



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

INSTITUTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y AUTOMOTRIZ

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE FRENO ELECTROMAGNÉTICO
AUTOMOVILÍSTICO”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL**

PRESENTA:

MAURO ISRAEL CARAVANTES JUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS:

M.E.D.I. HERIBERTO I. HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

H. CD. DE HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA ENERO DE 2021

Dedicatoria

A mi padre, por impulsarme a tomar esas decisiones de gran dificultad e importancia.

A mis hermanos, con quienes siempre he contado en cada momento de mi vida.

En especial a la persona que más me inspira en este mundo, mi madre, por su constante, inagotable e incondicional apoyo y amor.

A mi familia, quienes en cada instante del camino lucharon por mi bienestar, educación y salud. No hay nadie en este mundo a quien le deba más amor y agradecimiento.

A mi abuelo, quien con sus palabras y acciones me inculcó y enseñó el valor y amor a la familia, Siempre te extrañaré.

Mauro Israel

Agradecimientos

A mis amigos Set Melchor, Edgar Méndez, Miguel Ángel Torralba, Ángel Ibáñez, Lupita Jarquín y Daniela García, con quienes compartí muchas noches de trabajo y desvelo, pero también momentos inolvidables.

A la plantilla de profesores de Ingeniería Industrial y demás institutos, quienes siempre estuvieron disponibles para guiarme y enseñarme en el transcurso de mi estancia universitaria.

A mi director de tesis M.E.D.I. Heriberto I. Hernández Martínez, por la confianza y seguridad brindada para desarrollar este proyecto, así como el apoyo mostrado en todo momento.

Mauro Israel

Resumen

En la actualidad, la industria automotriz cuenta con una gran cantidad de sistemas de frenado, cuyo principio de funcionamiento está basado en el efecto de la fricción generada por el contacto entre un disco de freno y una pastilla o balata de freno, y que a su vez es el causante del deterioro y de la mayoría de fallas del sistema de frenado. Por tal motivo, en este proyecto se presenta una alternativa de frenado cuyo principio de funcionamiento no se basa en la fricción, sino, en una fuerza magnética de frenado resultante al introducir una corriente eléctrica dentro de un campo magnético.

Para llevar a cabo este proyecto se siguieron las dos primeras etapas de la metodología QFD, la cual es una metodología que se enfoca en la satisfacción de las necesidades de los usuarios, llevándolas a través de las distintas etapas de diseño hasta la obtención de un producto o servicio. Inicialmente, fue necesario identificar y comprender las distintas variables que intervienen en el proceso de frenado de un automóvil, así como las necesidades que deben satisfacer estos sistemas, sus tipos y principios de funcionamiento. Se analizaron las variables involucradas en un frenado electromagnético automovilístico, con estos datos fue posible la elaboración de la primera etapa de la metodología QFD correspondiente a la casa de la calidad, donde se determinaron los requerimientos de un freno electromagnético y sus medios de satisfacción, los cuales posteriormente se llevaron a la segunda etapa de la metodología QFD para poder realizar la matriz de partes o diseño.

A partir de la elaboración de las dos primeras etapas de la metodología QFD se pudo realizar el modelo 3D, tanto de las distintas partes que comprenden el sistema de frenado, como del sistema mismo. Por último, se realizó el modelado en LabVIEW para comprobar de manera virtual el funcionamiento del sistema de frenado diseñado.

Índice general

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	v
Resumen	vii
Índice general.....	ix
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tablas	xvii
Glosario de términos.....	xix
Capítulo 1. Marco de referencia	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación	6
1.4. Objetivos.....	8
1.4.1. Objetivo general.....	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
1.5. Metas	9
1.6. Metodología de desarrollo	9
Capítulo 2. Marco teórico	12
2.1. Clasificación de los frenos	12
2.1.1. Dispositivos especiales	19
2.2. Evolución de los sistemas de freno	21
2.3. Frenos electromagnéticos	24
2.4. Hipótesis de cálculos.....	28
2.4.1. Fuerzas y efectos presentes en el proceso de frenado.....	29
2.4.1.1. Fuerza de frenado	30
2.4.1.2. Resistencia a la rodadura.....	30
2.4.1.3. Resistencia del motor y transmisión	32
2.4.1.4. Reparto de cargas	32
2.4.1.5. Deslizamiento.....	33
2.4.1.6. Transferencia de peso	37

2.4.1.7. Efecto rampa pendiente.....	38
2.4.2. Dinámica del proceso de frenado	38
2.4.3. Cálculos de diseño del freno	39
2.4.3.1. Centro de gravedad del vehículo.....	40
2.4.3.2. Requerimientos de frenado.....	43
2.4.3.3. Reparto óptimo de la fuerza de frenado.....	46
2.4.3.4. Desaceleración del vehículo.....	47
2.4.3.5. Velocidad en un tiempo t	48
2.4.3.6. Tiempo de parada.....	50
2.4.3.7. Distancia de frenado total	50
2.4.3.8. Resistencia a la rodadura	51
2.4.3.9. Eficacia de frenado.....	52
2.4.3.10. Requerimientos técnicos de diseño	52
2.5. Características de las partes	56
2.5.1. Tratamiento superficial	56
2.5.2. Selección del material.....	59
Capítulo 3. Resolución del problema.....	62
3.1. Metodología QFD	62
3.1.1. Etapa I QFD	62
3.1.1.1. Identificación de los requerimientos del sistema de freno electromagnético.....	62
3.1.1.2. Ponderar los requerimientos del usuario	63
3.1.1.3. Matriz de comparación con la competencia.....	64
3.1.1.4. Requerimientos de ingeniería	65
3.1.1.5. Matriz de sensibilidad	66
3.1.1.6. Matriz de correlación	67
3.1.1.7. Cuantificación de los objetivos	67
3.1.1.8. Tiempo de respuesta	68
3.1.1.9. Corrientes parásitas	68
3.1.1.10. Fuerza de frenado	69
3.1.1.11. Fiabilidad del sistema.....	69
3.1.1.12. Cantidad de piezas.....	70

3.1.1.13. Tiempo de vida	71
3.1.1.14. Amplitud del campo magnético.....	73
3.1.1.15. Tipo de recubrimiento	73
3.1.1.16. Peso y tamaño del disco.....	76
3.1.1.17. Piezas estándar.....	76
3.1.1.18. Diseño del sistema	77
3.1.1.19. Tiempo de montaje.....	78
3.1.1.20. Tiempo de mantenimiento	78
3.1.1.21. Puntuación	79
3.1.2. Etapa II QFD	80
3.1.2.1. Identificar los medios de satisfacción de los requerimientos de ingeniería	83
3.1.2.2. Realizar la matriz de sensibilidad con los medios de satisfacción.....	84
3.1.2.3. Matriz de correlación: requerimientos de ingeniería y sus medios de satisfacción.....	84
3.1.2.4. Cuantificar los objetivos de los medios de satisfacción	85
3.1.2.5. Circuito electromagnético.....	85
3.1.2.6. Campo magnético constante	86
3.1.2.7. Suministro y regulación de corriente i	86
3.1.2.8. Reducción de la cantidad de piezas	86
3.1.2.9. Selección de componentes con alta tasa de vida	87
3.1.2.10. Diseño del electroimán	87
3.1.2.11. Diseño del sistema	88
3.1.2.12. Puntuación final	89
3.2. Diseño del sistema de freno electromagnético	89
Capítulo 4. Modelado del sistema de freno electromagnético	94
4.1. Modelado en SolidWorks	94
4.2. Modelado en LabVIEW del sistema de freno electromagnético.....	105
4.2.1. Sistema de regulación de frenado (pedal de freno).....	105
4.2.2. Sistema de aceleración del vehículo	106
4.2.3. Cálculo del campo magnético generado por los electroimanes	108
4.2.4. Cálculo del delta de velocidad generado por la fuerza electromagnética generada	109
4.3. Prueba de caja negra	114

Capítulo 5. Conclusiones	119
Referencias bibliográficas.....	123
Anexo A: Listado de planos	1

Índice de figuras

Figura 1.1. Diagrama de bloques de un sistema de frenos convencional (Elaboración propia)....	4
Figura 1.2. Diagrama de bloques del sistema de freno electromagnético (Elaboración propia)...	4
Figura 1.3. Diagrama a bloques de la metodología empleada (Elaboración propia).	9
Figura 2.1. Clasificación de los frenos (Elaboración propia).....	13
Figura 2.2. Sistemas de frenos según la ISO (Elaboración propia).	16
Figura 2.3. Dispositivos especiales de frenado (Elaboración propia).	20
Figura 2.4. Fuerza magnética sobre una carga dentro de un campo magnético (Elaboración propia).....	26
Figura 2.5. Fuerza transmitida según la corriente en el conductor (Elaboración propia).	26
Figura 2.6. Resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica (Flores & Remache, 2014). .	32
Figura 2.7. Fuerzas principales en el proceso de frenado (Criado Ocaña, 2012).	33
Figura 2.8. Reparto de cargas durante el frenado (Criado Ocaña, 2012).	33
Figura 2.9. Condición de frenado trasero a) Normal; b) de bloqueo (Elaboración propia).	34
Figura 2.10. Deslizamiento por bloqueo de las ruedas traseras (Criado Ocaña, 2012).	34
Figura 2.11. Condición de frenado delantero a) Normal; b) de bloqueo (Elaboración propia). ...	36
Figura 2.12. Círculo de adherencia (Elaboración propia).	37
Figura 2.13. Efecto rampa pendiente sobre un vehículo (Flores & Remache, 2014).	38
Figura 2.14. Fuerzas sobre un vehículo durante el frenado (Criado Ocaña, 2012).	40
Figura 2.15. Altura del centro gravedad de un vehículo (Elaboración propia).	42
Figura 2.16. Reparto óptimo de frenado (Criado Ocaña, 2012)	47
Figura 2.17. Resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica (Flores & Remache, 2014). 51	
Figura 3.1. Matriz de sensibilidad (Elaboración propia).....	66
Figura 3.2. Matriz de correlación (requerimientos del freno electromagnético vs requerimientos de ingeniería) (Elaboración propia).	67
Figura 3.3. Funciones de tasas de fallos para la distribución de Weibull (Muñoz Abella, 2003).	70
Figura 3.4. Sistema en serie del freno electromagnético (simplificado) (Elaboración propia)....	71
Figura 3.5. Sistema en paralelo de los frenos de un automóvil (Elaboración propia).	71
Figura 3.6. Curva de la bañera (Adaptado de Muñoz Abella, 2003).	72
Figura 3.7. Casa de la calidad (Plantilla obtenida de http://www.QFDOnline.com).....	81

Figura 3.8. Matriz de sensibilidad de los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia). ..	84
Figura 3.9. Matriz de correlación (requerimientos de ingeniería vs medios de satisfacción) (Elaboración propia).....	85
Figura 3.10. QFD, partes y componentes (Plantilla obtenida de http://www.QFDOnline.com). ..	91
Figura 4.1. Perfil de disco de freno (Elaboración propia).	94
Figura 4.2. Disco de freno sólido (Elaboración propia).	94
Figura 4.3. Propiedades mecánicas del material Aluminio 2024-0 (Elaboración propia).	95
Figura 4.4. Propiedades físicas del disco (Elaboración propia).	95
Figura 4.5. Matriz de embobinado trasero (6x16 + 7x17 vueltas) (Elaboración propia).	96
Figura 4.6. Matriz de embobinado delantero (6x22 + 7x23 vueltas) (Elaboración propia).	96
Figura 4.7. Embobinado trasero obtenido con la operación revolución (215 vueltas) (Elaboración propia).....	96
Figura 4.8. Embobinado delantero obtenido con la operación revolución (293 vueltas) (Elaboración propia).....	97
Figura 4.9. Asignación de material para embobinado trasero y delantero cobre (Elaboración propia).....	97
Figura 4.10. Propiedades físicas del embobinado trasero (Elaboración propia).	98
Figura 4.11. Propiedades físicas del embobinado delantero (Elaboración propia).	98
Figura 4.12. Perfil del núcleo delantero (Elaboración propia).	99
Figura 4.13. Perfil del núcleo trasero (Elaboración propia).	99
Figura 4.14. Núcleo delantero (sólido) (Elaboración propia).....	100
Figura 4.15. Núcleo trasero (sólido) (Elaboración propia).....	100
Figura 4.16. Asignación de material para el núcleo delantero y trasero. Fundición gris (Elaboración propia).....	101
Figura 4.17. Propiedades físicas del núcleo delantero (Elaboración propia).	101
Figura 4.18. Propiedades físicas del núcleo trasero (Elaboración propia).	102
Figura 4.19. Ensamble freno delantero (Elaboración propia).	102
Figura 4.20. Ensamble freno trasero (Elaboración propia).	103
Figura 4.21. Modelo 3D de la suspensión frontal (Elaboración propia).	103
Figura 4.22. Modelo en 3D de la suspensión trasera (Elaboración propia).....	104
Figura 4.23. Modelo 3D del neumático (Elaboración propia).	104
Figura 4.24. Modelo 3D del pedal de freno (Elaboración propia).....	104

Figura 4.25. Modelo 3D de la batería (Elaboración propia).	105
Figura 4.26. Ensamble final del sistema de frenos electromagnéticos (Elaboración propia). ..	105
Figura 4.27. Controlador numérico tipo Scrollbar para pedal de freno y acelerador (Elaboración propia).....	106
Figura 4.28. Valor máximo y mínimo del pedal de freno (Elaboración propia).	106
Figura 4.29. Límites de aceleración (Elaboración propia).	107
Figura 4.30. Operadores matemáticos disponibles en LabVIEW (Elaboración propia).....	108
Figura 4.31. Modelo en LabVIEW del campo magnético generado por los electroimanes diseñados (Elaboración propia).	109
Figura 4.32. Modelo en LabVIEW de la velocidad angular final tras un lapso de tiempo t (Elaboración propia).	109
Figura 4.33. Modelado en LabVIEW de la variable k de la ecuación 22 (Elaboración propia). ..	110
Figura 4.34. Modelado en LabVIEW de la variable I_0 (Inercia del disco de freno) (Elaboración propia).....	110
Figura 4.35. Estructuras de LabVIEW utilizadas en el modelado de un freno electromagnético (Elaboración propia).	111
Figura 4.36. Flat Sequence de las variables de frenado involucradas en la Ecuación 31 (Elaboración propia).	112
Figura 4.37. Case Structure verdadero para generar la aceleración de un vehículo (Elaboración propia).....	112
Figura 4.38. Case Structure verdadero para generar el frenado del vehículo (Elaboración propia).	113
Figura 4.39. Case Structure verdadero para el conteo del tiempo de frenado (Elaboración propia).	113
Figura 4.40. Código en LabVIEW para el modelado de un freno electromagnético (Elaboración propia).....	114
Figura 4.41. Estado inicial de la prueba $v=180\text{km/h}$; $\mathbf{B}=0$ (Elaboración propia).	115
Figura 4.42. Prueba 1. $\mathbf{B}=0.437\text{ T}$; $t=34\text{ seg}$ (Elaboración propia).	115
Figura 4.43. Velocidad según el tiempo y el campo magnético aplicado (Elaboración propia). ..	116
Figura 4.44. Prueba 2. $\mathbf{B}=0.526\text{ T}$; $t=26\text{ seg}$ (Elaboración propia).	118
Figura 4.45. Prueba 3. $\mathbf{B}=0.259\text{ T}$; $t=29\text{ seg}$ (Elaboración propia).	118

Índice de tablas

Tabla 2.1. Coeficientes de rodadura (Flores & Remache, 2014).	31
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de automóviles (Elaboración propia).	41
Tabla 2.3. Clasificación de los materiales magnéticos (Rodríguez Pozueta, 2014).	59
Tabla 3.1. Requerimientos del freno electromagnético (Elaboración propia).	63
Tabla 3.2. Clasificación por conjunto de atributos (Elaboración propia).	63
Tabla 3.3. Asignación de pesos y pesos relativos a los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).....	64
Tabla 3.4. Comparación con productos similares (Elaboración propia).	65
Tabla 3.5. Traducción a requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).....	65
Tabla 3.6. Simbología de la matriz de correlación (Elaboración propia).....	67
Tabla 3.7. Cuantificación de objetivos de los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).	68
Tabla 3.8. Asignación de puntuaciones absolutas y relativas a los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).	80
Tabla 3.9. Medios de satisfacción de los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia). ...	83
Tabla 3.10. Cuantificación de objetivos de los medios de satisfacción (Elaboración propia).	85
Tabla 3.11. Ventajas y desventajas de diseño comparando las opciones 1 y 2 (Elaboración propia).	89
Tabla 4.1. Tiempo de aceleración de 0 a 100 km/h en vehículos en mercado (Elaboración propia).	108
Tabla 4.2. Distancia recorrida según el tiempo de frenado y campo magnético aplicado (Elaboración propia).	117

Glosario de términos

ABS: *Antilock Brake System*/Sistema Antibloqueo de freno.

Airbag: Bolsa de aire.

Alabeado: Fenómeno producido por un sobrecalentamiento de la superficie de frenado que provoca una deformación en el disco.

ASR: *Anti Slip Regulation*/Regulación Antideslizante.

CAD: *Computer Aided Design*/Diseño Asistido por Computadora.

Cradán: Articulación empleada en mecánica para transmitir un movimiento de rotación en direcciones distintas.

Cristalización: Calentamiento brusco del disco de freno que transforma la estructura del material.

DIN: *Deutsches Institut für Normung*/Instituto Alemán de Estandarización

EBD: *Electronic Brake Distribution*/Distribución Electrónica de Freno

ECU: *Electronic Control Unit*/Unidad Electrónica de Control.

Efecto Hall: Acumulación de carga a lo largo de uno de los extremos de un material y una correspondiente diferencia de carga en el lado opuesto que generan un campo eléctrico.

ESB: *Electronic Brake System*/Sistema de Freno Electrónico.

ESP: *Electronic Stability Program*/Programa de Estabilidad Electrónica.

Global NCAP: *Global New Car Assessment Program*/Programa Global de Evaluación de Automóviles Nuevos.

HOQ: *House of Quality*/Casa de la Calidad.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Inhibidores: Toda sustancia que se agrega, en concentraciones pequeñas, a un medio para evitar la corrosión o disminuir su velocidad.

ISO: *International Standard Organization*/Organización Internacional de Estandarización

Pasivadores: Son sustancias que producen una película no porosa e insoluble sobre las piezas metálicas, impidiendo la corrosión.

Piolas: Soga de escaso grosor y extensión considerable.

QFD: *Quality Function Deployment*/Despliegue de la Función de la Calidad.

Rayado: La formación de rayas o surcos profundos causador por la interposición de diferentes materiales entre la pastilla y el disco de freno.

Rotura: Crecimiento de una grieta, hasta romper parcial o totalmente el disco de freno.

TCS: *Traction Control System*/Sistema de Control de Tracción.

Capítulo 1. Marco de referencia

1.1. Antecedentes

El sistema de frenos es el componente más importante para la seguridad vial del automóvil, ya que de éste depende el frenado total o parcial del vehículo, y, en consecuencia, la integridad de sus pasajeros y peatones. Generalmente, el 70% de la energía cinética producida en el movimiento es absorbida por los frenos de disco delanteros, y el restante por los frenos traseros, que suelen ser de tambor. Estos sistemas utilizan la fricción para detener el movimiento del vehículo, siendo activados mediante presión hidráulica, la cual empuja las pastillas de freno contra el disco, que por lo general es de hierro fundido. En consecuencia, el efecto que produce este tipo de dispositivos, a través de la energía cinética, es crear un calor considerablemente alto durante el frenado, aumentando así la temperatura por fricción. Este calor se disipa rápidamente con el aire circundante por medio del fenómeno de convección (transferencia de calor que se produce entre masas a diferente temperatura), dicho fenómeno depende de la geometría del disco y del material del que se fabrica. Los factores ambientales también son determinantes para que la etapa de transferencia de calor se produzca. Además, cuando la temperatura alcanza valores elevados aparece el fenómeno de radiación, el cual también ayuda a disipar la energía en forma de calor almacenada en el disco. Bajo estas condiciones, se ponen en riesgo tanto la funcionalidad como la seguridad del sistema de freno (Flores & Remache, 2014).

La circulación por caminos rurales sinuosos con pendientes medias a pronunciadas, la caída de lluvia o nieve y la formación de capas de hielo sobre la carretera (también conocida como hielo negro), obligan al usuario a desplazarse a bajas velocidades pues en situaciones de lluvia, nieve o hielo, el coeficiente de adherencia disminuye considerablemente, provocando inestabilidad extrema y pérdida de control del vehículo en desaceleración elevada y en curvas, incluso en

pendientes nulas, obligando al usuario hacer un mayor uso de los frenos del vehículo, ocasionando así un desgaste anormal del freno. Asimismo, cuando se transita en zonas montañosas el uso excesivo del freno por fricción genera un calentamiento elevado del sistema y por lo tanto una merma considerable en su rendimiento.

En el año 2012, se llevó a cabo el Congreso Internacional de la Sominm en Salamanca, México; en dicho congreso se presentó el artículo “Frenado de un disco metálico mediante el dipolo electromagnético”, el cual funciona a partir de la teoría de las imágenes que retroceden propuesta por James Clerk Maxwell. Para esta investigación se consideraron distintos materiales para fabricar el disco, entre ellos acero, aluminio y cobre; como resultados se obtuvieron distintos pares de frenado para cada material y observaron que el acero es el que proporciona un mayor par de frenado y el cobre el que menos, llegando a la conclusión que aquellos materiales conductores de electricidad no generan altos pares de torsión, y que a mayor velocidad del móvil el par de frenado disminuye, requiriendo así una mayor cantidad de electroimanes (Hernández & Rojas, 2012).

Por otra parte, en 2013 en la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, se diseñó y construyó un prototipo de freno electromagnético para su uso en el laboratorio de física. Dicho prototipo se ha adaptado para que el estudiante pueda experimentar y calcular las variaciones de la intensidad del campo magnético y del tiempo total de frenado (Arango, Sabogal & Idárraga, 2013).

En la 12^{va} Conferencia Internacional de Proyectos de Ingeniería, se presentó “El proceso de diseño de un servofreno electromagnético con función ABS: Gestión del conocimiento de la empresa”, que describe la metodología para desarrollar un servofreno electromagnético. El proyecto dio lugar a un producto novedoso en el que el sistema de frenos se acopla a cada rueda de forma independiente, aportando la presión y el volumen necesario en función de los

requerimientos del entorno vehículo-carretera. Además, incorpora un control electrónico ABS simplificado, obteniendo como resultado un diseño de servofreno con ventajas respecto a reciclaje, cantidad de piezas y uso de materiales contaminantes (Villanueva, Martínez & Pérez, 2008).

1.2. Planteamiento del problema

El sistema de freno de un automóvil debe trabajar de forma segura y predecible bajo cualquier circunstancia, es decir, un sistema de freno debe proporcionar un nivel estable de fricción (fuerza de frenado) bajo cualquier condición de temperatura, humedad y salinidad del medio ambiente. Para un correcto diseño y operación de un sistema de freno, es necesario considerar diferentes aspectos, tales como: la geometría, el tipo de material, la resistencia mecánica, la temperatura máxima, la deformación térmica y la resistencia al agrietamiento, entre otros.

Actualmente, se vive una época en la que la conciencia medioambiental experimenta un gran auge, esto debido a que los combustibles y demás derivados del petróleo con fines automotrices tienen un gran impacto medioambiental a la hora de su uso y deshecho, además de los constantes aumentos de precios a los que son sometidos. Esto ha obligado a que la industria automotriz redefina el concepto tradicional de fabricación de automóviles, surgiendo de esta manera los autos híbridos y los autos eléctricos, los cuales, al poseer gran eficiencia de la energía suministrada por sus baterías, bajo consumo de derivados del petróleo, gran flexibilidad de diseño y conceptos de movilidad completamente nuevos, representan una alternativa al uso de autos de combustión. Sin embargo, aún es necesario prestar especial atención a aquellos mecanismos que por su función requieren nulas probabilidades de fallos y tiempos de respuesta inmediatos, ya que en caso de presentar alguna falla podrían poner en riesgo no sólo al conductor, sino a pasajeros y peatones del área; ejemplos de estos mecanismos son las bolsas de aire (*airbag*) y el sistema de freno del automóvil.

Un sistema de freno convencional está compuesto por distintas partes (Figura 1.1) y al compararse con el de un freno electromagnético (Figura 1.2), es posible observar que existen variaciones en cuanto a la cantidad de partes que los componen. Al verse simplificado, se reducen las probabilidades de falla en el sistema de freno electromagnético.

