apr 12 16:20:56 2020</p>

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 1.2083 (X40Cr14) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 1.2e+009 N/m² Límite de tracción: 1.5e+009 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7740 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Cortar-Extruir5)(maza & engranaje 100)</p>
Datos de curva:N/A		

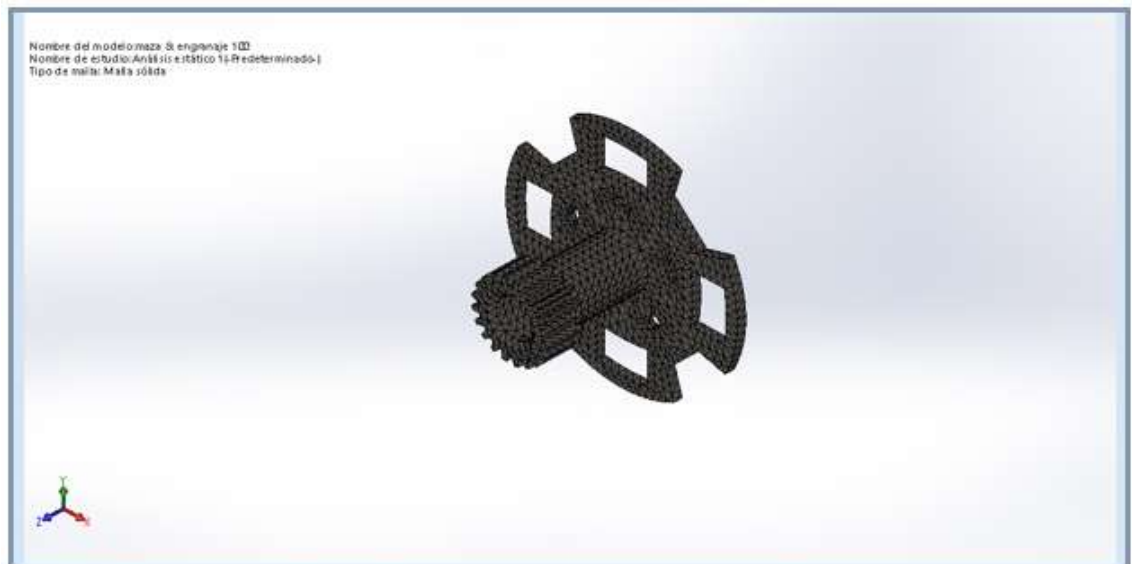
Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-1.70058	-1.49175	-0.284447	2.27996
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