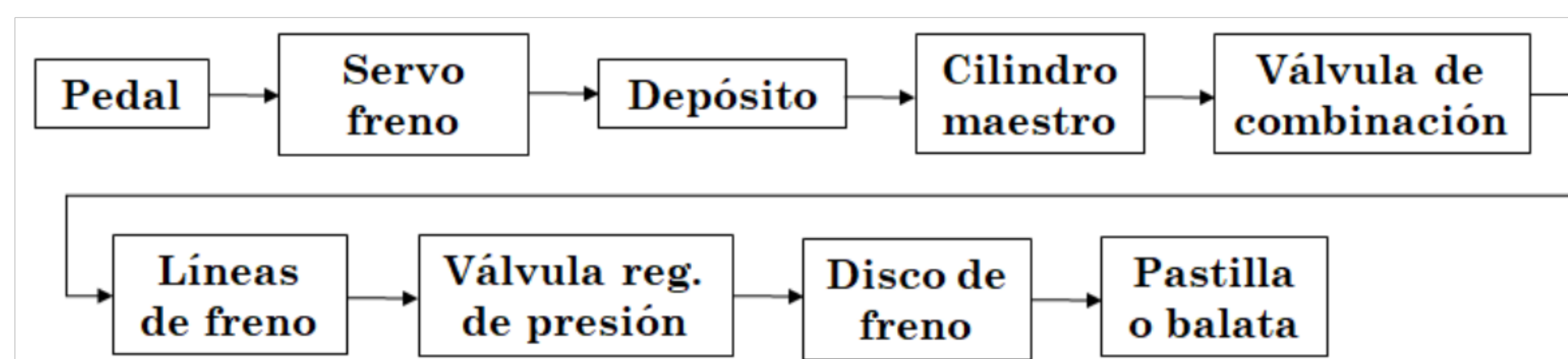


Figura 1.1. Diagrama de bloques de un sistema de frenos convencional (Elaboración propia).

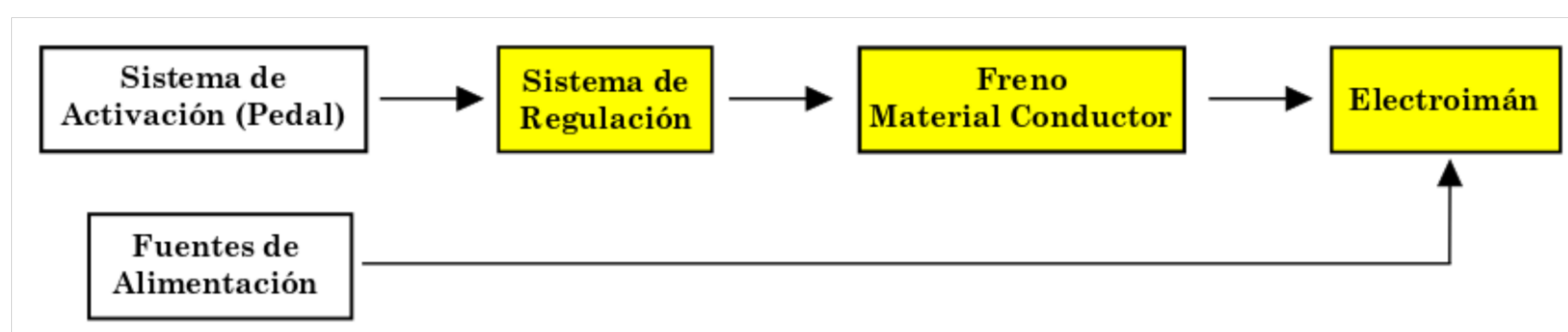


Figura 1.2. Diagrama de bloques del sistema de freno electromagnético (Elaboración propia).

La Figura 1.2 muestra el diagrama de bloques del sistema de freno electromagnético propuesto, donde los recuadros sombreados hacen referencia a aquellas partes que se han de diseñar, mientras que los elementos que se muestran en blanco son partes que existen y a las cuales no se les habrá de hacer ninguna modificación. A continuación, se describen las partes a diseñar en este trabajo de tesis:

- Sistema de regulación: Ayuda a regular la corriente que pasa a través de los electroimanes.
- Electroimán: Imán artificial que genera el campo magnético necesario para realizar el efecto de frenado.
- Disco de freno (material conductor): Disco metálico sobre el que se inducen corrientes parásitas que al entrar al campo magnético generan una fuerza opositora al movimiento relativo.

El incremento de las exigencias y estándares de seguridad, por los usuarios y por organizaciones gubernamentales como no gubernamentales, ha obligado a las compañías automotrices a introducir gradualmente sistemas de

seguridad activa para mejorar tanto la eficacia del frenado (con dispositivos ABS), como la estabilidad del vehículo (con dispositivos EBD) durante el frenado de emergencia; dichos sistemas se utilizan especialmente en terrenos resbaladizos.

Sin embargo, el uso de ABS y EBD no eliminan ni ayudan en la disipación de calor generado en el sistema de freno, es necesario buscar nuevas tecnologías que ayuden a combatir estos problemas; es por ello que el presente trabajo de tesis está enfocado al diseño de un sistema de freno electromagnético automotriz que no genere altas cantidades de calor a pesar de estar en constante uso, además de que tenga alta capacidad de disipación de calor.

Por otra parte, la metodología Despliegue de la Función de la Calidad (QFD, *Quality Function Deployment*) fue diseñada para identificar las características de calidad de un producto o servicio. Esta metodología parte de la identificación de los requerimientos del mercado (“voz del cliente”) desde etapas tempranas de diseño, los cuales a través de un proceso estructurado por medio de matrices (comúnmente cuatro) se traducen en requerimientos técnicos (“voz del ingeniero”), centrándose en la evaluación de alternativas de materiales, diseños, especificaciones y requerimientos según las necesidades técnicas requeridas para la obtención del producto o servicio.

Las cuatro etapas que conforman esta metodología son:

- Etapa I: De requerimientos del mercado a características de calidad (Matriz de planeación o casa de la calidad): Esta etapa se usa para comparar los requerimientos deseados por el cliente con los requerimientos técnicos del producto o proceso.
- Etapa II: De características de calidad a características de partes (Despliegue de partes o diseño): De acuerdo a los requerimientos técnicos encontrados en la etapa anterior, es posible decidir por la mejor idea de diseño, determinar sus partes críticas y características además de poder establecer sus valores meta.

- Etapa III: De características de partes a parámetros de procesos (Planificación de procesos): Aquí se busca determinar la mejor combinación entre el diseño y las actividades de manufactura necesarias para la obtención del producto o servicio, asimismo, se buscan determinar sus parámetros críticos y establecer sus valores objetivos.
- Etapa IV: De parámetros de procesos a requerimientos de producción (Control de proceso); en esta etapa se determinan los requerimientos de control de producción, de mantenimiento de producción y de entrenamiento.

Con base en lo anterior, en este trabajo de tesis se propone el diseño de un sistema de freno electromagnético automovilístico en un software CAD (*Computer Aided Design*) y su modelado en LabVIEW, implementando las dos primeras etapas de la metodología QFD.

1.3. Justificación

Global NCAP (*Global New Car Assessment Programme*) es una compañía del Reino Unido orientada a la promoción de la seguridad y de la salud pública, así como de la protección y la preservación de la vida humana en aspectos automotrices. Global NCAP está representada a nivel mundial por distintas sedes como AUSTRALASIA-NCAP (suroeste de Oceanía), ASEAN-NCAP (suroeste de Asia), CNCAP (China-NCAP), Euro-NCAP (Europa), JNCAP (Japón), KNCAP (Corea), Latin-NCAP (Latinoamérica y el Caribe) y U.S. NCAP (Estados Unidos).

El Programa de Evaluación de Vehículos Nuevos para América Latina y el Caribe (Latin NCAP) evalúa la versión básica en seguridad de los modelos disponibles en el mercado brindando a los consumidores información acerca de los niveles de seguridad que ofrecen los diferentes modelos de vehículos del mercado. Latin NCAP basa sus pruebas en métodos internacionalmente

reconocidos y califica entre 0 y 5 estrellas la protección que brindan los vehículos para ocupantes adultos y para ocupantes niños, así como la seguridad activa/primaria. Esta última evalúa, entre otras cosas, el sistema de freno de un automóvil, y según los resultados para modelos 2016, el 26% de éstos cumplen con los requerimientos mínimos establecidos y sólo el 23% han logrado la calificación de 5 estrellas, mientras el 51% restante no cumple con los estándares mínimos necesarios.

En México, durante los años 2011 a 2015, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó un total de 3,651,871 accidentes de tránsito terrestres, de los cuales 2,300,638 han sido accidentes que involucran automóviles de uso particular. Dentro de las principales causas se encuentra el factor “fallas del vehículo”, que suma un total de 22,798 accidentes durante el periodo mencionado; de estos accidentes, 415 han resultado en “accidentes fatales”, es decir con la pérdida de alguna vida humana, 4,718 han sido categorizados como “accidentes no fatales” y 17,665 como “sólo daños materiales”. Todos estos accidentes han cobrado un saldo de 350 vidas perdidas y 4,970 personas heridas.

Una de las principales fallas de los automóviles se encuentra relacionado con su sistema de freno, que en vehículos convencionales funciona con dispositivos activados directamente por el conductor a través de un circuito presurizado, el cual se activa por medio de pistones hidráulicos, los cuales a su vez se activan al presionar el pedal de freno. El principio de funcionamiento de estos dispositivos se da a través de la fricción generada por el contacto entre las almohadillas o balatas y el disco o tambor. A la clasificación de “fallas del vehículo” también se agregan las fallas en el sistema eléctrico y el mal estado de los neumáticos.

Según datos de Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en conjunto con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), los porcentajes de fallas en los frenos correspondientes a la categoría de fallas del vehículo, para los años

2011 a 2016, son de 8.1%, 2.5%, 2.8%, 9.3%, 11.4% y 13.1%, respectivamente (Cuevas Colunga, Villegas Villegas, Mayoral Grajeda & Mendoza Díaz, 2015).

El presente trabajo de tesis propone evitar el frenado a través de la fricción generada por el contacto entre el disco y las pastillas de frenos, contacto que provoca los distintos daños presentes en un disco de freno como son alabeado, rotura, rayado y estrés mecánico. Además, se propone un diseño que permita una adecuada disipación de las corrientes parásitas generadas, de tal manera que el calentamiento en el disco generado por dichas corrientes sea de menor escala que el generado por los frenos convencionales (de fricción), evitando así la aparición de cristalización en el disco de freno y estrés térmico debido a la gran cantidad de energía liberada por efecto de fricción. Todo ello con la finalidad de lograr un impacto positivo en los principales fallos presentados en los sistemas de freno.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de freno electromagnético automovilístico empleando la metodología QFD.

1.4.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos.

- Realizar la matriz de planeación o casa de la calidad.
- Realizar la matriz de despliegue de partes o diseño.
- Diseñar el sistema de freno electromagnético.
- Modelar el sistema de freno electromagnético.
- Realizar pruebas al modelado.

1.5. Metas

- Modelo matemático que describa el fenómeno de frenado electromagnético en un vehículo.
- Modelo 3D para las partes que componen el sistema de frenos electromagnéticos.
- Modelo tridimensional para un sistema de frenos electromagnético.
- Modelo de simulación para el fenómeno de frenado electromagnético en un vehículo.

1.6. Metodología de desarrollo

El desarrollo del presente trabajo de tesis consta de tres etapas, las cuales se muestran en la Figura 1.3.

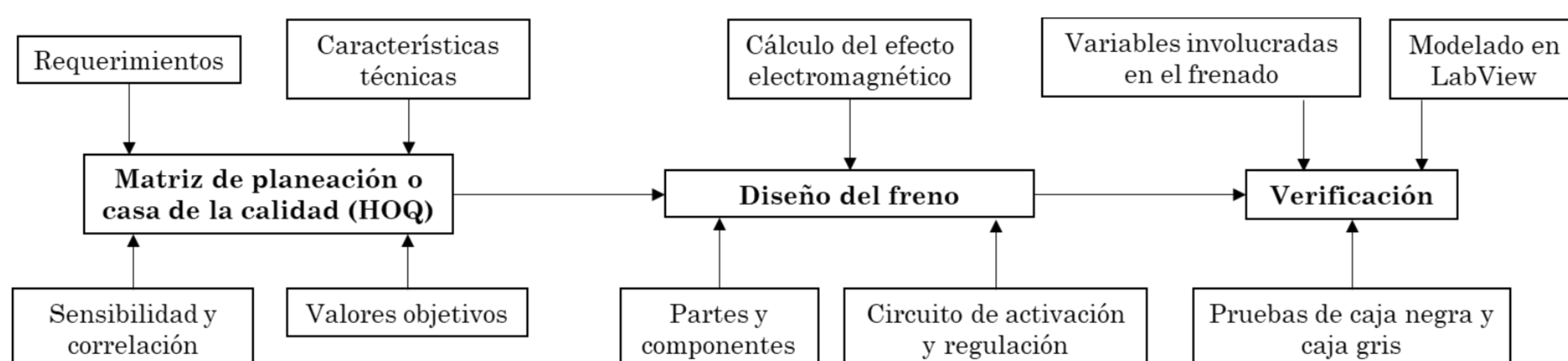


Figura 1.3. Diagrama a bloques de la metodología empleada (Elaboración propia).

La primera de estas etapas corresponde a la elaboración de la primera matriz de la metodología QFD que consiste en desarrollar la matriz de planeación o casa de la calidad (HOQ). Para poder realizar esta primera etapa del proyecto es necesario obtener los requerimientos del sistema de freno electromagnético, los cuales se ponderaron para determinar aquellos a los cuales habrá de prestarles especial atención, ya sea por su importancia dentro del sistema o por su ventaja en comparación a otros sistemas de frenado. Cabe señalar que los requerimientos del sistema se obtuvieron mediante la consulta de normas, artículos, publicaciones y proyectos referentes al desarrollo y/o implementación de este tipo de frenos. Una vez obtenidos y ponderados los requerimientos se traducen en características técnicas para medir el grado de sensibilidad y correlación entre ellos, asimismo, se establecieron y cuantificaron

valores objetivos con la finalidad de identificar las partes críticas que componen el sistema de freno electromagnético y, posteriormente, con toda la información obtenida con esta serie de pasos se procedió con la construcción de la matriz de planeación o casa de la calidad.

La segunda etapa consta del desarrollo de la fase dos de la metodología QFD, en la cual se contempló la elaboración de la matriz de despliegue de partes o diseño. Para poder realizar esta etapa de la metodología, fue necesario realizar los cálculos del efecto electromagnético para determinar las características electromagnéticas que deben satisfacer el freno para un desempeño eficiente, además de ser la base y fundamento del diseño tanto del electroimán (freno) como de la masa metálica (disco de freno) que se encargan de generar el efecto de frenado, así como del circuito de activación y regulación del freno. Una vez obtenido el diseño físico y eléctrico se procedió con la construcción de la matriz de despliegue de partes o diseño QFD, a partir de la cual se especificaron los requerimientos de las partes que componen al sistema de freno electromagnético y se identificaron aquellas partes críticas para su desarrollo. Esta etapa también contempló el desarrollo del modelo 2D y 3D del freno electromagnético, para lo cual se utilizó el software CAD SolidWorks.

La tercera etapa del proyecto constó de la verificación y validación del funcionamiento del freno electromagnético diseñado y desarrollado en la Etapa II, lo cual se realizó con la simulación de aquellas variables que interfieren en el proceso de frenado. Para la validación del funcionamiento se modeló en LabVIEW el sistema de freno electromagnético considerando aquellos factores que influyen en el proceso de frenado de un automóvil, para ello se implementaron las ecuaciones de las fuerzas relacionadas, distancias de frenado y desaceleración experimentada, así como la regulación del campo magnético que genera el efecto de frenado, que son las mismas que las utilizadas en la Etapa II para el diseño del freno. Esta etapa, también se consideró la realización de

pruebas al modelado en LabVIEW, esto a través de la implementación de pruebas de caja negra y de caja gris.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Clasificación de los frenos

Un freno es un dispositivo que permite una conexión por fricción, magnética, hidráulica o mecánica entre dos elementos de máquina, donde uno de los elementos gira y el otro es fijo; es un dispositivo utilizado en numerosos tipos de máquinas para detener o disminuir el movimiento de algún cuerpo, generalmente un eje, un árbol o un tambor. Su aplicación es especialmente importante en automóviles, trenes, aviones y motocicletas, entre otros. Los frenos son transformadores de energía, por lo cual pueden ser entendidos como una máquina *per se*, ya que transforman la energía cinética de un cuerpo en calor o trabajo y en este sentido pueden visualizarse como ‘extractores’ de energía. A pesar de que los frenos son también máquinas, generalmente se les encuentra en la literatura del diseño como un elemento de máquina y en la literatura de teoría de control pueden encontrarse como actuadores (C. Álvarez, Marín & González, 2007; Peña, 2012).

Peña (2012) menciona que los frenos de automóviles se pueden clasificar, según el uso que tengan en el vehículo en (Figura 2.1):

- Freno de servicio: Este tipo de freno está diseñado para contener o detener la marcha del automóvil. En esta clase de freno, el conductor aplica la fuerza de frenado a través de un pedal de freno.
- Freno de estacionamiento: Se utiliza para inmovilizar un coche mientras está estacionado. Generalmente, el conductor aplica la fuerza de frenado mediante una palanca o sobre un pequeño pedal predispuesto para este fin.
- Freno de emergencia: Se trata de un sistema de freno separado del freno de servicio; funciona como un sistema de emergencia al existir un fallo en el sistema de servicio, o también puede ser aplicado por un mando que equipa al automóvil con ese objetivo específico.

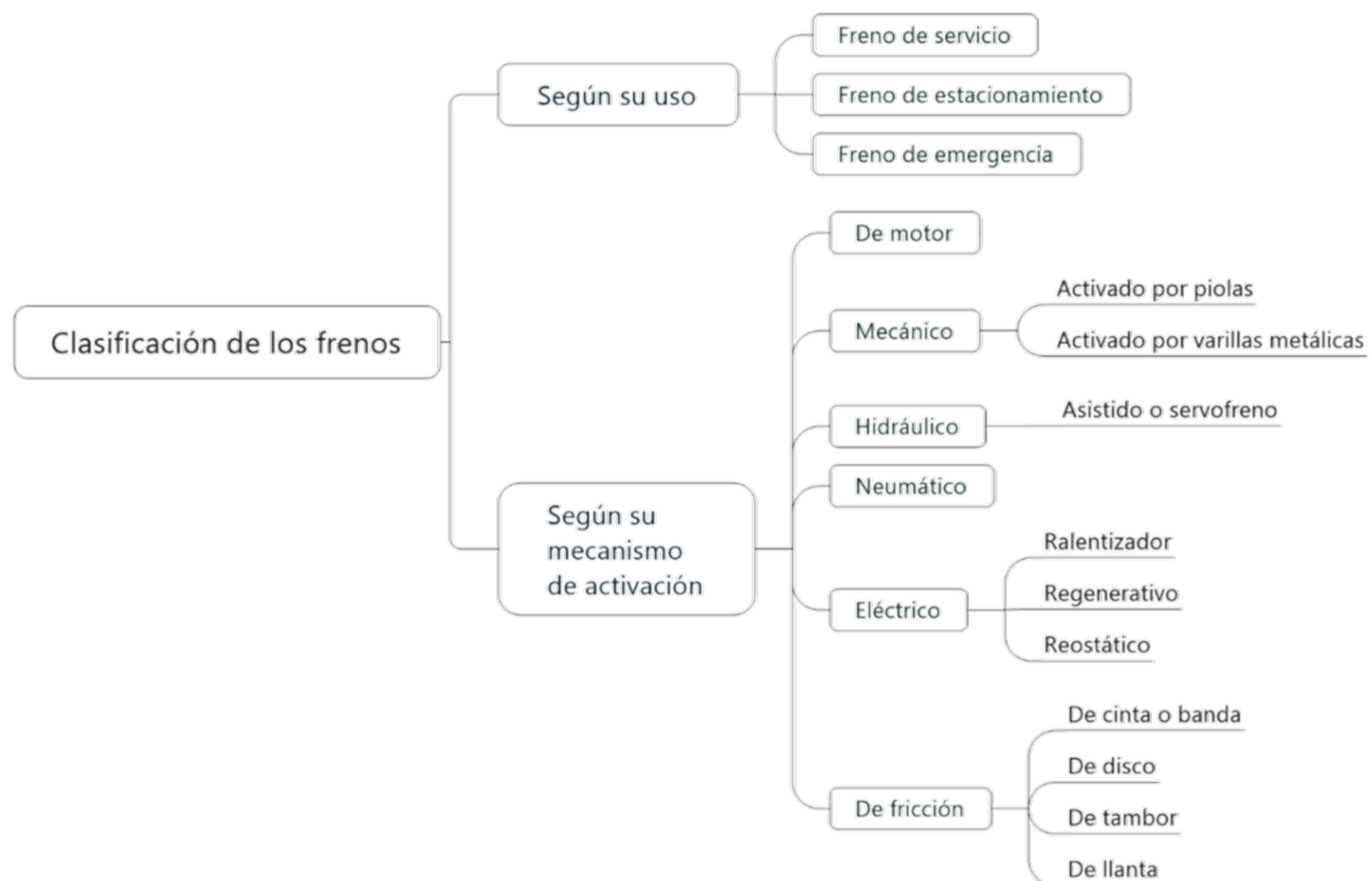


Figura 2.1. Clasificación de los frenos (Elaboración propia).

Dependiendo del mecanismo usado para la activación del freno, se puede hacer una clasificación del tipo de sistema con que se encuentran equipados los automóviles. Existen seis sistemas de frenado (Figura 2.1), los cuales están compuestos por distintos mecanismos (Ahumada & Rojas Z., 2014; Peña, 2012):

- Freno por el motor: Es un tipo de freno que se presenta al alterar el proceso de combustión de la gasolina. Consiste en hacer funcionar al motor como un compresor de aire absorbente de potencia, produciendo una acción de retardo o desaceleración en las ruedas propulsoras del vehículo.
- Freno mecánico: Consiste en la manipulación de palancas, cables u otros mecanismos que actúan sobre elementos de roce para lograr el frenado. Se utiliza únicamente para pequeñas potencias de frenado y suele requerir ajustes frecuentes para igualar su acción sobre las ruedas. La activación de este tipo de freno puede ser:
 - Mecánica por medio de piolas: Se consiguen hacer actuar los elementos de roce, transmitiendo la fuerza de aplicación a través de

piolas de acero. Es comúnmente utilizado como freno para estacionamiento.

- Mecánica por medio de varillas metálicas: Se transmite la fuerza de aplicación a través de varillas de acero. Haciendo actuar los elementos de roce. Sus principales aplicaciones son como freno para estacionamiento y como elemento en sistemas neumáticos.
- Frenos hidráulicos: Aprovechan la presión de un líquido (presión hidráulica) generada al pisar el pedal de freno, forzando así el movimiento de las zapatas de freno hacia fuera, contra las tamboras. El sistema consta de dos componentes, el pedal del freno y el mecanismo de freno de ruedas, junto con los tubos o conductos correspondientes y las piezas de sujeción.
- Frenos asistidos o Servofrenos: Reducen el esfuerzo del conductor, logrando una mayor fuerza de aplicación. Pueden ser servofrenos por vacío, que es el tipo más usado, o servofrenos por presión de aire, para coches pesados (bomba por motor y líquido a cilindro con aire que sale a presión).
- Frenos neumáticos: Sistema de frenos que utiliza aire comprimido para transmitir la fuerza de frenado ejercida en el pedal, la cual actúa sobre los elementos de frenado. Este tipo de freno se utiliza principalmente en trenes, camiones, autobuses y maquinaria pesada.
- Frenos eléctricos: Consisten en hacer actuar los elementos de frenado por medio de la aplicación proporcional de un actuador. Dicha proporcionalidad se logra dosificando la corriente a través de una resistencia eléctrica. Dependiendo de la forma en que se usan y de las prestaciones del sistema, se pueden distinguir los siguientes tipos de sistema de frenos eléctricos:
 - Ralentizador eléctrico: Este sistema es como un generador eléctrico que para hacer actuar los campos magnéticos ocupa grandes cantidades de energía proporcionada por el impulso del coche,

haciéndolo frenar. Este dispositivo puede estar aplicado a las ruedas, al cardán u otro eje conectado a las ruedas del coche. Es sobre este tipo de frenos que se basará el presente trabajo de tesis.

- Freno regenerativo: Este tipo de freno es comúnmente utilizado en trenes y su funcionamiento se basa en la transformación de la energía cinética, a partir de su inercia, en energía eléctrica para abastecer los sistemas auxiliares del tren como son las comunicaciones, la calefacción o la iluminación.
- Freno reostático: Se trata de un tipo de frenado dinámico en el que la misión de las resistencias de frenado es la conversión de la energía cinética, generada por el motor de tracción, en energía calorífica por el efecto Joule.
- Frenos de fricción: Este tipo de frenos es el más utilizado en los vehículos y se pueden clasificar en:
 - Frenos de cinta o de banda: Utilizan una banda flexible y se aplican mordazas o zapatas para ejercer tensión sobre un cilindro o tambor giratorio que se encuentra unido al eje que se pretenda controlar. Al ejercer presión, la banda ejerce la fricción con la cual se disipa, en calor, siendo ésta la energía cinética del cuerpo a regular.
 - Freno de disco: Es un dispositivo cuya función es detener o reducir la velocidad de rotación de una rueda. Normalmente es de acero y está unido a la rueda o al eje.
 - Freno de tambor: El freno de tambor es un tipo de freno en el que un par de zapatas o pastillas generan fricción cuando presionan la superficie interior de un tambor giratorio, el cual está conectado al eje o a la rueda.

Por otra parte, la Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Organization for Standardization*), en la norma *611:2003 Road Vehicles – Braking of automotive vehicles and their trailers – Vocabulary*,

clasifica los sistemas de frenos en función de los elementos que los componen, esta clasificación se muestra en la Figura 2.2.

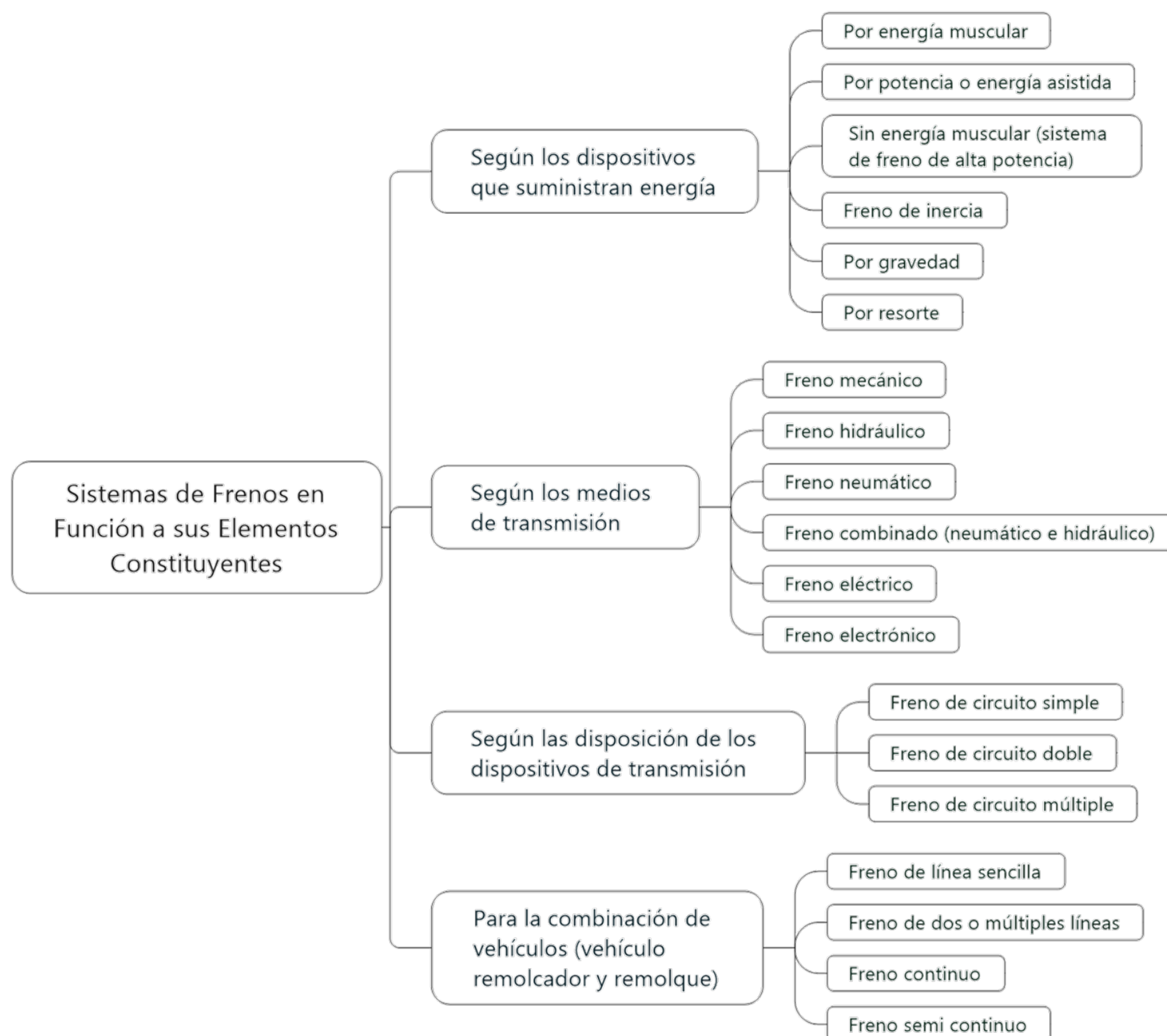


Figura 2.2. Sistemas de frenos según la ISO (Elaboración propia).

La ISO identifica cuatro tipos de sistemas de frenado, los cuales a su vez se subclasifican en (ISO, 2003):

- Sistemas de frenos en función a los dispositivos que suministran energía:
 - Sistema de freno por energía muscular: La energía necesaria para producir la fuerza de frenado en este sistema se suministra únicamente por el esfuerzo físico del conductor.
 - Sistema de freno por potencia o energía asistida: Es aquel en el cual la energía necesaria para producir la fuerza de frenado es

suministrada por el esfuerzo físico del conductor y uno o más dispositivos de suministro de energía, por ejemplo, sistema de freno de vacío (con bomba de vacío) y sistema de freno de aire comprimido (con compresor de aire).

- Sistema de freno sin energía muscular o sistema de freno de alta potencia: En este sistema de freno, la energía necesaria para producir la fuerza de frenado es suministrada por uno o varios dispositivos de suministro de energía sin que actúe el esfuerzo físico del conductor, por ejemplo, sistema de freno de aire, sistema de freno hidráulico, sistema de freno de aire e hidráulico combinado.
- Sistema de freno inercial (vehículos de remolque): La fuerza de frenado es suministrada por el empuje producido por un remolque que se aproxima al vehículo que lo remolca.
- Sistema de freno por gravedad (vehículos de remolque): Este sistema de freno obtiene la energía necesaria para producir la fuerza de frenado a través del descenso de una masa del remolque bajo la influencia de la fuerza de gravedad.
- Sistema de freno por resorte: Es aquel sistema de freno en el que la energía necesaria para producir la fuerza de frenado es suministrada por uno o más resortes de compresión que actúan como un acumulador de energía.
- Sistemas de frenos en función a los dispositivos de transmisión:
 - Sistema de freno mecánico: El control y la energía necesaria para producir el frenado son transmitidos desde el punto de aplicación de los frenos por medios mecánicos tales como palancas, varillas o cables.
 - Sistema de freno hidráulico: Es aquel sistema de freno en el que el control y la energía son transmitidos por mecanismos hidráulicos.
 - Sistema de freno neumático: Este sistema transmite y controla la energía por mecanismos neumáticos. Es posible contar con dos

sistemas simultáneos, por ejemplo, un sistema de freno de aire comprimido y un sistema de freno de vacío.

- Sistema de freno neumático e hidráulico combinado: Éste almacena energía neumática para accionar hidráulicamente los frenos y los medios de transmisión de la fuerza de frenado, mediante el uso de un convertidor neumático a hidráulico.
- Sistema de freno eléctrico: Las fuerzas de frenado de este tipo de sistemas son producidas principalmente por motores eléctricos, que responden a la transmisión de señales eléctricas.
- Sistema de freno electrónico (EBS): El control es generado y procesado como una señal eléctrica del sistema de transmisión, la cual controla los dispositivos que producen las fuerzas de frenado.
- Sistemas de frenos en función a la disposición de los dispositivos de transmisión:
 - Sistema de freno de circuito simple: Este tipo de sistema emplea un sólo circuito de transmisión. En el caso de fallo de este único circuito, no se puede transmitir la energía para producir la fuerza de frenado.
 - Sistema de freno de circuito doble: Sistema de freno en el que se emplean dos circuitos separados de transmisión. En el caso de fallo de uno de éstos, el segundo circuito es capaz de controlar y transmitir la energía necesaria para producir la fuerza de frenado.
 - Sistema de freno de circuito múltiple: Se emplean múltiples circuitos separados de transmisión. En el caso de fallo de uno de éstos, los demás circuitos son capaces de controlar y transmitir la energía necesaria para producir la fuerza de frenado.
- Sistemas de frenos para la combinación de vehículos (vehículo remolcador y remolque):

- Sistema de freno de línea sencilla: Utiliza una sola línea de conexión, tanto para el suministro de la energía como para el control del sistema de freno, entre el vehículo remolcador y el remolque.
- Sistema de freno de dos líneas y múltiples líneas: Se utilizan dos o más líneas de conexión, separadas o simultáneas, para el suministro de la energía y el control del sistema de freno entre el vehículo remolcador y el remolque.
- Sistema de freno continuo: Es aquel sistema de freno combinado entre el vehículo remolcador y su remolque, ofrece las siguientes características:
 - La energía necesaria para producir la acción de frenado sobre cada uno de los vehículos es suministrada por la misma fuente de energía (como puede ser el esfuerzo físico del conductor).
 - La energía necesaria para producir la acción de frenado sobre cada uno de los vehículos es suministrada simultáneamente, o en forma desfasada, por la misma fuente de energía.
- Sistema de freno semi continuo: Es aquel sistema de freno combinado entre el vehículo remolcador y su remolque que ofrece las mismas características que el sistema de freno continuo, con la diferencia que en un sistema semi continuo la energía es suministrada por al menos dos fuentes distintas, y de igual manera que un sistema continuo, una de éstas puede ser el esfuerzo físico del conductor.

2.1.1. Dispositivos especiales

Los sistemas de frenado por sí mismos no proporcionan la confiabilidad de que el frenado sea seguro, por tal motivo, existen distintos dispositivos especiales que sirven para compensar la falta de seguridad generada por los frenos, dichos dispositivos se muestran en la Figura 2.3.

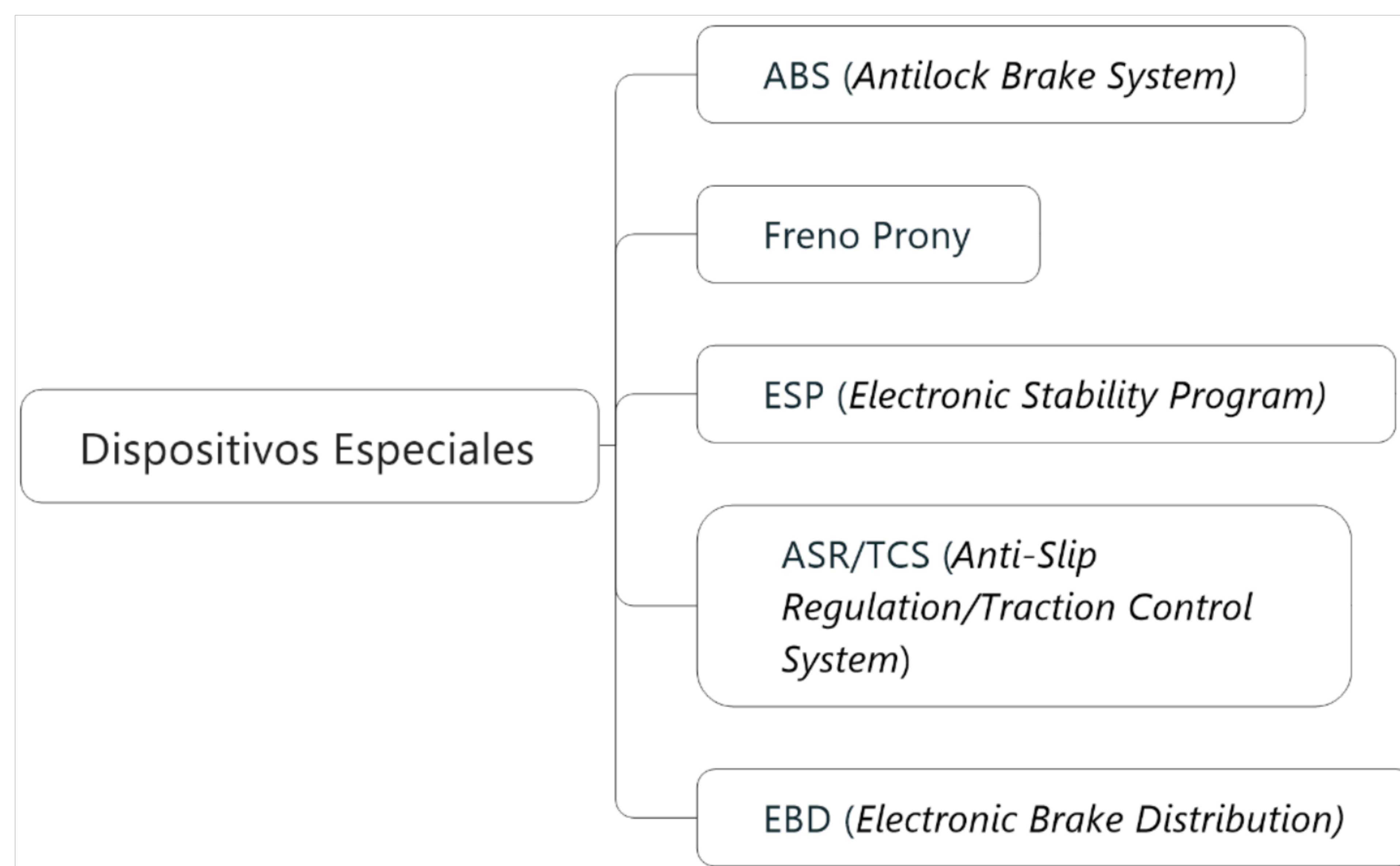


Figura 2.3. Dispositivos especiales de frenado (Elaboración propia).

Los dispositivos especiales tienen como objetivo regular el efecto de frenado, es decir, controlar el comportamiento del vehículo (esencialmente de los neumáticos) a la hora de frenar. A continuación, se describe brevemente el funcionamiento de dichos dispositivos:

- Freno ABS (*Antilock Brake System*): Conocido como sistema antibloqueo, es un conjunto de componentes de una instalación de freno de servicio, que regula automáticamente el resbalamiento de las ruedas en sentido de giro durante el frenado y trabaja para mantener la estabilidad del vehículo para librarse de situaciones peligrosas y conservar así la permanencia del vehículo. La regulación de la fuerza de frenado se efectúa con ayuda de los datos de los sensores dispuestos en cada uno de los neumáticos (Bosch, 1999; Saavedra, 2016)
- Freno Prony: Es un freno dinamométrico utilizado para medir la fuerza de los motores. Consta de un brazo, sobre el que van montados un dinamómetro y una rueda, que tiene adosada una cincha de alto rozamiento. Esta rueda es la que se conecta al eje del motor del cual se quiere medir su potencia. El ajuste de la cincha es variable, con lo que se puede controlar el torque de carga aplicado al motor (López, 2013).

- **ESP (*Electronic Stability Program*):** El mecanismo ESP controla el aire comprimido en los cilindros de freno del sistema mediante válvulas electromagnéticas incorporadas en los módulos de regulación de presión; cuando el ángulo de giro del vehículo no coincide con el del volante se envía una señal tanto a la Unidad de Control Electrónico (ECU, *Electronic Control Unit*) como al módulo de regulación de presión; al recibir estas señales, el sistema hidráulico presiona el freno del neumático correspondiente para corregir esta deficiencia (Abril, 2012).
- **ASR/TCS (*Anti-Slip Regulation/Traction Control System*):** Este sistema se activa en el momento en que alguno de los neumáticos supera la velocidad o umbral de deslizamiento. Tan pronto como esto sucede, una ECU acciona la válvula de freno diferencial respectiva, controlando de esta manera la presión del cilindro de freno (WABCO, 2011).
- **EBD (*Electronic Brake Distribution*):** Es un sistema electrónico de reparto de frenado fase 1 que determina cuánta fuerza aplicar a cada rueda para detener al vehículo en una distancia mínima sin que éste pierda el control. El sistema calcula si el reparto de fuerzas es adecuado a partir de los mismos sensores que el ABS. Ambos sistemas en conjunto actúan mejor que el ABS en solitario, ya que este último regula la fuerza de frenado de cada rueda según ésta se esté bloqueando (López, 2013).

2.2. Evolución de los sistemas de freno

Los sistemas de freno constituyen una parte fundamental del diseño y desarrollo de los elementos de máquinas porque son dispositivos capaces de modificar el estado de movimiento de un sistema mecánico y gracias a ellos es posible caracterizar motores eléctricos con el fin de conocer sus especificaciones y estado actual. Los sistemas de freno surgieron con la necesidad de detener o

reducir la marcha de vehículos en movimiento, por lo cual se cree que los primeros dispositivos de freno debieron ser elementos de anclaje similares a los que posee un barco (Álvarez *et al.*, 2007).

La bicicleta apareció alrededor del año 1690 y la única manera de desacelerarla era presionando el zapato sobre la rueda, lo cual se tornaba peligroso por la inestabilidad que se provocaba con dicho contacto, esto llevo a que en el año de 1973 apareciera el freno de cuchara, el cual consiste en una palanca que presionaba un bloque de madera contra el neumático.

Posteriormente, en el año de 1869 apareció el freno de aire, el cual fue inventado por George Westinghouse. Más tarde, Luís Renault inventó el freno de expansión interna, que daba un mayor poder de frenado a altas velocidades. En 1890 comenzaron a hacerse ensayos para lo que hoy se conocen como frenos de disco.

En la década de los 50s surgieron los servofrenos o *boosters*, que son mecanismos que ayudan a que el conductor no requiera de gran fuerza para frenar el automóvil, pues éstos funcionan con el aprovechamiento del vacío del motor, inyectando presión a un sistema hidráulico que a través de mangueras accionan las pastillas de los discos de freno (Alzallú, 2016).

Para 1963, Mercedes Benz comenzó a instalar sistemas de frenos con tres circuitos. En 1965, Volvo añadió a los frenos hidráulicos una válvula limitadora de presión y en 1966, Porsche lanzó el disco autoventilado, todo esto con el propósito de ofrecer una mejor disipación de calor (Álvarez, 2014).

Actualmente, el sistema de freno electromagnético tiene diversas aplicaciones, la mayoría en el sector industrial donde se utilizan motores, alternadores y transformadores, entre otros; pero llama especialmente la atención el uso que se le da dentro del sector férreo, en el cual por medio de este fenómeno es posible detener los trenes bala (*maglev*) que pueden viajar a velocidades superiores a los 500 km/h. En la actualidad, este sistema se ha

aplicado en el metro de Medellín, Colombia, donde se utiliza el freno electromagnético tanto en el sistema masivo como en el metro cable, además, se aplica en las balanzas mecánicas industriales (Arango *et al.*, 2013).

En el libro “*Le freinage des véhicules automobiles sur route*” de Henri Perrot¹, escrito en 1956 y publicado por Editions Eyrolles, se menciona que la primera patente para los frenos de inducción data de 1903; aunque un freno de este tipo realmente utilizable fue realizado por el ingeniero Raoul Sarazin en 1936. Después de la segunda guerra mundial, estos dispositivos de frenado fueron retomados por la Sociedad Telma (*Techniques Electro-Mécaniques de l’Aveyron*), y fabricados bajo licencia de Sarazin. Y aunque, los productos desarrollados por esta empresa no son frenos como tal, sino más bien sistemas auxiliares o de emergencia, conocidos con el nombre de ‘retardadores’, asumen aproximadamente el 80% de las operaciones de frenado y pueden ser adaptados a aplicaciones distintas a las automotrices, tales como bancos de pruebas, ascensores, aerogeneradores, tranvías, locomotoras y vagones, entre otras. Los frenos de inducción Telma no requieren mantenimiento periódico, reduciendo los costos operativos y de mantenimiento, al mismo tiempo que aumentan la disponibilidad de vehículos en carretera (Prensa del transporte y logística, 2015) (Telma, 2015).

Por otra parte, los primeros indicios de los frenos para aplicaciones industriales se dan con el freno Prony, inventado por el ingeniero y matemático Gaspard Clair François Marie Riche de Prony; con este freno se buscaba conocer la potencia mecánica real de un motor. Del freno Prony se derivan otros tipos de dispositivos de frenado como el freno de Foucault.

¹ Ingeniero del Conservatorio de Artes y Oficios de París y presidente de la Sociedad de Ingenieros del Automóvil de Francia.

2.3. Frenos electromagnéticos

Los frenos electromagnéticos de inducción disipan la energía de frenado mediante la generación de corrientes de Foucault, y generalmente se instalan en la línea del eje cardán en los vehículos de tracción trasera (modelo axial) o bien a continuación de la caja de velocidades o junto al diferencial (modelo Focal). Actualmente, este tipo de frenos no reemplaza a los frenos convencionales de fricción, sino que los suplementan, especialmente bajo condiciones difíciles de manejo, por ejemplo, en las largas cuestas de los caminos de montaña, en los que los frenos tradicionales sufren el efecto “*fading*” o fatiga por sobrecalentamiento, lo que les hace perder eficacia.

Los frenos de inducción magnética no contienen piezas de fricción (pastillas o zapatas) que rozan contra superficies (discos o tambores) y su acción se basa en principios electromagnéticos. Estos frenos constan de un estator fijo y de un par de rotores unidos al eje de transmisión que lo hace girar. El estator está unido rígidamente del chasis a la caja de velocidades o al diferencial, junto a los rotores están montados coaxialmente uno frente a otro; un espacio llamado entrehierro separa los rotores del estator, lo que evita cualquier fricción. El estator tiene la función de inductor; está constituido por electroimanes que, cuando son atravesados por una corriente eléctrica continua, generan los campos magnéticos necesarios para producir corrientes de Foucault en la masa de los rotores. Los rotores tienen la función de inducido y están contruidos por un material conductor elaborado especialmente; los rotores son sometidos a corrientes de Foucault sólo cuando los atraviesan los campos magnéticos que genera el estator, al mismo tiempo que giran impulsados por el eje de transmisión (eje cardán). Las corrientes de Foucault, por definición, se originan en una masa metálica conductora cuando ésta se coloca en un campo magnético variable.

En el caso de los frenos de inducción, la variabilidad del campo magnético al que se someten los rotores se obtiene mediante la rotación de éstos. Las

corrientes de Foucault se enrollan alrededor de líneas de flujo magnéticas, que también se llaman corrientes de torbellino. La generación de corrientes de Foucault en la masa del rotor causa la aparición de fuerzas de Laplace que se oponen a la rotación del rotor. El par de frenado, generado de esta forma y aplicado al árbol de transmisión, permite reducir la velocidad del vehículo. Las corrientes de Foucault producen un aumento gradual de la temperatura de los rotores, que liberan este calor al aire por ventilación. Con los frenos de inducción magnética se puede desacelerar con eficiencia un eje en rotación sin fricción y, por lo tanto, sin desgaste.

El campo magnético es una perturbación del espacio generada por la presencia de un imán permanente o de un conductor que permite el flujo de corriente (electromagneto), cuya magnitud y dirección se indica por medio del vector \mathbf{B} . Cuando alguna carga se mueve dentro de un campo magnético, experimenta una fuerza definida por:

$$\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

donde:

q : Carga de la partícula,

v : Velocidad a la que se mueve la partícula,

B : Intensidad del campo magnético.

El resultado de este producto vectorial es un vector con las siguientes características:

- Módulo igual al producto de los módulos por el seno del ángulo comprendido ($qv\mathbf{B} \text{ sen } \theta$).
- Dirección perpendicular al plano formado por los vectores \mathbf{v} y \mathbf{B} .
- El sentido depende de la carga que se encuentre en movimiento, si la carga es positiva, el sentido será el mostrado en la Figura 2.4a; y si la carga es negativa el sentido de la fuerza será el mostrado en la Figura 2.4b.

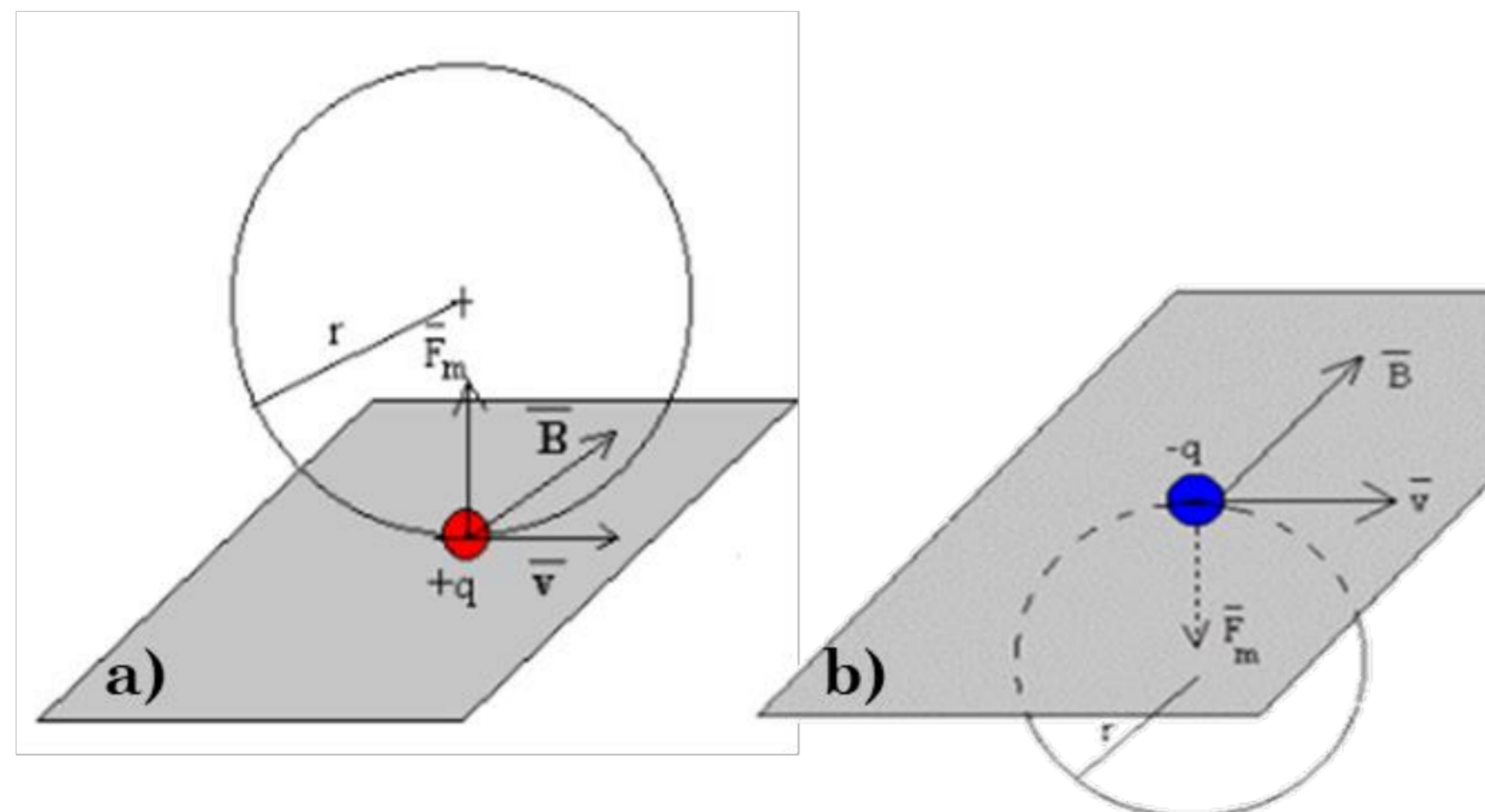


Figura 2.4. Fuerza magnética sobre una carga dentro de un campo magnético (Elaboración propia).