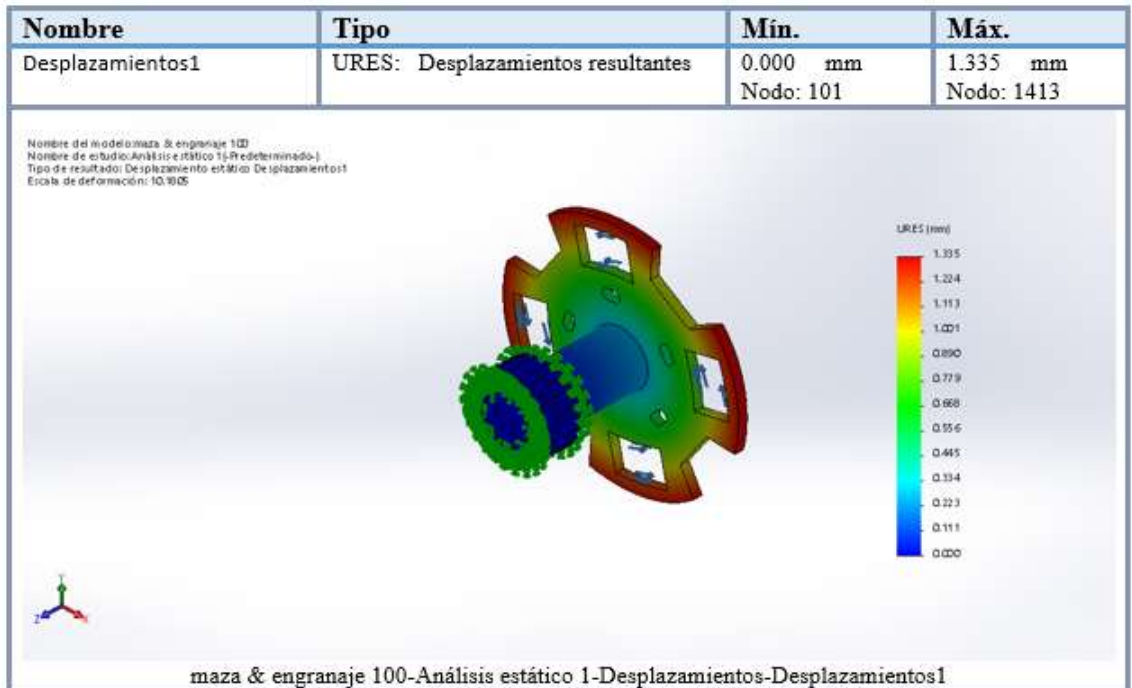
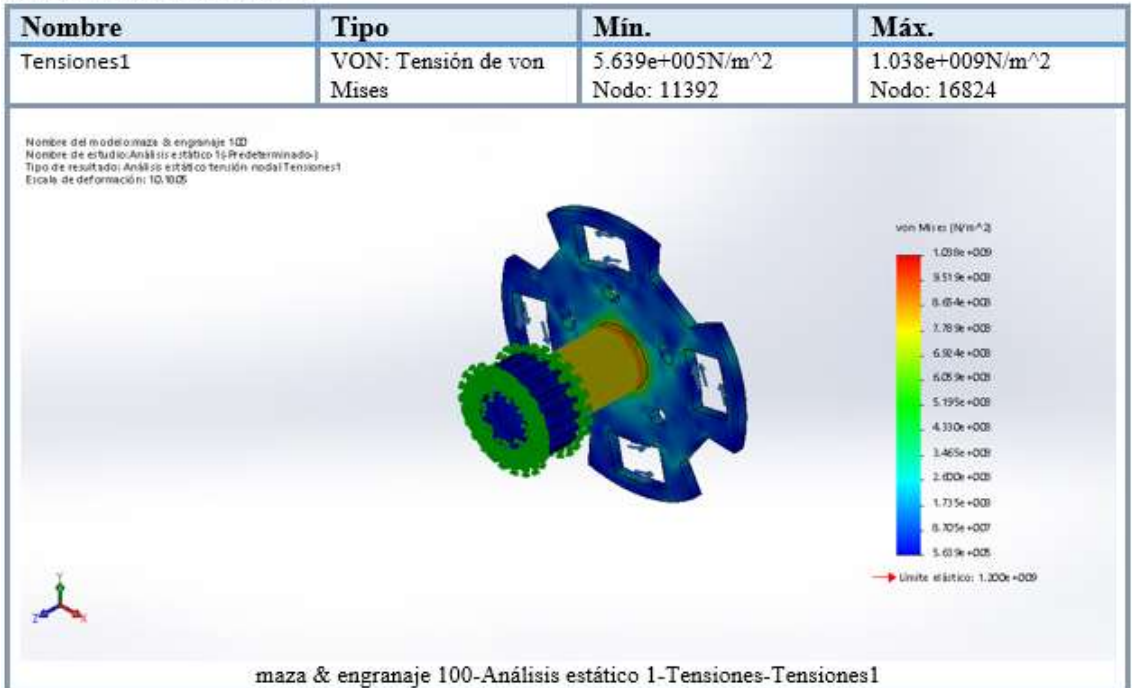
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 4 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: -500 N.m