Debido a que un campo magnético ejerce una fuerza lateral sobre una carga en movimiento, también debe ejercer una fuerza lateral sobre un conductor por el cual fluye una corriente, es decir, se ejerce una fuerza lateral sobre los electrones de conducción en el conductor, pero dado que los electrones no pueden salir del conductor, la fuerza se transmite al conductor mismo. La Figura 2.5a muestra un conductor que pasa por una región en donde existe un campo magnético B , pero cuando por el conductor no fluye ninguna corriente no se experimenta ninguna fuerza de oposición, como se muestra en Figura 2.5b. Cuando la corriente o el campo se invierten, también se invierte la fuerza de oposición como muestra la Figura 2.5c (Halliday, Resnick & Kenneth, 1999).

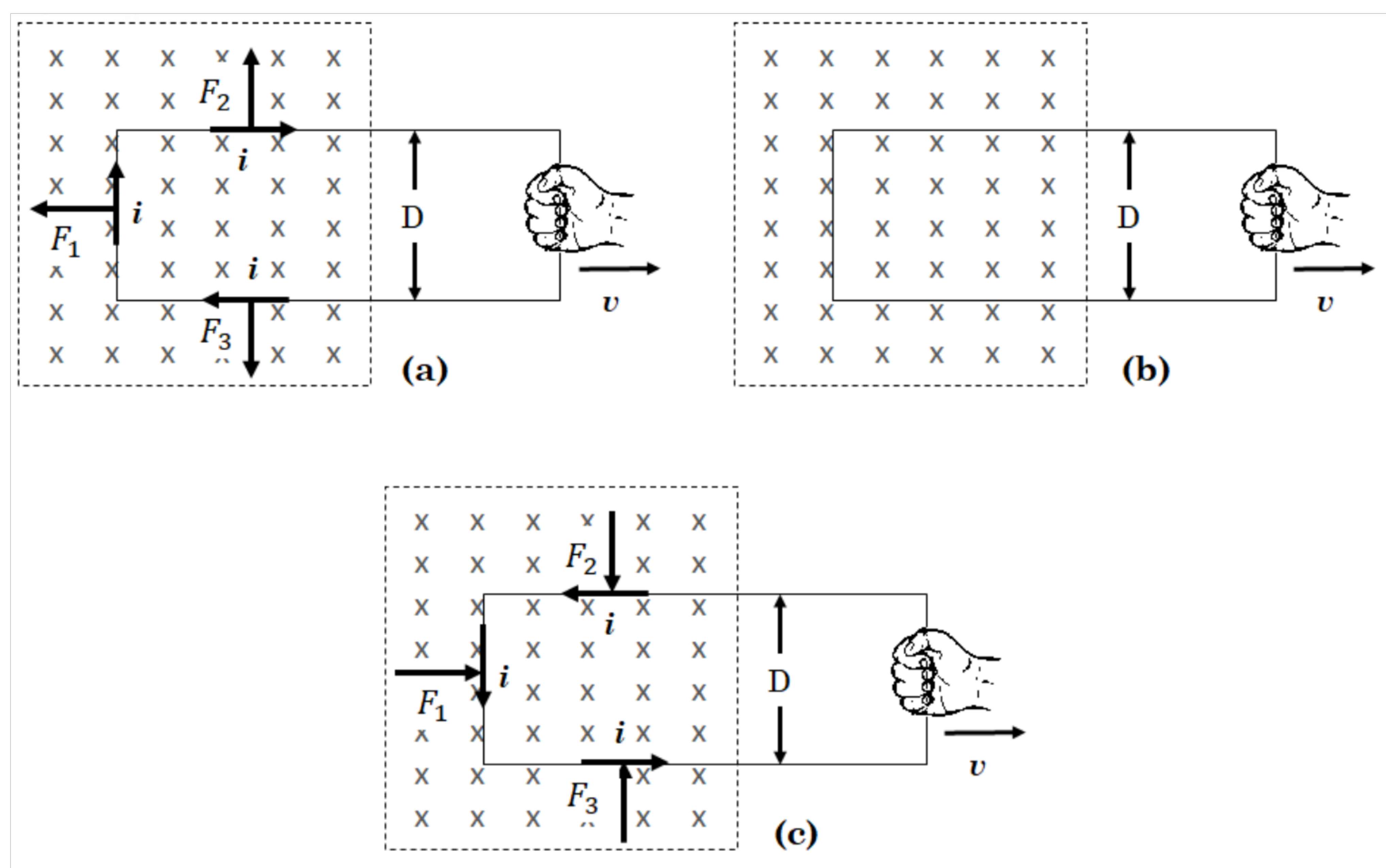


Figura 2.5. Fuerza transmitida según la corriente en el conductor (Elaboración propia).

La fuerza F_1 generada por este fenómeno es conocida como f_{em} de movimiento o cinética, y depende de tres factores: a) i , que es la corriente del conductor, b) B , que es la intensidad del campo magnético y c) D , que es la longitud del conductor, obteniendo de esta manera la siguiente expresión matemática (Halliday *et al.*, 1999):

$$F_1 = iD \times B \quad (2)$$

Las fuerzas F_2 y F_3 , son iguales en magnitud, pero opuestas en dirección, por lo que se cancelan entre sí.

Cuando un material conductor atraviesa un campo magnético variable, aparecen corrientes inducidas en el material. Estas corrientes se llaman corrientes de Foucault o corrientes parásitas, las cuales, en ciertos casos pueden producir efectos indeseados como el aumento de la energía interna, lo cual conlleva a un aumento de la temperatura del material. Por este motivo, se deben laminar aquellos elementos conductores que trabajan bajo campos magnéticos variables, es decir, deben estar constituidos por muchas capas delgadas de material conductor, pero aisladas entre sí. Esto hace que las corrientes parásitas recorran una sección muy estrecha de material y, por lo tanto, se encuentren con una resistencia alta, lo cual implica una reducción de dichas corrientes (Halliday, Resnick & Kenneth, 1999; Rodríguez Pozueta, 2014).

Las corrientes parásitas son corrientes reales y producen los mismos efectos que la corriente eléctrica, por tal motivo, cuando un material conductor que porta corrientes parásitas se ubica dentro de un campo magnético, sobre él se ejerce la fuerza $F=iL \times B$, la cual se opondrá al movimiento del conductor, dando origen a una forma de frenado magnético (Halliday *et al.*, 1999). Cuando una rueda (disco metálico) entra en un campo magnético variable, el disco corta las líneas de flujo de dicho campo y se vuelve sede de corriente inducida que sigue recorridos muy variados en su masa conductora, dando lugar a dos fenómenos (UNILAB, 1992):

- Calentamiento del disco por efecto Joule: Dado por la expresión $Q = I^2 R t$, donde Q es el calor generado, I la intensidad de corriente, R la resistencia del conductor y t el lapso de tiempo que la corriente circula en el conductor.
- Frenado del disco por la ley de Lenz: Una vez inducidas las corrientes del disco, éstas tienen un sentido opuesto a la causa que las han generado. Dicha causa es el movimiento del disco y, por lo tanto, la reacción electrodinámica, que se origina entre las corrientes del disco y el flujo que lo involucra, dando lugar a una fuerza que se opone al movimiento.

Estos dos fenómenos son estrictamente interdependientes. La potencia total disipada por efecto Joule en el disco corresponde a la potencia de frenado que surge del producto del par frenante por la velocidad angular. Por lo tanto, se puede afirmar que el electromagneto ejerce sobre el disco en rotación un par en el sentido opuesto al movimiento, pero también se puede decir que el disco ejerce sobre el electromagneto un par en el mismo sentido de su rotación (UNILAB, 1992).

2.4. Hipótesis de cálculos

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de freno es uno de los sistemas fundamentales en los automóviles, ya que proporciona la capacidad de reducir total o parcialmente la velocidad del vehículo cuando se encuentra en movimiento. El fenómeno de frenado de un automóvil puede entenderse como la reducción de la energía cinética, producida por el movimiento del vehículo, y/o su energía potencial, transformándolas en energía calorífica.

El análisis de los sistemas de frenado requiere tener en cuenta una serie de cuestiones relativas al proceso dinámico del fenómeno de frenado, es decir, hay que tener en cuenta que, al accionarse el pedal de freno, la fuerza ejercida

en el pedal se transmite y multiplica generando así la desaceleración del vehículo, pasando por una serie de etapas que se enumeran a continuación:

1. El conductor pisa el pedal de freno.
2. Tiempo de respuesta desde que el conductor pisa el freno, hasta que la fuerza se presenta en las ruedas.
3. Incremento de la fuerza de frenado (eficiencia máxima 75%).
4. Valor máximo de desaceleración.
5. Duración real de la frenada.
6. Detención del automóvil.
7. Efecto de inercia al soltar el pedal de freno.

A pesar de que estos siete pasos parecen ser simples, en realidad la efectividad de dicho proceso depende del cumplimiento simultáneo de las siguientes condiciones:

- Que no se bloqueen las ruedas del automóvil.
- Que el sistema de frenado funcione correctamente.
- Que el estado de los neumáticos de la carretera sea el óptimo.

Cuando alguna de estas condiciones no se cumple, la eficiencia del frenado se reduce, aumentando así de manera considerable la distancia en la que el vehículo se detiene.

En los apartados siguientes se describen los conceptos y fundamentos físicos y técnicos involucrados en todo proceso de frenado, para los cuales se considera al vehículo como un cuerpo rígido.

2.4.1. Fuerzas y efectos presentes en el proceso de frenado

Durante el proceso de frenado, el vehículo resiente distintos esfuerzos, de los cuales algunos pueden parecer lógicos y simples, sin embargo, su importancia dentro del proceso de frenado puede llegar a ser de vital importancia.

2.4.1.1. Fuerza de frenado

Cuando el conductor de un vehículo deja de pisar el pedal del acelerador suprime la fuerza de impulso que genera el movimiento del vehículo, iniciando así la desaceleración del vehículo aún sin haber pisado el pedal de freno. A partir de ese momento el movimiento del vehículo dependerá únicamente de la inercia generada por la velocidad a la que se trasladaba el vehículo antes de soltar el acelerador.

En el momento en que el conductor pisa el pedal de freno, se genera una fuerza de frenado, que tiene como fin anular la fuerza de inercia. La fuerza de frenado aplicada tiene un valor máximo delimitado por la fuerza de adherencia existente entre el neumático y el suelo, ya que cuando se rebasa dicho límite, se produce el bloqueo de las ruedas sobre el pavimento.

2.4.1.2. Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica en un vehículo interceden como fuerzas retardadoras en el proceso de frenado. La resistencia a la rodadura está compuesta por la fricción existente entre el neumático y el suelo, así como por pérdidas mecánicas en el sistema de transmisión.

El coeficiente de adherencia se puede entender como un valor que define la adherencia existente entre dos cuerpos, en este caso neumático y asfalto, y, por lo tanto, su valor dependerá del desgaste que se tenga tanto en los neumáticos como en la superficie de deslizamiento. Mientras mayor sea el valor de dicho coeficiente mayor será la adherencia existente entre estos dos cuerpos, es decir, que las superficies del neumático y de calzada son muy rugosas, mientras que un valor muy bajo representa superficies resbaladizas o de muy baja rugosidad. La Tabla 2.1 lista los valores aceptados de adherencia neumático-calzada.

Tabla 2.1. Coeficientes de rodadura (Flores & Remache, 2014).

Superficie de rodadura	Coef. de adherencia	Valor de deslizamiento
Asfalto seco	0,8-0,9	0,75
Asfalto mojado	0,5-0,7	0,45-0,6
Suelos de hormigón seco	0,8-0,9	0,75
Suelos de hormigón mojado	0,8	0,7
Grava	0,6	0,55
Tierra seca	0,68	0,65
Tierra húmeda	0,55	0,4-0,5
Nieve dura	0,2	0,15
Hielo	0,1	0,07

A pesar de que el cálculo del coeficiente de adherencia no es fácil de realizar, es posible determinar su valor de manera experimental mediante pruebas de desaceleración. Esto ha permitido identificar aquellos factores que presentan mayor influencia en el valor de dicho coeficiente; algunos de los factores más importantes son (Criado Ocaña, 2012):

- Factor terreno: Implica el material de la superficie de la carretera, su rugosidad e irregularidades en su superficie, así como la presencia de otros factores como pueden ser barro, aceite, agua, nieve, hielo entre otros y el estado de la misma superficie.
- Factor vehículo: Se refiere principalmente al peso del vehículo, tipo de suspensiones y amortiguadores, velocidad del vehículo y par transmitido a las ruedas.
- Factor neumático: Considera el material del que están fabricados, amplitud de la superficie de la huella y presión en cada neumático, principalmente.

Por otra parte, la resistencia aerodinámica tiene efectos distintos según el vehículo. Durante el proceso de frenado, la resistencia aerodinámica presenta efectos particularmente como una fuerza de resistencia, representada con F_{ra} (Figura 2.6), la magnitud de esta fuerza depende principalmente de tres factores: Forma y área frontal del vehículo, Densidad del aire y Velocidad de circulación.

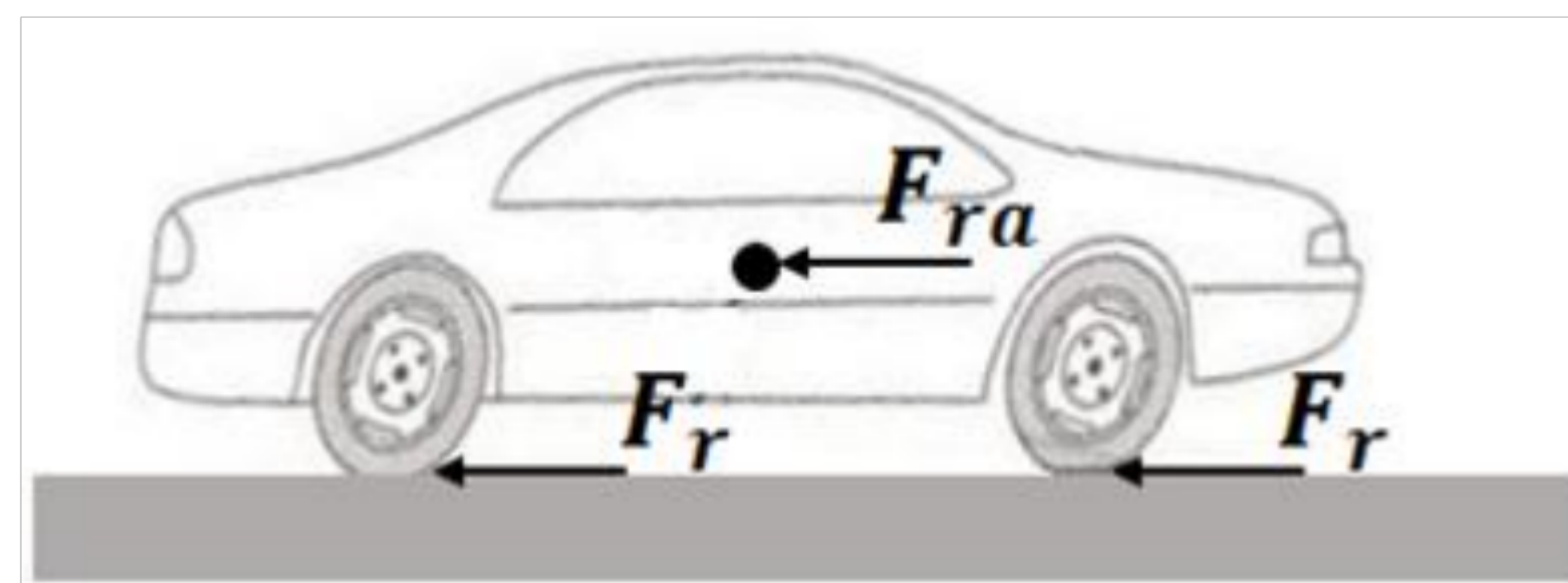


Figura 2.6. Resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica (Flores & Remache, 2014).

Las fuerzas aerodinámicas a las que se encuentra sujeto un automóvil son de especial interés a altas velocidades, ya que su valor aumenta al cuadrado de la velocidad a la que se mueve el vehículo; de esta manera, a velocidades bajas y/o moderadas su valor es tal que tiende a depreciarse.

2.4.1.3. Resistencia del motor y transmisión

Al accionarse el pedal del acelerador se producen una transmisión de giro y fuerzas, que tienen origen en el motor y que se transmiten hasta las ruedas. Esta transmisión de fuerzas produce el giro de los neumáticos, y con ello el movimiento y desplazamiento del automóvil, lo cual se conoce como fuerza de tracción.

Sin embargo, si no existiera una superficie de contacto con las ruedas no se produce el desplazamiento del automóvil, ya que para que la fuerza de tracción exista es necesario que exista una fuerza contraria a ella, dicha fuerza contraria es la resistencia a la rodadura.

Por otra parte, la resistencia generada por el motor durante el proceso de frenado resulta de vital importancia, en especial cuando el número de revoluciones al que gira es alto y se pretende reducir su velocidad en un intervalo corto de tiempo.

2.4.1.4. Reparto de cargas

El reparto de cargas de un vehículo no es igual en el eje delantero que en el eje trasero. Bajo condiciones estáticas, un vehículo ‘moderno’ tiene una distribución del 61% del peso total del mismo en el eje delantero y del 39% en el eje trasero. Sin embargo, cuando el vehículo se encuentra en movimiento, dicho reparto de cargas se modifica (Criado Ocaña, 2012).

Para tener una idea de cómo se altera la distribución de cargas de un automóvil durante el proceso de frenado, en la Figura 2.7, se puede apreciar que, durante el frenado de un vehículo, la inercia de este mismo genera una fuerza (F_i) sobre el centro de gravedad del vehículo, y al estar el centro de gravedad situado a mayor altura que el eje de las ruedas del vehículo, esta fuerza genera un torque denominado ‘cabeceo’ o ‘momento de cabeceo’ que modifica el reparto de cargas sobre los ejes (Figura 2.8). Aunque el reparto de cargas durante el frenado depende de diversos factores que varían en cada vehículo, es posible aproximar dicho reparto a un 80% sobre el eje delantero y 20% en el trasero durante el proceso de frenado (Criado Ocaña, 2012).

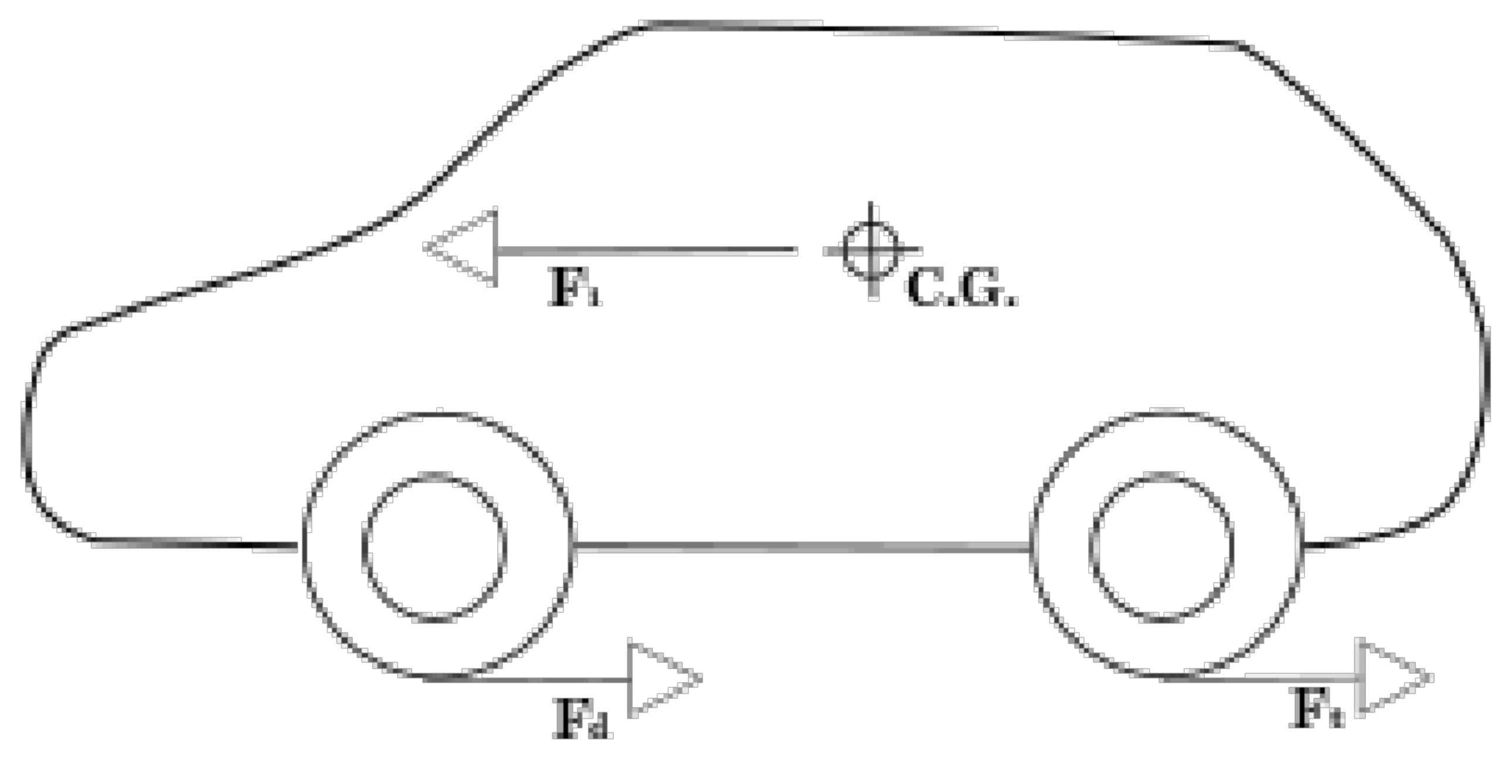


Figura 2.7. Fuerzas principales en el proceso de frenado (Criado Ocaña, 2012).

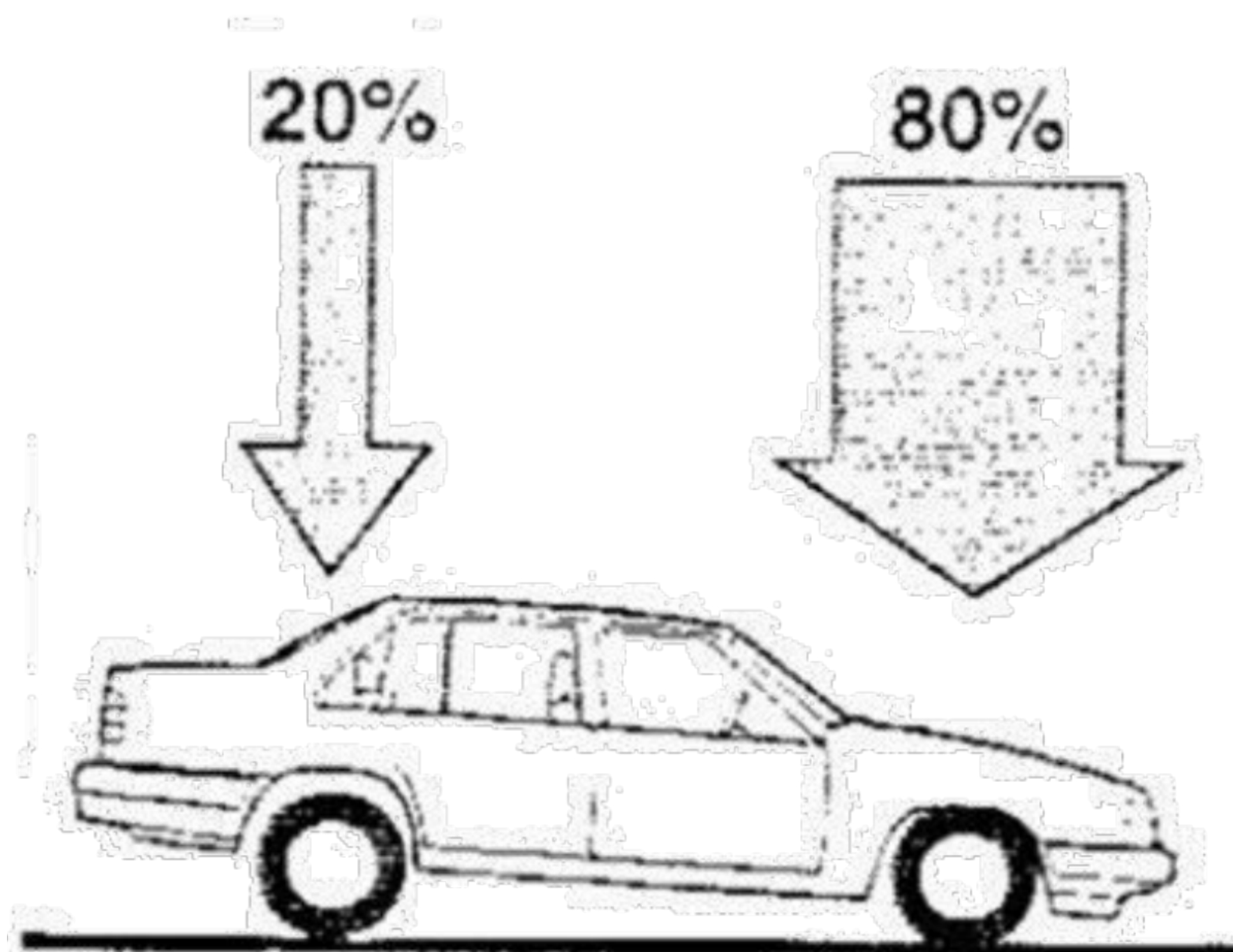


Figura 2.8. Reparto de cargas durante el frenado (Criado Ocaña, 2012).

2.4.1.5. Deslizamiento

El deslizamiento o derrape es un efecto que se presenta cuando, durante el frenado del automóvil, éste se sale de sus condiciones normales de frenado (Figuras 2.9 y 2.10), produciendo así el bloqueo de las ruedas; este fenómeno (deslizamiento) se presenta cuando la fuerza de frenado supera la fuerza de

inercia o bien a la fuerza de fricción que se opone al movimiento del vehículo. Por tal motivo, unos neumáticos gastados, o una carretera mojada, con nieve o hielo reducen de manera considerable la adherencia de contacto y ello provoca que el bloqueo de los neumáticos se presente con una menor fuerza de frenado, dicho bloqueo provoca el deslizamiento y pérdida de direccionalidad del automóvil.

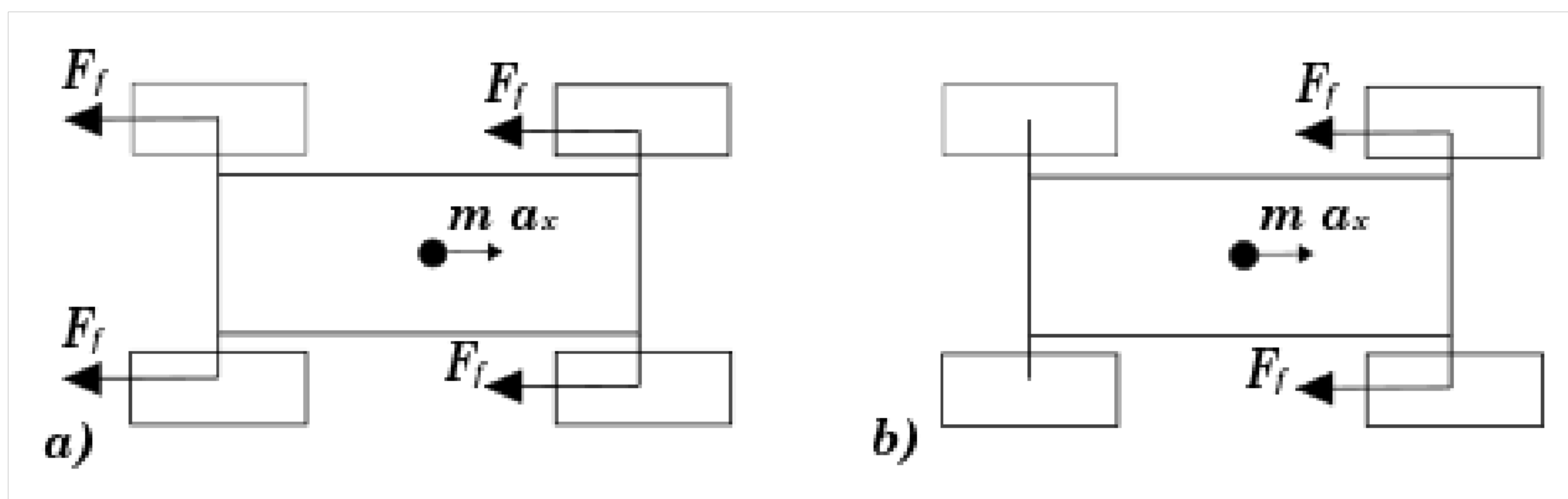


Figura 2.9. Condición de frenado trasero a) Normal; b) de bloqueo (Elaboración propia).



Figura 2.10. Deslizamiento por bloqueo de las ruedas traseras (Criado Ocaña, 2012).

Con base en lo anterior, el proceso de frenado puede desempeñarse de dos maneras:

- Frenado estable: Cuando la fuerza de frenado aplicada es menor que la fuerza de inercia se genera un par de frenado positivo, provocando así que la velocidad del automóvil se reduzca de manera progresiva, segura y de manera estable.

- Frenado inestable: En los casos en los que la fuerza de frenado aplicada es mayor que la fuerza de inercia, se genera un par de frenado negativo, el cual tiene un sentido contrario al giro de las ruedas. Dicho par de frenado hace que las ruedas se bloqueen y esto se refleje en el arrastre o deslizamiento del vehículo.

El deslizamiento de un vehículo puede ser de dos formas distintas:

- Deslizamiento longitudinal: Durante el proceso de frenado se produce una transferencia de cargas del eje trasero al eje delantero. Esta transferencia de cargas provoca un aumento de la fuerza de adherencia en las ruedas delanteras, lo cual hace que sea necesaria una mayor fuerza de frenado en el eje delantero, ya que la fuerza de adherencia no será la misma en el eje delantero que el trasero, y en caso de aplicarse la misma fuerza en ambos ejes, se provoca el bloqueo de los neumáticos de alguno de los ejes, lo cual supone dos situaciones distintas:
 - Bloqueo del eje trasero: Se presenta cuando el eje delantero tiene adherencia, pero el eje trasero no. La consecuencia de este bloqueo es el derrape o deslizamiento de las ruedas traseras tal como se ilustra en la Figura 2.10, produciendo el giro del automóvil.
 - Bloqueo del eje delantero: Esta situación se presenta cuando el eje trasero es el que tiene adherencia con la carretera, mientras que el eje delantero se ha bloqueado. En este caso, las fuerzas de inercia y de adherencia generan un momento tal que provocan cierta pérdida de control direccional, aunque menos grave que la pérdida de control generada por el bloqueo de las ruedas traseras.
- Deslizamiento transversal: Efecto que se presenta cuando un automóvil toma una curva, en estos casos las ruedas delanteras (directrices) se orientan en el sentido de la trayectoria curvilínea; sin embargo, las fuerzas perturbadoras, tales como la fuerza centrífuga, la

fuerza del viento (aerodinámica), la fuerza de adherencia y la transferencia de pesos, entre otras, generan un desplazamiento lateral sobre el eje trasero. La fuerza perturbadora que más afecta es la centrífuga, pues ésta se incrementa notablemente con la velocidad del vehículo o el radio de la curva. Otra condición que interviene en el deslizamiento transversal de un automóvil es el límite de estabilidad del mismo, el cual, se encuentra definido por el ‘círculo de adherencia de los neumáticos’ (Figura 2.12), que se encuentra limitado por la resultante de la fuerza de tracción y la fuerza centrífuga, es decir, cuando la resultante de estas dos fuerzas rebasa dicho círculo, se genera la condición de derrape. Por otra parte, al entrar un vehículo a una curva, siempre se genera una inclinación en el automóvil, la cual genera una transferencia de pesos adicional a la que se genera durante el frenado. Dicha transferencia implica que cierto porcentaje del peso de las ruedas exteriores se transfiera a las interiores, alterando de esta manera la fuerza de adherencia existente en cada rueda.

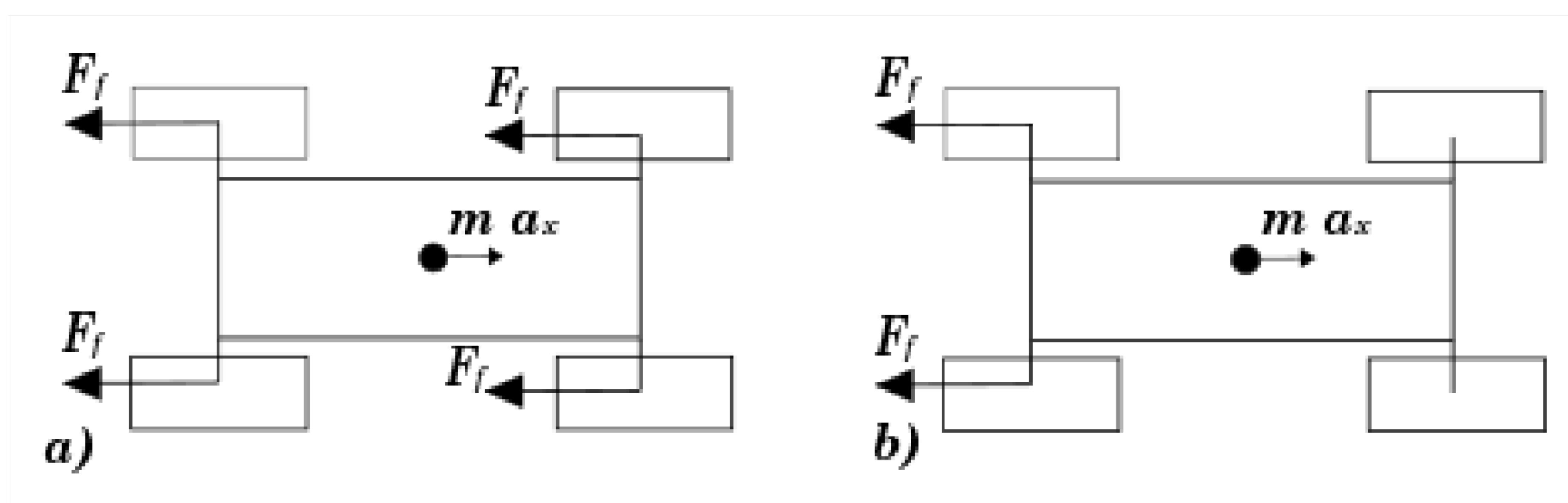


Figura 2.11. Condición de frenado delantero a) Normal; b) de bloqueo (Elaboración propia).

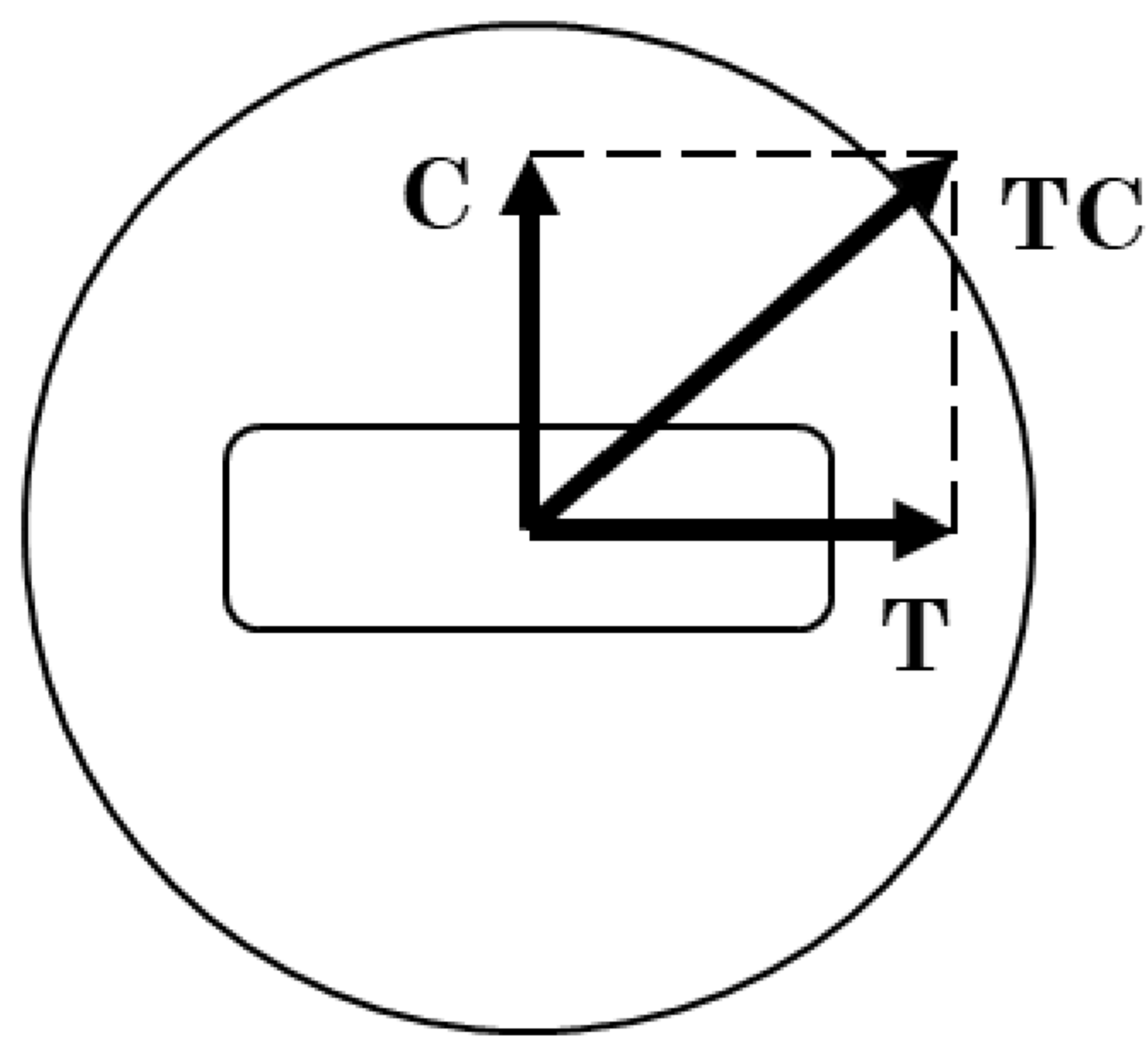


Figura 2.12. Círculo de adherencia (Elaboración propia).

2.4.1.6. *Transferencia de peso*

Cuando un vehículo experimenta una desaceleración, el peso ejercido en cada rueda sufre alteraciones, sin embargo, el peso total del vehículo se mantiene constante. La transferencia de pesos, como se ha mencionado, aumenta la fuerza ejercida sobre el eje delantero y la disminuye sobre el eje trasero, creando así un ‘momento de cabeceo’.

La transferencia de peso del eje trasero hacia el eje delantero depende de distintos factores como son la geometría y el peso del vehículo, entre otras. Dicha transferencia de pesos está definida por (Criado Ocaña, 2012):

$$TP = \frac{a}{g} * \frac{h}{L} * P \quad (3)$$

donde:

TP: Peso absoluto transferido desde el eje trasero al delantero,

a: Desaceleración del vehículo,

g: Aceleración de la gravedad,

h: Altura del centro de gravedad del automóvil,

P: Peso total del vehículo,

L: Distancia entre ejes.

A partir del valor obtenido con la expresión anterior, es posible calcular el peso sobre cada eje durante el frenado del automóvil empleando las siguientes ecuaciones:

$$P_{d,f} = P_d + TP \quad (4)$$

$$P_{t,f} = P_t + TP \quad (5)$$

donde:

$P_{d,f}$: Peso sobre el eje delantero durante el frenado,

$P_{t,f}$: Peso sobre el eje trasero durante el frenado,

TP : Peso transferido del eje trasero al delantero,

P_d : Peso sobre el eje delantero en condiciones estáticas,

P_t : Peso sobre el eje trasero en condiciones estáticas.

Los pesos calculados con las ecuaciones 4 y 5 deben cumplir que, al sumarse, den como resultado el peso real del vehículo, es decir:

$$P = P_{d,f} + P_{t,f} \quad (6)$$

2.4.1.7. Efecto rampa pendiente

El efecto rampa pendiente considera un ángulo positivo cuando el vehículo se encuentra en ascenso (rampa) y, como ángulo negativo cuando el vehículo se encuentra descendiendo (pendiente). Teniendo como efecto la suma o resta de frenado en la ecuación de frenado (Figura 2.13).

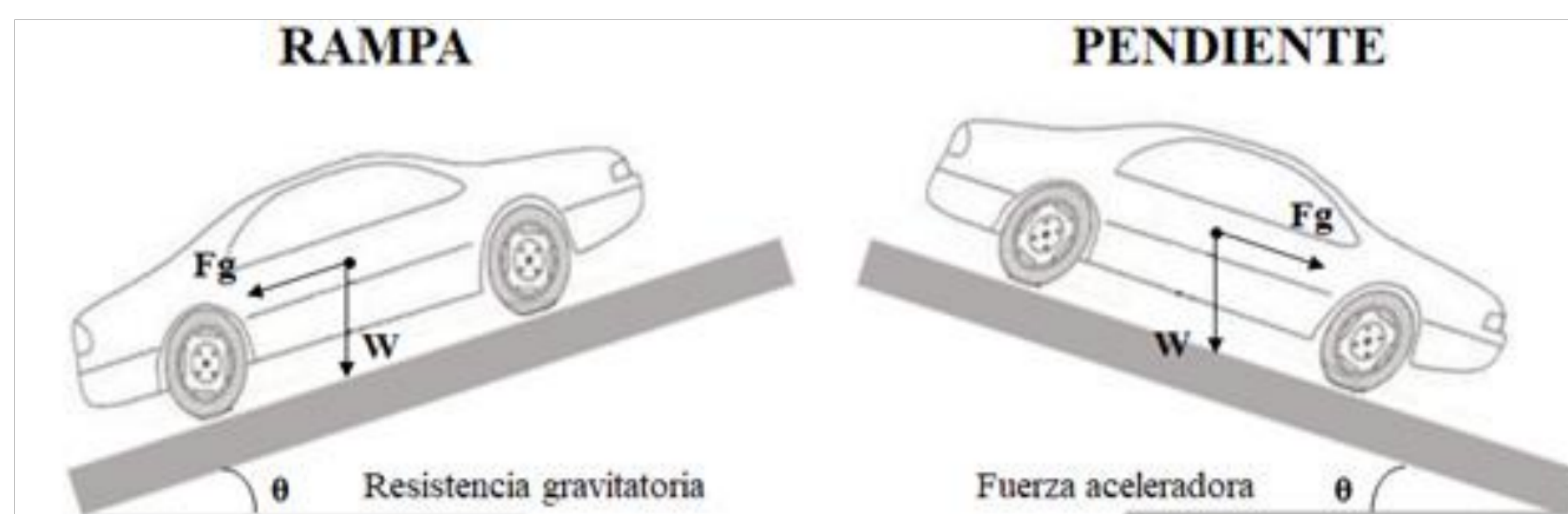


Figura 2.13. Efecto rampa pendiente sobre un vehículo (Flores & Remache, 2014).

2.4.2. Dinámica del proceso de frenado

El principio fundamental del sistema de frenos es la transformación de la energía cinética del vehículo en energía térmica (calor), que en sistemas convencionales (de fricción) es generada por el contacto entre pastilla y disco de freno. Sin embargo, en un sistema de frenos electromagnéticos, dicha energía está definida por el efecto Joule.

La energía cinética se define como:

$$k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7)$$

donde:

k : Energía cinética,

m : Masa del vehículo,

v : Velocidad del vehículo.

Por otra parte, el calentamiento por efecto Joule se define como:

$$Q = I^2Rt \quad (8)$$

donde:

Q : Calor generado,

I : Intensidad de corriente,

R : Resistencia eléctrica del conductor,

t : Tiempo que circula la corriente por el conductor.

Despreciando la energía producida por la resistencia a la rodadura, la resistencia aerodinámica, las pérdidas mecánicas y demás tipos de energías existentes, debido a su bajo valor con respecto al esfuerzo de frenado, se debe considerar que la energía cinética del vehículo se termina convirtiendo en energía calorífica a través del efecto Joule durante el frenado, mediante:

$$\frac{1}{2}mv^2 = I^2Rt \quad (9)$$

2.4.3. Cálculos de diseño del freno

En la Figura 2.14, se muestra el diagrama de cuerpo libre con las fuerzas que actúan sobre un automóvil durante el frenado del mismo, donde:

F_{xa} y F_{za} : Fuerzas aerodinámicas en el eje x y en el eje z, respectivamente,

M_{TP} : Momento generado por la transferencia de pesos,

W_a/g : $m \cdot a$: Fuerza de inercia del vehículo,

α_t y α_d : Desaceleración de la rueda trasera y delantera, respectivamente,

W : Peso del vehículo,

R_{rt} y R_{rd} : Resistencia a la rodadura de la rueda trasera y delantera respectivamente,

F_{ft} y F_{fd} : Fuerza de frenado en el eje trasero y delantero, respectivamente,

F_{zt} y F_{zd} : Reacciones en el eje trasero y delantero, respectivamente,

θ : Pendiente del terreno,

Z_{CG} : Altura del centro de gravedad del vehículo,

a_x : Desaceleración del vehículo.

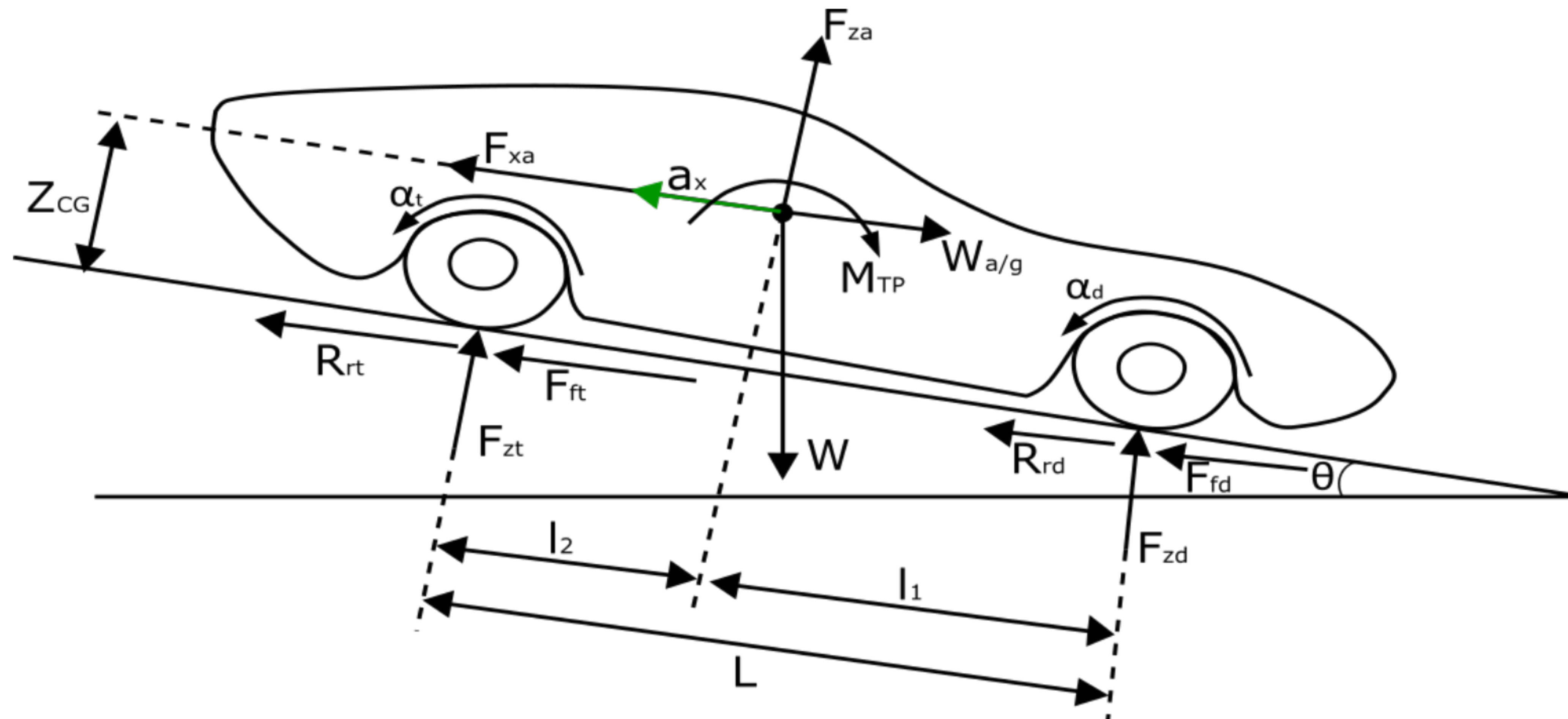


Figura 2.14. Fuerzas sobre un vehículo durante el frenado (Criado Ocaña, 2012).