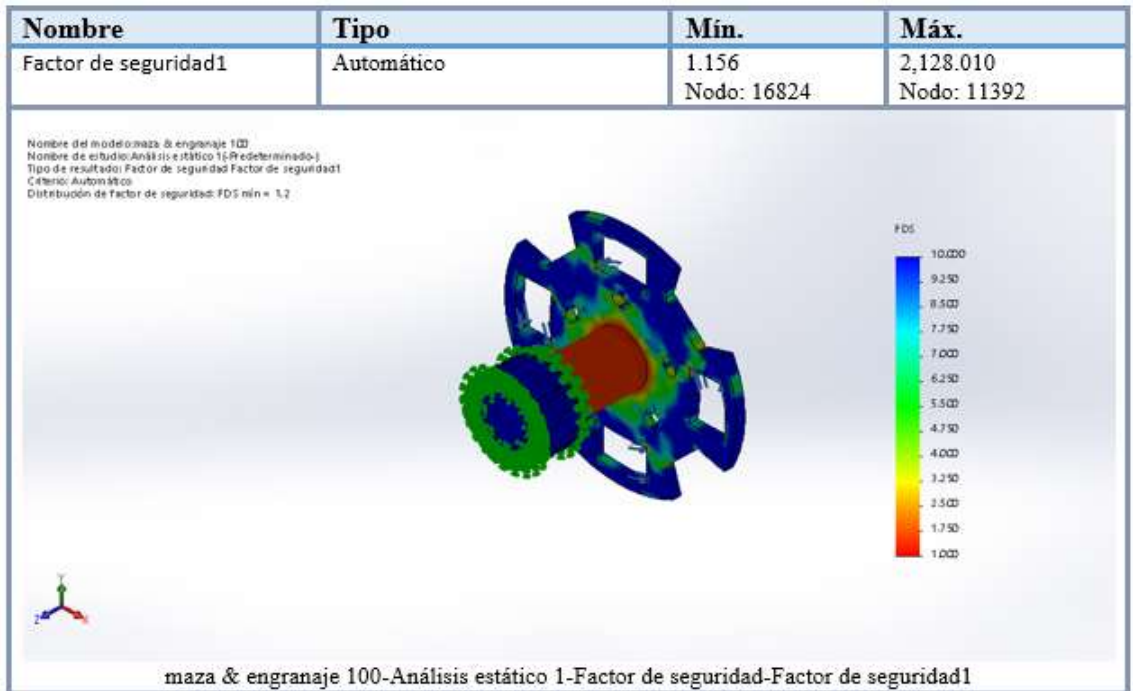
Información de malla – detalles

Número total de nodos	17806
Número total de elementos	9579
Cociente máximo de aspecto	7.8262
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	95.2
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:02
Nombre de computadora:	PCSOLUTION





Resultados del estudio






ANÁLISIS ESTÁTICO RESORTE PRINCIPAL



Información del modelo

			
Nombre del modelo: resorte principal Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Redondeo6 	Sólido	Masa:0.0278067 kg Volumen:3.65457e-006 m ³ Densidad:7608.75 kg/m ³ Peso:0.272506 N	E:\tesis\diseño\cople 100\resorte principal.SLDPRT May 04 19:03:01 2020

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: 1.2842 (90MnCrV8) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 1.75e+009 N/m² Límite de tracción: 1.93e+009 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7610 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin	Sólido 1(Redondeo6)(resorte principal)
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0.0192686	643.778	0.025079	643.778
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0
Geometría de referencia-1		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Utilizar geometría de referencia Traslación: ---, ---, -3 Unidades: mm		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0	0.0628726	0	0.0628726
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

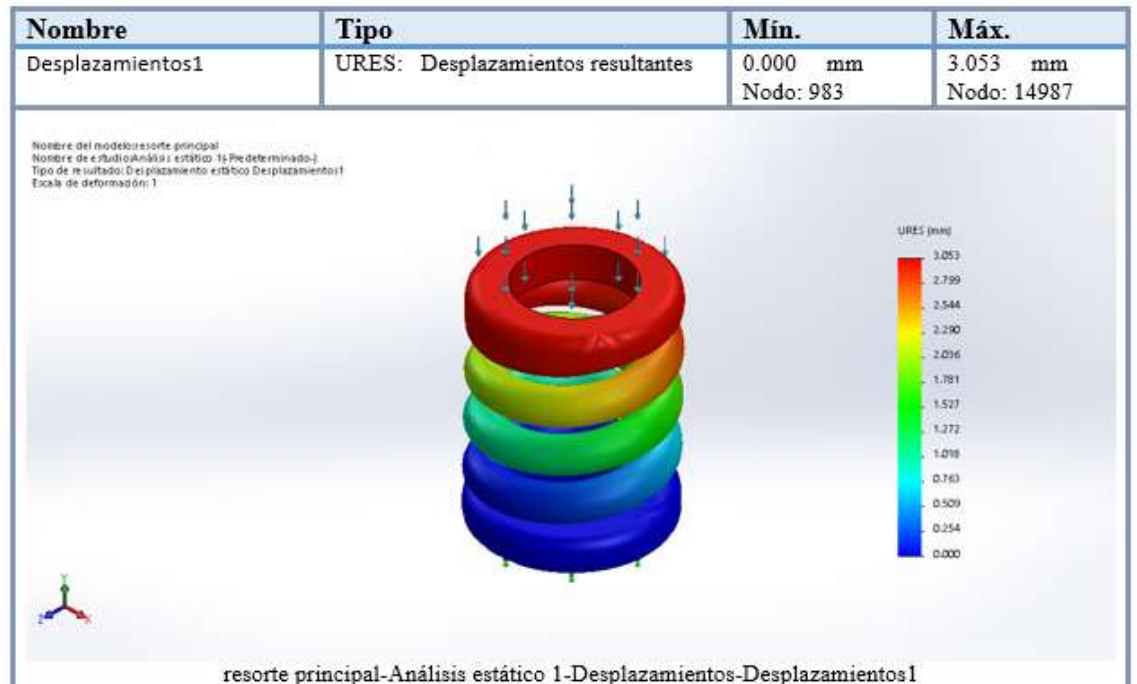
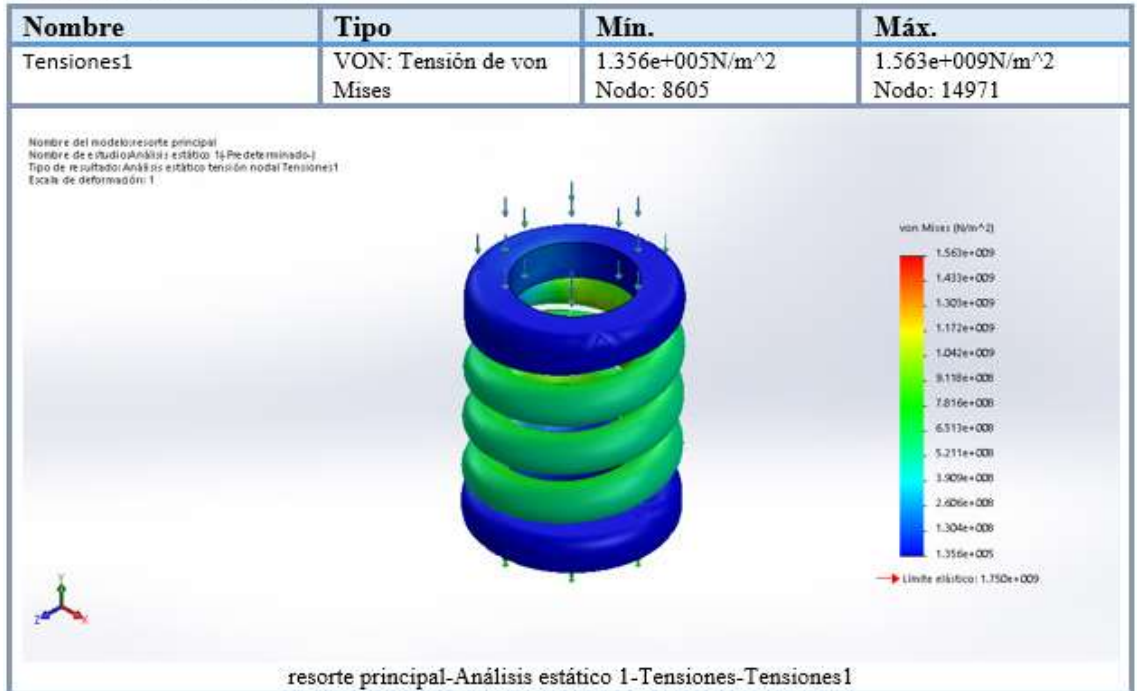
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 2500 N