Para realizar los cálculos de las fuerzas de frenado requeridas para reducir la velocidad de un automóvil es necesario considerar las fuerzas descritas anteriormente, además de considerar que: a) el vehículo sigue un movimiento rectilíneo y b) el vehículo se considera un sólido rígido.

2.4.3.1. Centro de gravedad del vehículo

A partir de los pesos de algunos automóviles tipo sedán mostrados en la Tabla 2.2 y conociendo la distribución del peso sobre cada eje del vehículo, es posible calcular la siguiente distribución promedio de pesos:

$$P: 1,255 \text{ kg}$$

$$P_d (61\%): 765.55 \text{ kg}$$

$$P_t (39\%): 489.45 \text{ kg}$$

donde:

P : Peso total del vehículo,

P_d : Peso sobre el eje delantero,

P_t : Peso sobre el eje trasero.

A partir de estos valores se calcula la posición horizontal del centro de gravedad del vehículo mediante:

$$CG_{d,x} = \frac{P_t}{P} L \quad (10)$$

$$CG_{d,x} = \frac{489.45}{1255} (2.647) = 1.0323 \text{ m}$$

$$CG_{t,x} = \frac{P_d}{P} L \quad (11)$$

$$CG_{t,x} = \frac{765.55}{1255} (2.647) = 1.6147 \text{ m}$$

donde:

$CG_{d,x}$: Distancia al centro de gravedad desde el eje delantero,

$CG_{t,x}$: Distancia al centro de gravedad desde el eje trasero,

L : Distancia entre ejes.

Se debe de cumplir que:

$$CG_{d,x} + CG_{t,x} = L \quad (12)$$

$$1.0323 + 1.6147 = 2.647$$

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de automóviles (Elaboración propia).

Modelo	Peso (kg)	Distancia entre ejes (mm)	Modelo	Peso (kg)	Distancia entre ejes (mm)
Figo aspire	1018	2491	Camry XLE Navi	1520	2825
Figo sedán	1018	2491	Corolla C	1290	2700
Figo Hatchback	1032	2491	Corolla MT	1290	2700
Fiesta	1198	2489	Corolla CVT	1290	2700
Focus	1462	2648	Corolla LE CVT	1290	2700
Fusion	1599	2850	Corolla SE MT	1295	2700
Yaris core mt	1020	2550	Corolla SE CVT	1295	2700
Yaris s mt	1025	2550	Corolla SE Plus	1300	2700
Yaris s cvt	1035	2550	Civic EX	1400	2700
Yaris sedan core mt	1020	2550	Civic EX T	1302	2700
Yaris sedan core cvt	1055	2550	Civic Turbo Plus	1245	2700
Yaris R LE MT	1082	2570	Civic Touring	1312	2700
Yaris r LE AT	1096	2570	Civic EX L	1318	2700
Yaris R XLE AT	1096	2570	City LX MT	1480	2600
Camry LE	1495	2825	City EX	1495	2600
Camry SE	1515	2825	City LX CVT	1122	2600
Camry XLE	1520	2825	Rio	1135	2580

Por otra parte, para realizar el cálculo de la altura del centro de gravedad es necesario realizar ciertas consideraciones, entre ellas está la inclinación del vehículo a una altura Z tal como se muestra en la Figura 2.15.

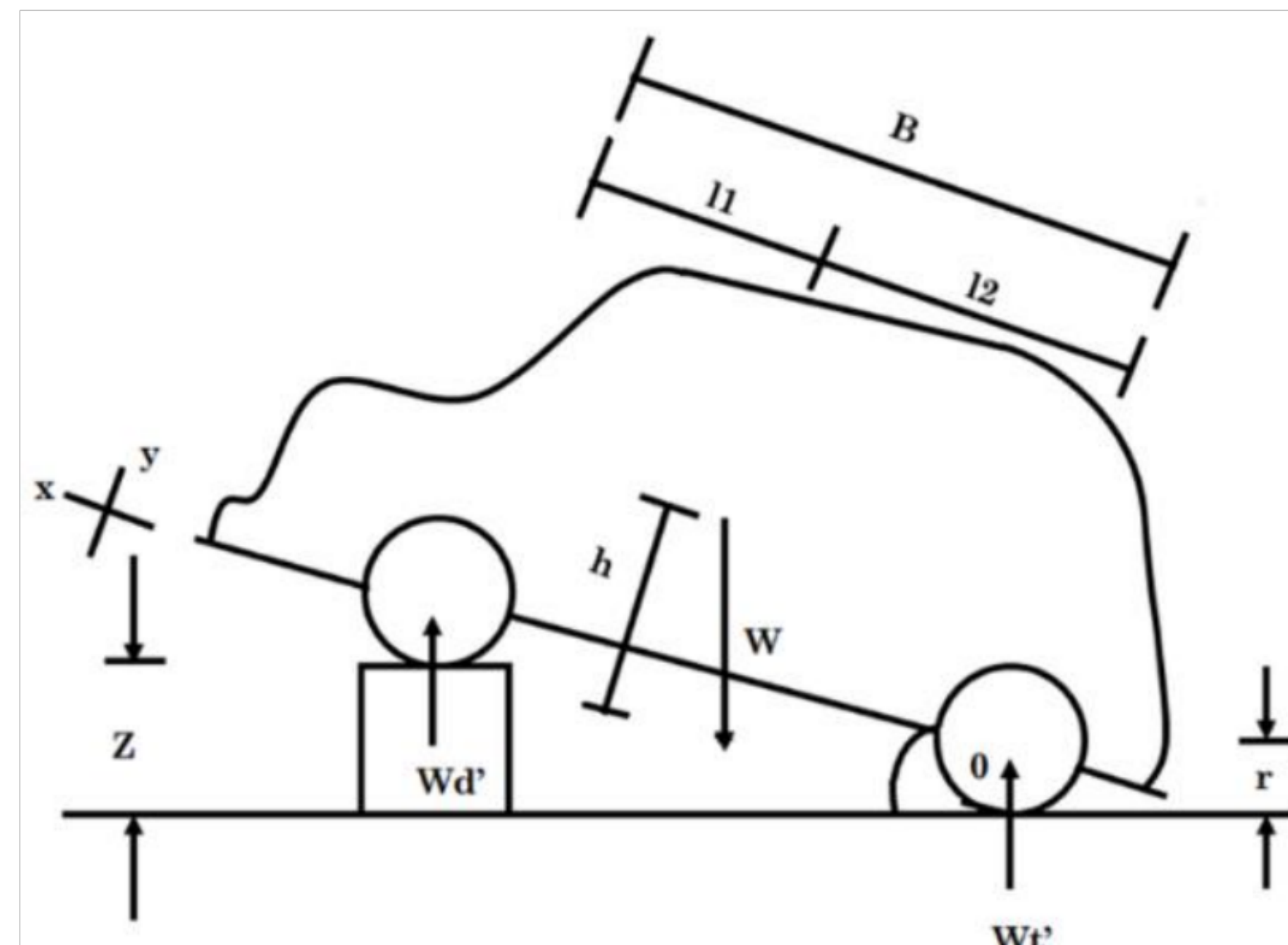


Figura 2.15. Altura del centro gravedad de un vehículo (Elaboración propia).

La inclinación del vehículo supone una transferencia de peso del eje delantero al trasero, la cual se puede aproximar al 14% del peso del eje delantero en condiciones estáticas, por tal motivo con esta inclinación el peso en cada uno de los ejes queda de la siguiente manera:

$$W'_d = 0.86P_d \quad (13)$$

$$W'_t = W_t + 0.14W_d \quad (14)$$

siendo los valores P_d y P_t , conocidos, se tiene que:

$$W'_d = (0.86) * (765.55) = 658.373 \text{ kg}$$

$$W'_t = (489.45) + (0.14) * (765.55) = 489.45 + 107.177 = 596.627$$

Se puede comprobar que $W'_d + W'_t = W$, mediante:

$$W'_d + W'_t = 658.373 + 596.627 = 1255 \text{ kg}$$

realizando la sumatoria de momentos sobre el eje trasero:

$$\sum \tau_0 = (W \cos \theta)(l_2) - (W \sin \theta)(h) - (W'_d \cos \theta)(L) = 0 \quad (15)$$

$$h = \frac{(W \cos \theta)(l_2) - (W'_d \cos \theta)(L)}{(W \sin \theta)} \quad (16)$$

donde:

$$\theta: 9.56$$

$$W: 1255 \text{ kg}$$

$$W'_d: 658.373 \text{ kg}$$

l_2 : 1.615 m

L : 2.647 m

$$h = \frac{(1255 \cos 9.56)(1.615) - (658.373 \cos 9.56)(2.647)}{1255 \sin(9.56)}$$

$$h = \frac{(1237.571)(1.615) - (649.229)(2.647)}{208.431}$$

$$h = \frac{1998.677 - 1718.509}{208.431}$$

$$h = \frac{280.168}{208.431}$$

$$h = 1.3 \text{ m}$$

2.4.3.2. Requerimientos de frenado

Asumiendo que existe una adecuada tracción (fricción) entre el neumático y la calzada que asegure un correcto frenado, el neumático desarrolla un esfuerzo de oposición al esfuerzo de rotación generado previamente por la rueda. Dicho valor está en función de las características del neumático, pero la fuerza de reacción generada como respuesta en la calzada está dada por (Criado Ocaña, 2012):

$$F_{frenado} = \frac{N_{frenado}}{R_{neumático}} \quad (17)$$

donde:

$F_{frenado}$: Reacción entre el neumático y la carretera,

$R_{neumático}$: Radio del neumático,

$N_{frenado}$: Momento o par de frenado.

El análisis de la fuerza de frenado en un vehículo se debe hacer sobre sus cuatro ruedas, ya que cada una de ellas se encuentra dotada por un sistema de frenado, por tal motivo, la fuerza total de frenado es la suma de las fuerzas sobre cada una de las ruedas:

$$F_{total \text{ de frenado}} = F_{frenado DI} + F_{frenado DD} + F_{frenado TI} + F_{frenado TD} \quad (18)$$

donde:

$F_{frenado DI}$: Fuerza de frenado en la rueda delantera izquierda,

$F_{frenado DD}$: Fuerza de frenado en la rueda delantera derecha,

$F_{frenado TI}$: Fuerza de frenado en la rueda trasera izquierda,

$F_{frenado TD}$: Fuerza de frenado en la rueda trasera derecha.

Debido a la transferencia de pesos que experimenta el vehículo durante el frenado, la capacidad de frenada de cada eje se ve alterada debido a que dicha capacidad depende del peso sobre cada eje y el coeficiente de fricción entre el neumático y la calzada. Bajo condiciones estáticas, la fuerza máxima de frenado se encuentra definida por:

$$F_{fd} = \mu P_d \quad (19)$$

$$F_{ft} = \mu P_t \quad (20)$$

donde:

F_{fd} : Fuerza de frenado en el eje delantero,

F_{ft} : Fuerza de frenado en el eje trasero,

μ : Coeficiente de fricción entre neumático y calzada,

P_d : Peso del sobre el eje delantero en condiciones estáticas,

P_t : Peso del sobre el eje trasero en condiciones estáticas.

Sin embargo, las ecuaciones 19 y 20 se vuelven inválidas durante el frenado del automóvil, esto debido a la transferencia de pesos; por tal motivo, las ecuaciones que se han de usar para el cálculo real de la fuerza de frenado están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$F_{fd} = \mu P_{d,f} = \mu(P_d + TP) \quad (21)$$

$$F_{ft} = \mu P_{t,f} = \mu(P_t - TP) \quad (22)$$

Para la aplicación de las ecuaciones 21 y 22, se ha de considerar que μ sea constante durante todo el frenado. Al mismo tiempo, es posible apreciar que la transferencia de pesos aumenta la capacidad de frenado en el eje delantero, mientras que en el eje trasero la reduce.

A partir de lo anterior, es posible afirmar que la fuerza máxima de frenado es el resultado de la suma de las fuerzas frenantes presentes en el eje trasero y en el delantero, es decir:

$$F_{max} = F_{fd} + F_{ft} \quad (23)$$

o bien:

$$F_{max} = \mu * [(P_d + TP) + (P_t - TP)] = \mu * P \quad (24)$$

Sabiendo que:

$$P = W * g \quad (25)$$

entonces,

$$F_{max} = \mu * W * g \quad (26)$$

donde:

μ : Coeficiente de adherencia entre el neumático y la calzada,

W : Masa del vehículo,

g : Aceleración de la gravedad.

Conociendo estos valores, se obtiene:

$$F_{max} = (0.9) * (1255) * (9.81)$$

$$F_{max} = 11,080.395 \text{ N}$$

A partir de la fuerza máxima de frenado calculada, es posible estimar el máximo par de frenado aplicable en el sistema de frenos electromagnéticos. Este par de frenado está definido por la fuerza máxima de frenado y la distancia entre el eje de rotación sobre el que gira el disco de freno y el campo magnético generado por el electroimán. Por lo tanto, el par de frenado es:

$$M_f = F_{max} * 0.11 \quad (27)$$

$$M_f = 11,080.395 * 0.11$$

$$M_f = 1,218.843 \text{ Nm}$$

Es posible comprobar que, si se calculan por separado los pares de frenado sobre cada eje, la suma de éstos será igual a la obtenida a partir de la ecuación 27:

$$M_f = F_{max} * 0.11 = M_{d,f} + M_{t,f} = F_{d,max} * 0.11 + F_{t,max} * 0.11 \quad (28)$$

$$M_f = 7,258.268 * 0.11 + 3,822.127 * 0.11$$

$$M_f = 798.409 + 420.434$$

$$M_f = 1,218.843 \text{ Nm}$$

Lo cual coincide con la fuerza máxima de frenado que puede ser aplicada al vehículo.

2.4.3.3. Reparto óptimo de la fuerza de frenado

Como ya se ha mencionado, cuando un vehículo se encuentra estático, su masa se reparte entre el eje delantero y trasero; siendo ligeramente más pesado en el eje delantero debido a que en esta zona se encuentra el motor, la caja de cambios, diferencial, transmisión y demás elementos mecánicos de un automóvil, resultando en un promedio del 61% del peso total en el eje delantero y el 39% en el eje trasero.

Al estar el menor peso del vehículo sobre el eje trasero y tomando en cuenta la transferencia de peso, del eje trasero hacia el delantero, que se produce durante el frenado, es necesario que el diseño del reparto de fuerzas sea tal que no se llegue al punto de bloqueo sobre las ruedas traseras. En otras palabras, la fuerza de frenado sobre el eje trasero no será la misma que la que se aplique sobre el eje delantero, siendo menor la fuerza a ejercer sobre el eje trasero.

Es por ello, que los ensambladores de vehículos equipan sus sistemas de frenado con reguladores de presión, los cuales facilitan la manipulación de la presión del circuito y así evitan el bloqueo de los neumáticos y las consecuencias que dicho bloqueo implica.

La Figura 2.16, representa la desaceleración relativa en el frenado respecto al porcentaje de fuerza frenante aplicado sobre cada eje. Observando que el punto óptimo de reparto de fuerzas corresponde al punto 'O' con un 75% sobre el eje delantero y un 25% en el trasero, obteniendo así una desaceleración relativa de 0.75. Al observar el punto 'A', es posible apreciar que al aplicar el 40% de la fuerza frenante sobre el eje delantero y el 60% restante sobre el eje trasero se obtiene una desaceleración relativa de aproximadamente 0.63, sin embargo, se asume que al aplicar dicha distribución de fuerzas se lleva a los neumáticos traseros por encima de su punto de bloqueo.

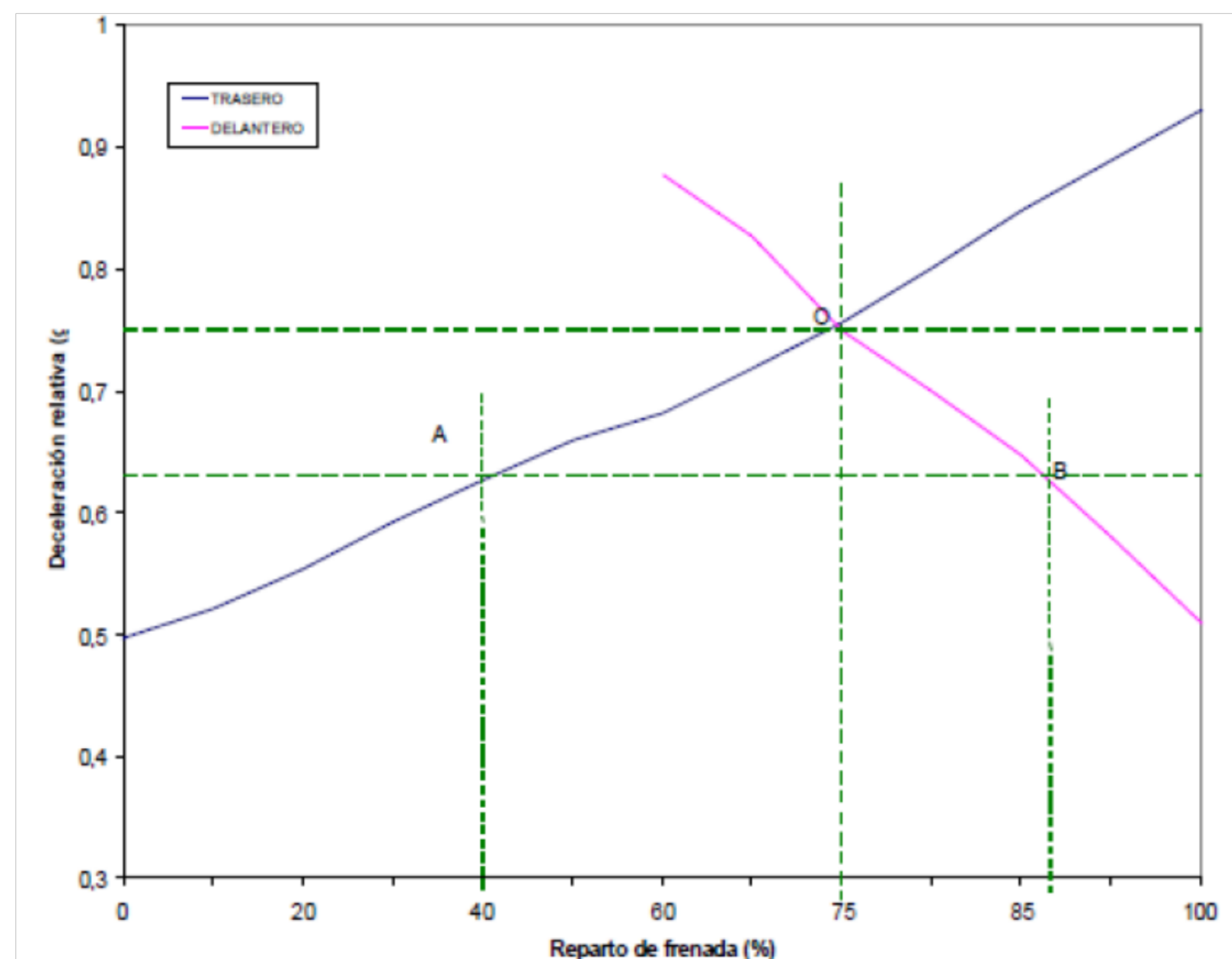


Figura 2.16. Reparto óptimo de frenado (Criado Ocaña, 2012)

Por otra parte, al observar el punto 'B', es posible apreciar que aplicando un 86% de la fuerza frenante sobre el eje delantero y tan sólo el 14% sobre el eje trasero, se logra la misma desaceleración relativa que en el punto 'A'. Sin embargo, usar el reparto de fuerzas representado en el punto 'B' implica ciertos beneficios en comparación con los repartos mostrados en los puntos 'A' y 'O', ya que en el primero de ellos se produce el bloqueo de los neumáticos traseros mucho antes que los delanteros, lo cual implica graves consecuencias. Por otra parte, si se utiliza el reparto de fuerzas del punto 'O' se tiene una mayor desaceleración relativa, sin embargo, se corre el riesgo de que los neumáticos traseros se bloqueen antes que los delanteros, motivo por el cual se trabaja con el reparto de fuerzas indicado por el punto 'B'.

2.4.3.4. Desaceleración del vehículo

Partiendo de la segunda ley de Newton, se puede ver que la aceleración de un cuerpo es, en magnitud, directamente proporcional a la fuerza resultante que actúa sobre él en dirección paralela a dicha fuerza; al mismo tiempo que se observa que la aceleración para una fuerza dada, es inversamente proporcional a la masa del cuerpo (ecuación 18). Sin embargo, si esta aceleración se opone a la dirección del movimiento se denomina desaceleración.

$$a = \frac{F_{Total\ de\ frenado}}{m} \quad (29)$$

donde:

a : Desaceleración,

F total de frenado: $\sum F_{frenado\ DI,DD,TI,TD}$,

m : Masa del vehículo.

Siendo estos valores conocidos, obtenemos que:

$$a = \frac{11,080.395}{1255\ m}$$

$$a = 8.829 \frac{m}{s^2} = 0.9g$$

2.4.3.5. Velocidad en un tiempo t

El cálculo de la velocidad en un instante de tiempo t para un freno electromagnético se calcula a partir de la dinámica de la rotación de un disco (ecuación 30).

$$I\alpha = \sum_{i=1}^n \tau_{Ext} \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^n \tau_{Ext} = \tau_B + \tau_{aire}$$

$$\tau_{aire} = 0$$

$$\tau_B = r \times F = -F \times r$$

$$I = \frac{1}{2}MR^2$$

$$F = B^2 a^2 \rho \omega \sigma d$$

donde:

B : Campo magnético,

a^2 : Área de sección transversal del electroimán,

ρ : Distancia del eje al electroimán,

ω : Velocidad angular,

σ : Conductividad del disco,

d : Espesor del disco,

$r = \rho$: Distancia del eje al electroimán

Sustituyendo se obtiene:

$$I\alpha = -B^2 a^2 \rho^2 \omega \sigma d$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = -B^2 a^2 \rho^2 \omega \sigma d$$

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{-B^2 a^2 \rho^2 \sigma d}{I} dt$$

si:

$$k = B^2 a^2 \rho^2 \sigma d$$

entonces:

$$\frac{d\omega}{\omega} = -\frac{k}{I} dt$$

Integrando:

$$\int_{\omega_0}^{\omega} \frac{d\omega}{\omega} = -\frac{k}{I} \int_{t_0}^t dt$$

$$\ln[\omega|_{\omega_0}] = -\frac{k}{I} t|_{t_0=0}$$

$$\ln \omega - \ln \omega_0 = -\frac{k}{I} t$$

$$\ln \frac{\omega}{\omega_0} = -\frac{k}{I} t$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = e^{-\frac{k}{I} t}$$

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{k}{I} t} \quad (31)$$

Donde la ecuación 31 indica la velocidad angular del neumático del vehículo para cualquier tiempo t .

2.4.3.6. Tiempo de parada

El tiempo de parada es el intervalo de tiempo t , durante el cual están actuando los frenos con el objetivo de reducir la marcha del vehículo. Para conocer el valor de este tiempo es necesario despejar la variable t de la ecuación 31, de lo cual se obtiene que:

$$t = -\frac{I}{k} (\ln \omega - \ln \omega_0) \quad (32)$$

Considerando una velocidad inicial de 180 km/h (333.33 rad/s), un frenado al máximo de su capacidad ($k= 2.395$) y sabiendo que $I= 9.249$. Se obtiene que el tiempo de frenado para un sistema de frenos electromagnéticos es de:

$$t = -\frac{9.249}{2.395} (\ln 0.01 - \ln 333.33)$$

$$t = -3.8618 * (-4.6051 - 5.8091)$$

$$t = 40.22 \text{ seg}$$

2.4.3.7. Distancia de frenado total

Sabiendo que la velocidad a la que se mueve un objeto es igual a la variación de la posición del objeto respecto del tiempo $\left(\frac{dx}{dt}\right)$, entonces se puede deducir la distancia de frenado total del vehículo a través de la integral de la ecuación 31, para ello primero se ha de convertir la velocidad angular a velocidad lineal a través de la igualdad $v=\omega r$. Entonces la ecuación 31 se convierte en:

$$\frac{dx}{dt} = v_0 e^{-\frac{k}{I}t} \quad (33)$$

Integrando respecto al tiempo se obtiene:

$$x - x_0 = -\frac{I}{k} v_0 (e^{-\frac{kt}{I}} - 1) \quad (34)$$

Considerando el tiempo de frenado calculado ($t=40.22$ seg) y los mismos valores para k e I , se obtiene la distancia de frenado:

$$x - x_0 = -\frac{9.249}{2.395} (50) (e^{-\frac{(2.395)(40.22)}{9.249}} - 1)$$

$$x - x_0 = -193.089(-0.9999)$$

$$x - x_0 = 193.1m$$

2.4.3.8. Resistencia a la rodadura

La resistencia de rodadura es una fuerza que contempla la intervención de la fuerza normal entre las ruedas y considera el peso promedio de un automóvil compacto, que es aproximadamente 1,260 kg., en conjunto con el coeficiente de rodadura (Figura 2.17). Teniendo la siguiente ecuación:

$$Fr = (\mu b)(Fn) \quad (35)$$

donde:

μb : Coeficiente de rodadura (adimensional),

Fn : Fuerza normal en las ruedas (kg),

Fr : Resistencia a la rodadura.