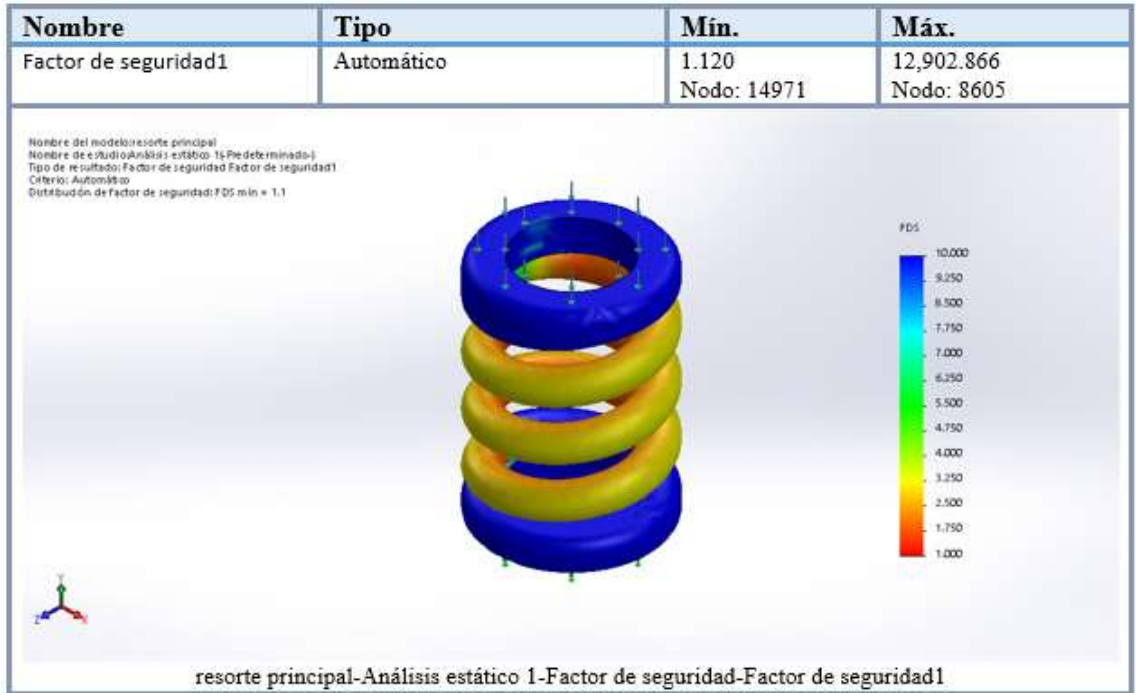
Información de malla – detalles

Número total de nodos	15004
Número total de elementos	8512
Cociente máximo de aspecto	17.364

% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	93.7
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.0822
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:08
Nombre de computadora:	PCSOLUTION
<p>Nombre del modelo/resorte principal Nombre de estudio/Análisis externo: (si no determinado) Tipo de malla: Malla sólida</p> 	