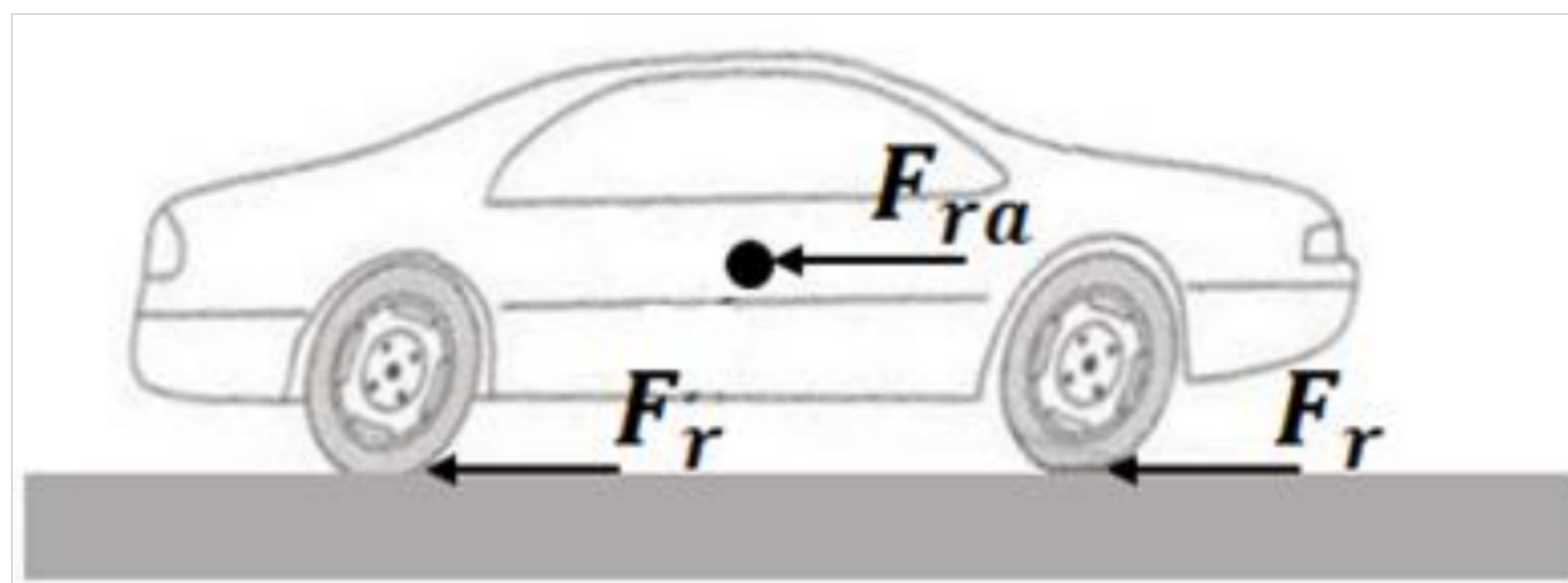


Figura 2.17. Resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica (Flores & Remache, 2014).

La Tabla 2.1 lista los coeficientes de rodadura presentes en distintos tipos de superficies a los que se adhieren los neumáticos.

2.4.3.9. Eficacia de frenado

La desaceleración y el frenado total de un automóvil en movimiento es consecuencia de la acción de las distintas fuerzas presentes durante el frenado del vehículo, es decir, la suma de la fuerza de frenado aplicada por el conductor y la fuerza de adherencia entre los neumáticos y la calzada. Como se ha mencionado, en caso de no existir adherencia entre los neumáticos y el asfalto, el frenado total y desaceleración del automóvil se vuelve nula, por otra parte, mientras mayor adherencia exista entre dichos elementos mayor será la desaceleración del vehículo y menor será el tiempo y distancia de frenado total.

Para medir el grado de desaceleración en el frenado, se valora el rendimiento o eficacia de frenado en los automóviles de forma porcentual, y se hace en función del peso del vehículo y la fuerza de frenado aplicada, sobre los cuatro neumáticos:

$$Eficacia\ de\ frenado = \frac{\sum F_{frenado}}{Peso} \times 100\% \quad (36)$$

La eficacia de frenado permite conocer el grado de desaceleración que se produce en un vehículo al frenar. Una fuerza eficacia del 100% representa una desaceleración aproximada de 1 g, es decir, unos 9.8 m/s² (Criado Ocaña, 2012).

2.4.3.10. Requerimientos técnicos de diseño

Para el diseño del electroimán (inductor) se supone que el campo magnético producido por las corrientes inducidas (parásitas) es lo suficientemente pequeño para considerar que la fuerza de frenado proviene únicamente de la acción del campo magnético externo sobre las corrientes inducidas. También se considera que el campo magnético **B** debe ser perpendicular al plano del disco de freno (inducido).

Para un disco metálico que se mueve dentro de un campo magnético variable, el par de frenado se define como:

$$\tau = B^2 Ar_1^2 \omega \sigma d \quad (37)$$

donde:

τ : Par de frenado,

B : Campo magnético,

A : Área de sección transversal del electroimán,

r_1 : Distancia del eje a 'A',

ω : Velocidad angular del disco,

σ : Conductividad eléctrica del material del disco,

d : Espesor del disco.

Considerando un disco de freno sólido de dimensiones y materiales típicos, que el vehículo se desplaza a una velocidad de 180 km/h y que la resistividad eléctrica del aluminio es de $\rho=2.75 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ (Halliday *et al.*, 1999) se tienen los siguientes valores para los frenos delantero y trasero:

τ_d : 798.409 Nm	ω : 333.33 rad/seg = 50 m/seg
τ_t : 420.434 Nm	σ : $1/\rho=3.636 \times 10^7 (\Omega\text{m})^{-1}$
A : $1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	d : 10 mm = 0.01 m
r_1 : 110 mm = 0.11 m	

$$B_d = \sqrt{\frac{\tau_d}{Ar_1^2 \omega \sigma d}} \quad (38)$$

$$B_d = \sqrt{\frac{798.409}{(1.963 \times 10^{-3})(0.11)^2(333.33)(3.636 \times 10^{-7})(0.01)}}$$

$$B_d = \sqrt{\frac{798.409}{2,878.749}}$$

$$B_d = 0.527 \text{ T}$$

$$B_t = \sqrt{\frac{420.434}{(5.027 \times 10^{-3})(0.11)^2(333.33)(1.033 \times 10^{-7})(0.01)}}$$

$$B_t = \sqrt{\frac{420.434}{2,878.749}}$$

$$B_t = 0.382 \text{ T}$$

A partir de estos valores de B se diseñan los electroimanes que generan el efecto de frenado en cada una de los neumáticos del vehículo, para esto se considera que el campo magnético de un electroimán circular se encuentra definido por:

$$B_i = \frac{\mu NiA}{2\pi(R^2 + Z^2)^{3/2}} \quad (39)$$

donde:

B_i : Campo magnético trasero o delantero,

μ : Permeabilidad magnética absoluta,

N : Número de vueltas,

i : Corriente que pasa por el alambre,

A : Área de sección transversal del electroimán,

R : Radio del electroimán,

Z : Distancia del disco al electroimán.

Es necesario conocer el número de vueltas que debe tener el electroimán para generar el par de frenado necesario para reducir y detener la marcha del vehículo. Para ello se considera:

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad (40)$$

donde:

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío,

μ_r : Permeabilidad magnética del material del núcleo del electroimán.

El núcleo del electroimán debe ser de un material tipo ferromagnético y siendo el hierro el más común de ellos se toma como base para los cálculos su permeabilidad relativa, el cual es de $\mu_r=5000$; se sabe además que $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ por lo tanto el valor de μ será:

$$\begin{aligned} \mu &= (4\pi \times 10^{-7})(5000) \\ \mu &= 6.283 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Por otra parte, la corriente i que pasa a través del embobinado se obtiene partiendo de la suposición de que dicha corriente es suministrada por una batería de automóvil, la cual proporciona un voltaje $V=12$ volts. Se considera

también que el alambre del embobinado sea alambre de cobre tipo AWG calibre 15 (diámetro nominal de 1.45 mm) y resistencia eléctrica de 8.437×10^{-3} ohm/m (Condumex, 2016). Considerando que existe en el circuito electromagnético un potenciómetro que aporta resistencia eléctrica mínima de 500 ohms y partiendo de la ley de Ohm se obtiene:

$$i = \frac{V}{R} \quad (41)$$

$$i = \frac{12}{500 + 8.437 \times 10^{-3}}$$

$$i = 23.9996 \times 10^{-3} \text{ Amperes}$$

El área máxima que puede tener el electroimán en su sección transversal se encuentra limitada por las dimensiones del disco de freno, teniendo como máximo un diámetro de 54.5 mm, a partir del cual se calcula el área del electroimán:

$$A = \pi R^2 \quad (42)$$

$$A = (\pi)(0.025^2)$$

$$A = 1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Por último, se considera que la distancia entre la superficie del electroimán y la superficie más baja del disco de freno es de 16 mm. Conociendo todos los valores, es posible calcular el número de vueltas requeridas por el electroimán para generar el par de frenado deseado:

$$N_d = \frac{2\pi B_d (R^2 + Z^2)^{3/2}}{\mu i A} \quad (43)$$

$$N_d = \frac{2\pi(0.527)(0.025^2 + 0.016^2)^{3/2}}{(6.283 \times 10^{-3})(0.024)(1.963 \times 10^{-3})}$$

$$N_d = \frac{8.587 \times 10^{-5}}{2.961 \times 10^{-7}} = 292.195 \approx 292 \text{ vueltas}$$

$$N_t = \frac{2\pi B_t (R^2 + Z^2)^{3/2}}{\mu i A} \quad (44)$$

$$N_t = \frac{2\pi(0.382)(0.025^2 + 0.016^2)^{3/2}}{(6.283 \times 10^{-3})(0.024)(1.963 \times 10^{-3})}$$

$$N_t = \frac{6.276 \times 10^{-5}}{2.961 \times 10^{-7}} = 211.967 \approx 212 \text{ vueltas}$$

2.5. Características de las partes

En este trabajo de tesis se analizan los requerimientos de protección superficial como el tipo de material a utilizar para el optimizar la vida y el desempeño de las piezas. Es decir, escoger un material que cuente con las propiedades magnéticas adecuadas para la generación de la fuerza de frenado, así como escoger un tipo de recubrimiento para las piezas que les permita mantener sus propiedades tanto internas como externas sin importar las condiciones ambientales bajo las que opere.

2.5.1. Tratamiento superficial

Los recubrimientos no metálicos empleados en la protección de la corrosión pueden clasificarse en dos: a) recubrimientos orgánicos (Vidriado/vidrios, fosfatizado/fosfatación, oxidación superficial y sulfinizado), y b) recubrimientos inorgánicos (Esmaltado, pinturas, cerámicos), los cuales a su vez se pueden clasificar en (Vallejo Figueroa, 2006; Dominighi, 2001; Becerra González, Cortés Gutiérrez & Hernández Prieto, 2016; Cuesta Fernandez, 2009):

- Fosfatizado/fosfatación: Consiste en sumergir las piezas de acero en una solución acuosa de un fosfato metálico ácido. Por este método se logra la protección del Fe, Cd, Al, Mg, Cu y sus aleaciones.
- Oxidación superficial: La formación de una película superficial de óxido para proteger el metal es un medio bastante eficaz, que se emplea, sobre todo, para las aleaciones de aluminio y magnesio. La oxidación puede realizarse por calentamiento, por electrólisis (oxidación anódica) y por ataque de un ácido (oxidación química).
- Vidriado/vidrios: Los tipos de vidrios más utilizados son el de gran contenido de sílice y el vidrio de boro silicato. Se emplea el esmaltado para cubrir artefactos sanitarios, vagones tanques utilizados para transportar productos químicos o alimentos, etcétera.

- **Sulfinizado:** Se protege, por este método, al hierro y acero, sumergiéndolo en un baño salino constituido por sulfito de sodio, cloruro y cianuro de sodio, a una temperatura de más de 500 °C. Se forma un sulfocianuro de sodio que cubre el metal, penetrando en el mismo, formando una capa de menos de medio milímetro de espesor.
- **Esmaltado:** Los esmaltes son esencialmente borosilicatos de calcio, de potasio y de plomo, que se aplican formando una papilla sobre el metal previamente desengrasado y decapado. Una vez secas, se introducen las piezas en un horno donde se funde el esmalte formando una capa protectora vidriada. El esmaltado se utiliza para utensilios de cocina caseros y para aparatos empleados en la industria química. Los esmaltes tienen el inconveniente de que no son elásticos y saltan con facilidad si se golpean.
- **Pinturas:** Normalmente deben aplicarse por lo menos dos capas, sobre una imprimación previa sobre el metal de un pigmento pasivador, como el minio o el cromato de zinc, que detienen la corrosión aun cuando se produzca algún poro en la capa de pintura que llegue hasta el metal base. Las capas de pintura al aceite evitan que el pigmento pasivador sea arrastrado por el agua de lluvia o alterado por la atmósfera viciada. Las pinturas a base de purpurinas formadas por aluminio o polvo de aluminio tienen propiedades impermeabilizantes superiores a las pinturas al aceite. También se emplean pinturas de caucho clorado y poliestireno, que contienen polvo de zinc y que al secarse dan un acabado similar al galvanizado. Las pinturas cuya base son los alquitranes procedentes de la destilación de la hulla, los betunes naturales, se emplean también para la protección, sobre todo, de tuberías enterradas. A las pinturas a base de alquitrán conviene añadirles cal para neutralizar su acidez. Todas las pinturas de esta clase tienen el inconveniente de que se cuarteán si sufren grandes

variaciones de temperatura, y además fluyen en tiempo caluroso y se hacen frágiles en tiempo frío.

- **Vinílicos:** Este tipo de recubrimiento produce una película homogénea y casi impermeable, además de excelente tenacidad y resistencia química. La película tiene a excluir los iones y el oxígeno de las superficies sobre las que se aplica. Son inertes a casi todos los ácidos inorgánicos, sales álcalis, así como el agua, hidrocarburos alifáticos, alcoholes y materiales similares. Estos recubrimientos no presentan cambios en su apariencia, aún en exposiciones de más de diez años.
- **Cerámicos:** Sus propiedades son muy variadas; existen materiales cerámicos blandos (yeso y talco) y otros duros (cuarzo y carborundo). Las diversas aplicaciones de los materiales cerámicos derivan de esta variedad, siendo importantes sus capacidades de resistir el calor y los ataques de los agentes químicos, presentando generalmente como inconveniente, su fragilidad. Los materiales cerámicos de más utilidad industrial, teniendo en cuenta sobre todo su utilización en medios agresivos y por lo tanto sus características de materiales a utilizar como alternativa de los metales y polímeros sintéticos en la lucha contra la corrosión, son:
 - **Gres:** aparatos para la industria química, revestimientos de tuberías, suelos industriales, revestimientos de bombas y ventiladores, entre otros.
 - **Ladrillos antiácidos:** combinados con membranas impermeables protegen térmica y mecánicamente substratos de acero u hormigón en ambientes corrosivos.
 - **Materiales refractarios:** se utilizan para altas temperaturas en hogares, cámaras de combustión y zonas de reacción.
 - **Porcelana, Vidrio, Hormigón y Cemento:** Los recubrimientos de esmalte cerámicos o vidriado, porcelanizados, o peltres son básicamente similares a los recubrimientos de vidrio, su principal

diferencia consiste en la aplicación sobre metales más delgados a espesores también más delgados, generalmente cuatro milésimas en una sola capa, o de ocho a diez milésimas para dos capas.

2.5.2. Selección del material

Los materiales se pueden comportar de diferente manera frente a la acción de un campo magnético dando lugar a diferentes valores de μ , μ_r , y de χ_m (permeabilidad magnética absoluta, permeabilidad magnética relativa y susceptibilidad magnética, respectivamente). Esto permite clasificar el comportamiento magnético de los materiales según el valor de dichos parámetros. Los materiales diamagnéticos y los materiales paramagnéticos se engloban bajo la denominación de materiales amagnéticos (Tabla 2.3), en los que la permeabilidad magnética prácticamente es igual a la del vacío. Por lo tanto, la permeabilidad relativa μ_r de estos materiales es prácticamente igual a 1. A continuación se describen dichos materiales (Rodríguez Pozueta, 2014, 2017):

Tabla 2.3. Clasificación de los materiales magnéticos (Rodríguez Pozueta, 2014).

Tipos de material		μ		μ_r		χ_m
Amagnéticos	Diamagnéticos	$\mu \approx \mu_0$	$\mu < \mu_0$	$\mu_r \approx 1$	$\mu_r < 1$	Del orden de -10^5
	Paramagnéticos		$\mu > \mu_0$		$\mu_r > 1$	Del orden de 10^3
Ferromagnéticos		$\mu \gg \mu_0$		$\mu_r \gg 1$		De valor muy alto (10^3 a 10^5)

- **Materiales diamagnéticos:** En estos materiales cuando no hay un campo magnético externo los efectos magnéticos de los electrones de cada átomo se anulan entre sí dando una resultante nula. Por lo tanto, inicialmente cada átomo es magnéticamente neutro. Al aplicar un campo magnético externo aparecen fuerzas sobre los electrones que modifican sus órbitas de forma que ahora dan un efecto resultante no nulo y de sentido opuesto al del campo magnético externo (luego, su susceptibilidad magnética χ_m es negativa). Ejemplos de estos materiales son bismuto, oro, plata y cobre.

- **Materiales paramagnéticos:** En estos materiales los efectos magnéticos de los electrones de cada átomo no se anulan entre sí y, en consecuencia, tanto los átomos como las moléculas tienen un efecto magnético neto. Sin embargo, si no hay un campo magnético externo las moléculas se distribuyen al azar y sus efectos magnéticos se anulan entre sí, por lo que el material se muestra magnéticamente neutro. Al aplicar un campo magnético externo aparecen fuerzas sobre las moléculas que tiende a orientarlas a favor del campo externo, de forma que ahora dan un efecto resultante no nulo y del mismo sentido que el del campo magnético externo (luego, su susceptibilidad magnética m es positiva). Ejemplos de estos materiales son aluminio, titanio y magnesio. A diferencia del diamagnetismo, que no depende de la temperatura, el paramagnetismo es inversamente proporcional a la temperatura, ya que las fuerzas magnéticas sobre las moléculas se ven reducidas cuando crece la agitación de éstas al aumentar la temperatura.
- **Materiales ferromagnéticos:** En estos materiales, los átomos próximos entre sí tienen sus efectos magnéticos alineados y constituyen un pequeño imán, denominado dominio magnético, en el que los efectos magnéticos de todos sus átomos se suman. Si no hay campo magnético externo, los dominios magnéticos del material se distribuyen al azar y éste se muestra magnéticamente neutro. Al aplicar un campo magnético externo, los dominios del material ferromagnético se orientan de forma que suman sus efectos a los del campo exterior; en consecuencia, dan un efecto resultante no nulo y del mismo sentido que el del campo magnético externo. Este efecto es muy notable y aumenta en varios órdenes de magnitud la inducción magnética \mathbf{B} con respecto a la que se obtiene en vacío. Cuando desaparece el campo externo, algunos dominios siguen con la orientación que les impuso dicho campo externo y no vuelven a su

posición de partida. Entonces, el material genera un campo magnético neto por sí mismo (en ausencia de campo exterior) creando así un imán permanente. Los materiales ferromagnéticos más habituales son hierro, cobalto y níquel. En materiales ferromagnéticos, la agitación térmica tiende a desalinearse los dominios. Por encima de la llamada temperatura de Curie (T_C) los materiales ferromagnéticos se vuelven paramagnéticos. La permeabilidad magnética de estos materiales es muy superior a la del vacío μ_0 , tomando su permeabilidad relativa μ_r normalmente valores entre 2×10^3 y 10^4 , aunque en algunas aleaciones puede alcanzar valores de 10^5 . El comportamiento magnético de estos materiales no es lineal, por lo que su permeabilidad magnética no es constante y depende del valor de la intensidad magnetizante H y de la historia previa del material.

Capítulo 3. Resolución del problema

3.1. Metodología QFD

La implementación de la metodología QFD permite planificar el proceso de diseño desplegando las funciones de calidad tales como planificación, diseño y control para elaborar un producto de calidad.

En este capítulo se describen las dos primeras etapas de la metodología QFD para el diseño de un sistema de freno electromagnético partiendo de la identificación de los requerimientos de dicho sistema, estableciendo las características, objetivos y metas de diseño, los cuales son la base para realizar el modelo 3D del freno electromagnético, el cual se diseña utilizando el software SolidWorks.

3.1.1. Etapa I QFD

La elaboración de la casa de la calidad permite identificar los requerimientos del sistema de freno electromagnético a desarrollar y, a través de una serie de ocho pasos, permite convertir dichos requerimientos en características técnicas y establecer sus valores objetivos. A continuación, se describe el desarrollo de dichos pasos.

3.1.1.1. Identificación de los requerimientos del sistema de freno electromagnético

El sistema de freno electromagnético a diseñar debe cumplir con una serie de características tanto de diseño como de seguridad. Estas características se enlistan en la Tabla 3.1.

Una vez obtenidos y listados estos requerimientos, se agrupan según los atributos que mejor le definan, para el caso de este proyecto se han identificado los siguientes atributos: Diseño, Seguridad, Materiales y Otros.

Tabla 3.1. Requerimientos del freno electromagnético (Elaboración propia).

Ítem	Requerimientos
1	Desactivación inmediata
2	No afecte otros sistemas
3	No se caliente
4	Par de frenado homogéneo
5	Activación inmediata
6	Resistencia a la corrosión
7	Mayor confiabilidad
8	Mayor durabilidad
9	Disco ligero
10	Adaptabilidad a cualquier auto
11	Aspecto agradable
12	Fácil instalación
13	Fácil mantenimiento

A partir del conjunto de atributos identificados, se clasifican los requerimientos del sistema de frenado como muestra la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación por conjunto de atributos (Elaboración propia).

Conjunto de atributos	Ítem	Requerimientos
Seguridad	1	Desactivación inmediata
	2	No afecte otros sistemas
	3	No se caliente
	4	Par de frenado homogéneo
	5	Activación inmediata
	7	Mayor confiabilidad
	8	Mayor durabilidad
Materiales	6	Resistencia a la corrosión
	9	Disco ligero
Diseño	10	Adaptabilidad a cualquier auto
	11	Aspecto agradable
Otros	12	Fácil instalación
	13	Fácil mantenimiento

3.1.1.2. Ponderar los requerimientos del usuario

Para ponderar los requerimientos del usuario se dispone de una cantidad de puntos dada por la ecuación 45, los cuales se distribuyen entre los distintos requerimientos, dando mayor puntuación a aquellos que se consideren de mayor importancia en el sistema. Posterior a la asignación de pesos, mediante la ecuación 46, se calcula el peso relativo de cada uno de los requerimientos:

$$Puntos\ a\ asignar = (Cantidad\ de\ requerimientos) \times 3 \quad (45)$$

$$Peso\ relativo = \frac{Peso_i}{\sum_i^n Peso_i} * 100 \quad (46)$$

La Tabla 3.3 muestra la asignación de pesos y pesos relativos.

Tabla 3.3. Asignación de pesos y pesos relativos a los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).

Requerimientos	Peso	Peso relativo
Desactivación inmediata	4	10.25
No afecte otros sistemas	3	7.69
No se caliente	3	7.69
Par de frenado homogéneo	4	10.25
Activación inmediata	4	10.25
Mayor confiabilidad	4	10.25
Mayor durabilidad	3	7.69
Resistencia a la corrosión	3	7.69
Disco ligero	3	7.69
Adaptabilidad a cualquier auto	1	2.56
Aspecto agradable	1	2.56
Fácil instalación	3	7.69
Fácil mantenimiento	3	7.69

3.1.1.3. Matriz de comparación con la competencia

Se hace un análisis de comparación del producto que se está desarrollando con aquellos productos similares que existen actualmente en el mercado. Esta comparación se hace con cada uno de los requerimientos identificados.

Para esta comparación se han seleccionado los sistemas de frenos de disco y de tambor. La puntuación se realiza en una escala de 0 a 5, donde 0 implica que no satisface el requerimiento y 5 que satisface totalmente al requerimiento. La comparación entre los productos similares al que se desarrolla en este proyecto se muestra en la Tabla 3.4 (los campos marcados con asterisco “*” no tienen valor de satisfacción y se ven reflejados en la casa de la calidad).

Tabla 3.4. Comparación con productos similares (Elaboración propia).

Requerimientos	Freno electromagnético	Freno de disco	Freno de tambor
Desactivación inmediata	*	5	4
No afecte otros sistemas	*	5	4
No se caliente	*	4	3
Par de frenado homogéneo	*	3	3
Activación inmediata	*	5	5
Resistencia a la corrosión	*	4	4
Mayor confiabilidad	*	3	3
Mayor durabilidad	*	3	3
Disco ligero	*	4	3
Adaptabilidad a cualquier auto	*	4	3
Aspecto agradable	*	5	4
Fácil instalación	*	5	4
Fácil mantenimiento	*	4	3

3.1.1.4. Requerimientos de ingeniería

Los requerimientos identificados en la Etapa I se tienen que traducir de manera tal que puedan ser cuantificables, es decir, hay que definir todos los requerimientos del sistema en términos mensurables de ingeniería, de manera que se asocien directamente con una unidad de medición. Aquellos requerimientos que no puedan asociarse directamente con una unidad de medición se asocian con un significado explícito, donde se refiera a la actividad que implica. Esta traducción se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Traducción a requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).