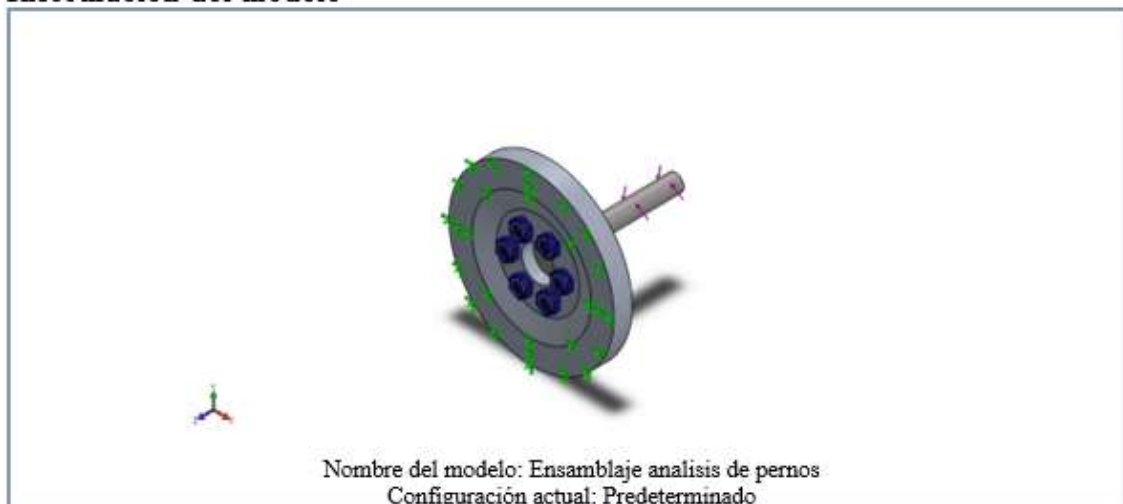
Resultados del estudio









ANÁLISIS ESTÁTICO PERNOS DE CONEXIÓN

Información del modelo



Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Cortar-Extruir4 	Sólido	Masa:1.59459 kg Volumen:0.000569496 m ³ Densidad:2800 kg/m ³ Peso:15.627 N	E:\tesis\diseño\disco de aluminio.SLDPRT May 04 15:38:39 2020
Saliente-Extruir2 	Sólido	Masa:0.492554 kg Volumen:6.3148e-005 m ³ Densidad:7800 kg/m ³ Peso:4.82703 N	E:\tesis\diseño\ eje de coneccion - caja de cambios.SLDPRT May 04 15:52:53 2020

Propiedades del material


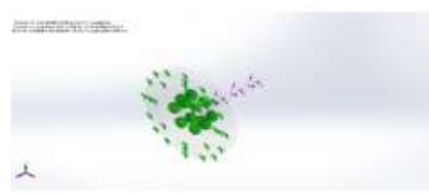
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: 3.1255 (EN-AW 2014) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 2.4e+008 N/m² Límite de tracción: 3.95e+008 N/m² Módulo elástico: 7e+010 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.3897 Densidad: 2800 kg/m³ Módulo cortante: 2.7e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 2.4e-005 /Kelvin	Sólido 1(Cortar-Extruir4)(disco de aluminio-1)
Datos de curva:N/A		
	Nombre: 1.0144 (S275J2G3) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 2.75e+008 N/m² Límite de tracción: 4.3e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin	Sólido 1(Saliente-Extruir2)(eje de conexión - caja de cambios-1)
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-11.8326	1.68482	-0.000936031	11.952
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0


Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m

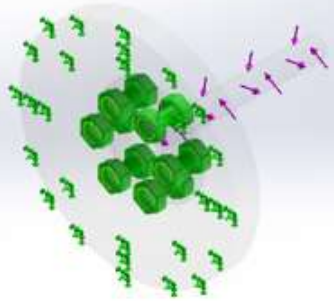
Resultados

Referencia de modelo	Detalles del conector	Detalles de resistencia						
 Refrentado con tuerca-1	Entidades: 2 arista(s) Tipo: Tornillo(Diámetro de la cabeza/tuerca) Diámetro de la cabeza: 20 mm Diámetro de tuerca: 20 mm Diámetro del vástago nominal: 12 Precarga (Torsión): 1000 Módulo de Young: 2.1e+011 Cociente de Poisson: 0.28 Unidades de precarga: kgf.cm	<table border="1"> <tr> <td>Comprobación de perno:</td> <td>Aceptar</td> </tr> <tr> <td>FDS calculado:</td> <td>1.51623</td> </tr> <tr> <td>FDS deseado:</td> <td>1</td> </tr> </table> 	Comprobación de perno:	Aceptar	FDS calculado:	1.51623	FDS deseado:	1
Comprobación de perno:	Aceptar							
FDS calculado:	1.51623							
FDS deseado:	1							

Fuerzas del conector

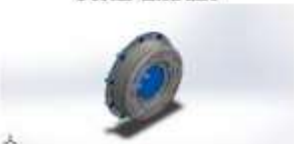
Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Fuerza axial (N)	0	0	40852	40852
Fuerza cortante (N)	2219.8	1234.1	0	2539.8
Momento flector (N.m)	9.5961	-18.022	0	20.417

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto			
Contacto-1		Tipo: Sin par de contacto de penetración Entidades: 2 cara(s) Avanzado: Nodo a superficie			
Fuerza de contacto/rozamiento					
Componentes		X	Y	Z	Resultante
Fuerza de contacto(N)		0	0	-5.0636E-010	5.0636E-010


Nombre	Tipo
Comprobación de pasador/perno1	Resultados de perno y pasador estáticos
<p>Nombre del modelo: Ensamblaje análisis de pernos Nombre de estudio: Análisis estático 1-Pre-determinado-1 Tipo de resultado: Resultados de perno y pasador estáticos</p>  <p>Ensamblaje análisis de pernos-Análisis estático 1-Comprobación de pasador-perno-Comprobación de pasador-perno1</p>	




Nombre del modelo: Ensamblaje analisis pernos plato-volante
Configuración actual: Predeterminado


Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Cortar-Extruir11</p>	Sólido	Masa:1.24453 kg Volumen:0.000159556 m ³ Densidad:7800 kg/m ³ Peso:12.1964 N	E:\tesis\diseño\plato presor.SLDPRT May 11 20:39:37 2020
 <p>Cortar-Extruir5</p>	Sólido	Masa:1.02202 kg Volumen:0.000131028 m ³ Densidad:7800 kg/m ³ Peso:10.0158 N	E:\tesis\diseño\volante de inercia.SLDPRT May 11 20:39:36 2020

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: 1.7030 (28Cr4) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 6.5e+008 N/m² Límite de tracción: 8.5e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28	Sólido 1(Cortar-Extruir11)(plato presor-1)

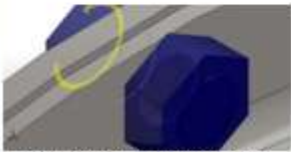

	Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin	
Datos de curva:N/A		
	Nombre: 1.0114 (S235J0) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 2.35e+008 N/m² Límite de tracción: 3.6e+008 N/m² Módulo elástico: 2.1e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7800 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin	Sólido 2(Cortar-Extruir5)(volante de inercia-1)
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0.0121498	-0.0958767	0.00570703	0.0968118
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

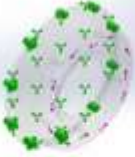
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 500 N.m

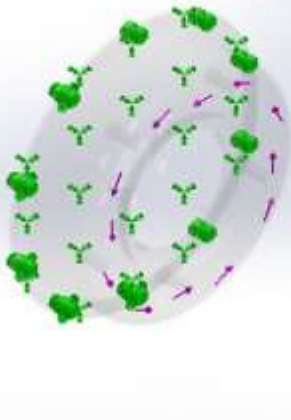
Resultados

Referencia de modelo	Detalles del conector	Detalles de resistencia						
 <p>Refrentado con tuerca-10</p>	Entidades : 2 arista(s) Tipo: Tornillo(Diámetro de la cabeza/tuerca)(Refrentado) Diámetro de la cabeza: 10.5 mm Diámetro de tuerca: 10.5 mm Diámetro del vástago nominal: 7 Precarga (Torsión): 120 Módulo de Young: 2.1e+011 Cociente de Poisson: 0.28 Unidades de precarga: kgf.cm	<table border="1"> <tr> <td>Comprobación de perno:</td> <td>Aceptar</td> </tr> <tr> <td>FDS calculado:</td> <td>2.40861</td> </tr> <tr> <td>FDS deseado:</td> <td>1</td> </tr> </table> 	Comprobación de perno:	Aceptar	FDS calculado:	2.40861	FDS deseado:	1
Comprobación de perno:	Aceptar							
FDS calculado:	2.40861							
FDS deseado:	1							

Fuerzas del conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Fuerza axial (N)	-8428.6	0	0	8428.6
Fuerza cortante (N)	0	-128.6	-589.34	603.21
Momento flector (N.m)	0	1.4162	-0.32834	1.4538

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto		
Contacto-1		Tipo: Sin par de contacto de penetración Entidades: 2 cara(s) Avanzado: Nodo a superficie		
Fuerza de contacto/rozamiento				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de contacto(N)	1.5135E-010	0	0	1.5135E-010

Nombre	Tipo
Comprobación de pasador/perno1	Resultados de perno y pasador estáticos
<p data-bbox="368 595 683 640"> <small>Nombre de la edición: Ensamblaje análisis pernos plato-volante Nombre de estudio: Análisis estático (1-Res del ensamblado) Tipo de resultado: Resultados de perno y pasador estáticos</small> </p>  <p data-bbox="368 1115 1458 1173"> Ensamblaje análisis pernos plato-volante-Análisis estático 1-Comprobación de pasador-perno-Comprobación de pasador-perno1 </p>	