Requerimientos	Requerimientos de ingeniería
Desactivación inmediata	Tiempo de respuesta
No afecte otros sistemas	Amplitud del campo magnético
No se caliente	Corrientes parásitas
Par de frenado homogéneo	Fuerza de frenado
Activación inmediata	Tiempo de respuesta
Mayor confiabilidad	Tiempo medio entre fallas (MTBF)
	Cantidad de piezas
Mayor durabilidad	Tiempo de vida
Resistencia a la corrosión	Tipo de recubrimiento/material
Disco ligero	Peso del disco
	Tipo de material
	Tamaño del disco
Adaptabilidad a cualquier auto	Piezas estándar
Aspecto agradable	Diseño del sistema
Fácil instalación	Facilidad de instalación
Fácil mantenimiento	Facilidad de mantenimiento (MTTR)

3.1.1.5. Matriz de sensibilidad

Es necesario identificar si existe correlación entre los distintos requerimientos de ingeniería, además de identificar el tipo de relación. Aquellos requerimientos que tengan algún tipo de relación con otros se identifican con:

- ++ Correlación fuertemente positiva.
- + Correlación positiva.
- - Correlación negativa.
- -- Correlación fuertemente negativa.

Es importante tener en cuenta que la dependencia negativa afecta el desempeño óptimo del sistema en general, por lo tanto, se debe buscar una solución para desacoplar o mejorar el tipo de relación en aquellas variables con dependencia negativa.

La Figura 3.1 muestra la matriz de sensibilidad obtenida para el sistema de frenos electromagnéticos.

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Tiempo de respuesta (Activación/Desactivación)															
Amplitud del campo magnético															
Corrientes parásitas															
Fuerza de frenado															
Tiempo medio entre fallas															
Cantidad de piezas															
Tiempo de vida															
Tipo de recubrimiento															
Peso del disco															
Tamaño del disco															
Tipo de material															
Piezas estándar															
Diseño del sistema															
Facilidad de instalación															
Facilidad de mantenimiento															

Figura 3.1. Matriz de sensibilidad (Elaboración propia).

3.1.1.6. Matriz de correlación

El cruce de información entre los requerimientos del sistema con los requerimientos de ingeniería permite establecer el grado de influencia en la satisfacción de cada requerimiento, esto mediante la asignación de valores representados por los símbolos mostrados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Simbología de la matriz de correlación (Elaboración propia).

Símbolo	Relación	Puntuación
⊕	Fuerte	9
○	Moderada	3
▲	Débil	1

La matriz de correlaciones entre los requerimientos del sistema y los requerimientos de ingeniería se muestran en la Figura 3.2.

Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")														
	Tiempo de respuesta (Activación/Desactivación)	Amplitud del campo magnético	Corrientes parásitas	Fuerza de frenado	Tiempo medio entre fallas	Cantidad de piezas	Tiempo de vida	Tipo de recubrimiento	Peso del disco	Tamaño del disco	Tipo de material	Piezas estándar	Diseño del sistema	Facilidad de instalación	Facilidad de mantenimiento
Desactivación inmediata	⊕	○											○		
No afecte otros sistemas		⊕											○		
No se caliente			⊕			▲					○		○		
Par de frenado homogéneo				⊕									○		
Activación inmediata	⊕	○	⊕										○		
Resistencia a la corrosión								⊕			○		○		
Mayor confiabilidad					⊕	⊕							▲		
Mayor durabilidad							⊕						▲		
Disco ligero								⊕	○	○				○	
Adaptabilidad a cualquier auto											⊕		○	⊕	
Aspecto atractivo													⊕		
Fácil instalación						○		⊕	⊕				○	⊕	▲
Fácil mantenimiento						○		⊕	⊕				○		⊕

Figura 3.2. Matriz de correlación (requerimientos del freno electromagnético vs requerimientos de ingeniería) (Elaboración propia).

3.1.1.7. Cuantificación de los objetivos

En esta etapa se establecen cuantitativamente valores objetivos a los distintos requerimientos de ingeniería, esto con el propósito de obtener algún beneficio respecto a los productos con los cuales se comparó en la Etapa III. Los valores deseados para el sistema de frenos electromagnéticos se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Cuantificación de objetivos de los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).

Requerimientos de ingeniería	Objetivo
Tiempo de respuesta	Segundos
Amplitud del campo magnético	Metros
Corrientes parásitas	Amperes
Fuerza de frenado	Newtons
Tiempo medio entre fallas	Horas (MTBF)
Cantidad de piezas	50 pzas
Tiempo de vida	Años
Tipo de recubrimiento	Tratamiento superficial
Peso del disco	Kilogramos
Tamaño del disco	Metros cuadrados
Tipo de material	Aleación
Piezas estándar	Norma internacional (ISO/DIN)
Diseño del sistema	*
Facilidad de instalación	Horas
Facilidad de mantenimiento	Horas (MTTR)

3.1.1.8. Tiempo de respuesta

Los tiempos de respuesta tanto a la activación como a la desactivación se deben encontrar en la escala de micro segundos (μs), esto debido a la importancia que tienen, ya que en caso de tardar ya sea en su activación como en su desactivación podría traer consecuencias de gran escala. Para aclarar esto, se supone que un vehículo viaja a una velocidad de 120 km/h (33.33 m/s), sabiendo que el tiempo de reacción (tiempo que tarde el conductor en poner el pie sobre el freno desde el momento que ve el peligro) es de aproximadamente tres cuartos de segundo (Tiempo, 2007), en el mejor de los casos el vehículo habrá recorrido al menos 25 metros antes de activar el freno y en caso de que la activación de los frenos tardara al menos un segundo más se recorre una distancia de al menos 55 metros antes de que el vehículo comience a desacelerarse, distancia que puede ser crítica para evitar algún tipo de accidente.

3.1.1.9. Corrientes parásitas

Existen casos en que las corrientes parásitas pueden crear efectos indeseados, y la aparición de dichas corrientes en un sistema de frenos electromagnéticos es uno de ellos, ya que, al aparecer, éstas se disipan en forma de calor, lo cual puede afectar no sólo al freno como tal, sino a todos los sistemas

que se encuentren cerca. Por tal motivo, es necesario diseñar un sistema de frenos electromagnéticos en el que el calentamiento por efecto Joule debido a las corrientes parásitas no genere impacto sobre el sistema de frenos ni en ningún otro sistema cercano.

3.1.1.10. Fuerza de frenado

La fuerza de frenado que experimenta un metal por el que circula una corriente i que se encuentra dentro de un campo magnético \mathbf{B} , se encuentra definida por la ecuación 47, la cual en su forma escalar puede ser escrita como:

$$F = ilB\text{sen}\theta \quad (47)$$

Se debe prestar especial atención a la fuerza de frenado que se le aplique al disco durante este proceso, ya que en caso de que ésta no sea la correcta puede darse el bloqueo de las ruedas o bien un frenado insuficiente.

3.1.1.11. Fiabilidad del sistema

La fiabilidad se define como la probabilidad de que un sistema, o componente de sistema, funcione adecuadamente durante un período de tiempo determinado bajo condiciones operativas específicas, como son presión, temperatura, velocidad, tensión y nivel de vibraciones, entre otras.

En la vida cotidiana, una gran cantidad de los equipos presentan una tasa de fallos variables, esto debido a que es más probable que sus distintos componentes fallen a medida que transcurre el tiempo, entonces, para un componente en específico la función de fiabilidad $R(t)$, también conocida como función de supervivencia, sigue una distribución Weibull y se define como (Muñoz Abella, 2003):

$$\lambda(t) = \alpha\beta t^{\beta-1} \quad (48)$$

Siendo α y $\beta > 0$. En este caso, $\lambda(t)$ es una función polinomial en la variable t (tiempo), que depende de los dos parámetros α y β . Cuando $\beta > 1$, $\lambda(t)$ es creciente, y, por el contrario, cuando $0 < \beta < 1$, $\lambda(t)$ es decreciente (Figura 3.3).

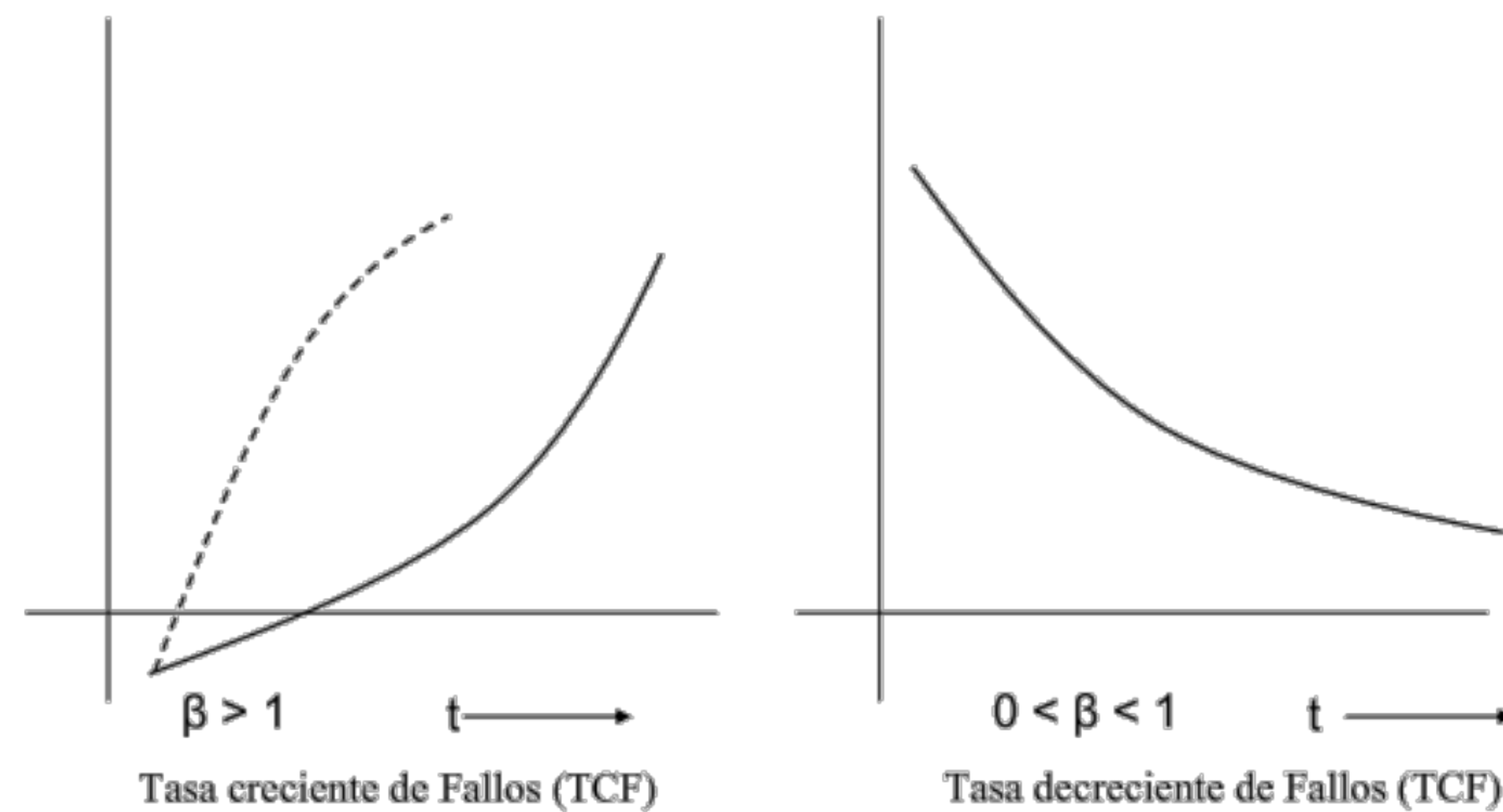


Figura 3.3. Funciones de tasas de fallos para la distribución de Weibull (Muñoz Abella, 2003).

3.1.1.12. Cantidad de piezas

El problema básico de la fiabilidad de sistemas consiste en el cálculo de la fiabilidad $R(t)$, a partir de las fiabilidades $R_1(t)$, $R_2(t)$,..., $R_n(t)$ de sus componentes. A continuación, se desarrollan las configuraciones usuales con la que se suelen encontrar distribuidos los componentes en un sistema (Muñoz Abella, 2003).

Se denomina sistema en serie a aquél por el cual el fallo del sistema equivale al de un sólo componente, es decir, el sistema funciona siempre y cuando todos los componentes funcionen correctamente, ya que en caso de que alguno de ellos falle, el sistema completo colapsaría. Para un sistema compuesto por n componentes, la fiabilidad está dada por:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (49)$$

Para el caso del sistema de frenos electromagnéticos desarrollado en este proyecto, su sistema en serie se encuentra definido por la Figura 3.4.



Figura 3.4. Sistema en serie del freno electromagnético (simplificado) (Elaboración propia).

En una configuración en serie, la fiabilidad se puede aumentar mediante: Reducción del número de componentes, Elección de componentes con una tasa de fiabilidad elevada y Aplicación a los componentes de unos esfuerzos adecuados.

Por otro lado, un sistema en paralelo se caracteriza porque el sistema falla si todos los componentes fallan en su operación. Siendo la probabilidad de que se presente este evento el producto de probabilidades de los eventos componentes, es decir:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (50)$$

El sistema en paralelo del conjunto de frenos para cualquier vehículo se define como muestra la Figura 3.5.

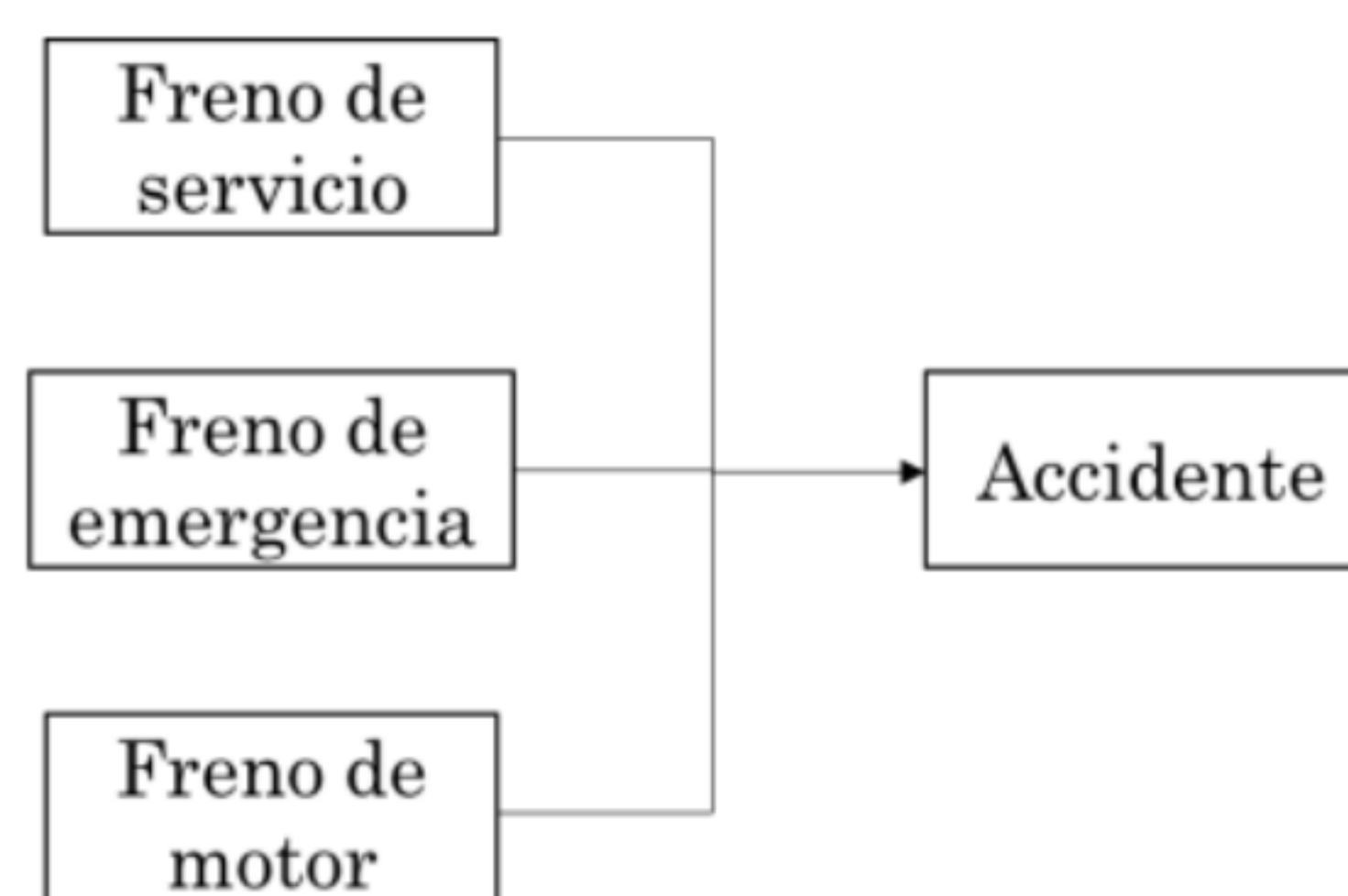


Figura 3.5. Sistema en paralelo de los frenos de un automóvil (Elaboración propia).

3.1.1.13. *Tiempo de vida*

La duración de la vida de un equipo se puede dividir en tres periodos diferentes, lo cuales se distinguen en la Figura 3.6, denominada “Curva de la bañera”, en la que se representa la tasa de fallos del sistema respecto al tiempo.

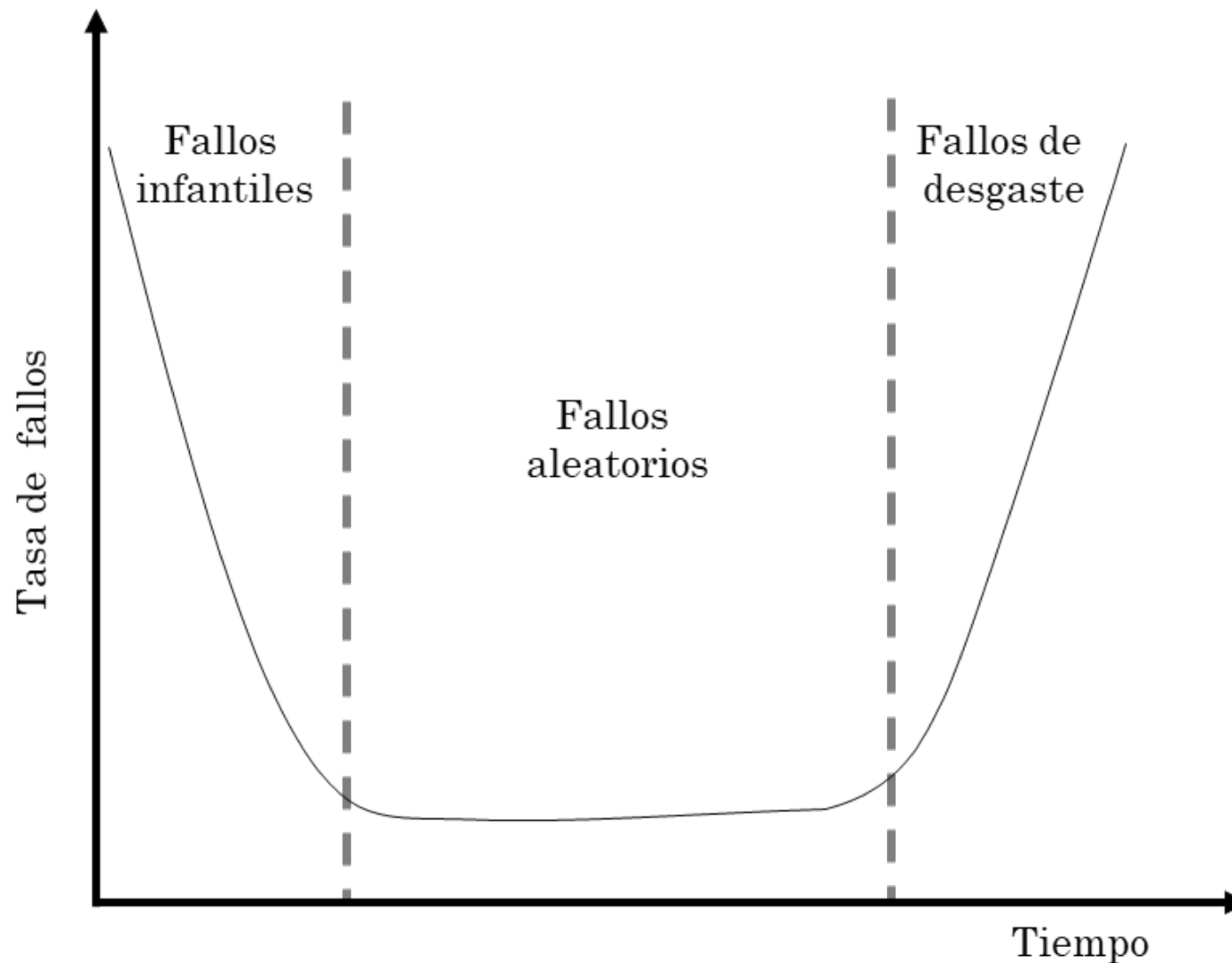


Figura 3.6. Curva de la bañera (Adaptado de Muñoz Abella, 2003).

En una curva de la bañera de tipo convencional se aprecian tres zonas (Muñoz Abella, 2003):

- Fallos infantiles: Las averías van disminuyendo con el tiempo, hasta tomar un valor constante y llegar a la vida 'útil'. En esta zona fallan los componentes con defectos de fabricación, por lo que la tasa de averías disminuye con el tiempo. Para evitar esta zona, los fabricantes someten a sus componentes a un 'quemado' inicial, desechando los componentes defectuosos.
- Zona de vida útil: Se caracteriza por tener una tasa de fallos aproximadamente constante. Es la zona de mayor duración, en la que se suelen estudiar los sistemas, ya que se supone que se reemplazan antes de que alcancen la zona de envejecimiento.
- Zona de envejecimiento: La tasa de averías vuelve a crecer, debido a que los componentes fallan por degradación de sus características debido al transcurso del tiempo. Aún con reparaciones y

mantenimiento, las tasas de fallo aumentan, hasta que resulta demasiado costoso el proceso de mantenimiento.

El tiempo de vida de un sistema de frenos es una parte fundamental del automóvil. Los frenos convencionales, de fricción, tienen un tiempo de vida promedio de 2 años o de 75,000 km., lo cual depende mucho del tipo de uso que se le da al freno, esto para las pastillas; mientras que los discos varían según el tipo de uso y mantenimiento que se les dé, aunque éstos presentan un tiempo de vida mayor que el de las pastillas.

3.1.1.14. Amplitud del campo magnético

El control del área de afectación del campo electromagnético se vuelve una parte crucial del sistema, ya que es caso de que la amplitud sea muy grande puede afectar principalmente a los diversos sistemas electrónicos que se encuentren cercanos a este campo, ya sea generando ruido en sus mediciones o bien dañándolos completamente; al mismo tiempo que puede atraer elementos metálicos del medio ambiente, lo cual genera otra serie de afectaciones no sólo al sistema de frenado, sino al automóvil en general, por ello se espera que este campo no tenga una profundidad de penetración mayor a 0.3 metros.

3.1.1.15. Tipo de recubrimiento

La corrosión se define como un ataque sobre un material debido a una reacción química o fisicoquímica con el medio circundante. De acuerdo con esta definición, el término corrosión se puede aplicar tanto a materiales metálicos como no metálicos. Pero en la práctica, la palabra corrosión se usa principalmente en conjunción con materiales metálicos, los cuales normalmente están expuestos a la corrosión en ambientes bajo condiciones atmosféricas o bien ambientes acuosos.

Como la corrosión es la reacción de un metal con su medio ambiente, el control se puede efectuar, ya sea en el metal, la interfase o en el propio medio ambiente, la selección de metales o aleaciones preferentemente a otros, o, aún la

selección de materiales no-metálicos debe entenderse como un control de la corrosión. Sin embargo, por las características inherentes del producto en desarrollo, en este trabajo se consideran aquellos controles que pueden ser efectuadas directamente en el metal. Dentro de los cuales se pueden encontrar los siguientes (Cuesta Fernandez, 2009, Vallejo Figueroa, 2006):

- Protección por recubrimientos metálicos: Consiste en recubrir la superficie que se desea proteger con una capa de metal autoprotector lo más compacta y adherente posible. Los recubrimientos metálicos pueden aplicarse por varios procedimientos: por electrólisis, por inmersión en el baño del metal protector, por metalización, por cementación y por chapado.
- Protección por recubrimientos no metálicos: Los procedimientos más empleados son las pinturas y barnices, los plásticos, la fosfatación, el esmaltado y la oxidación superficial, entre otros. Al secar, la pintura forma una película, que cubre la superficie, pero es independiente de ésta. Los barnices forman películas más duras que las pinturas, pero son menos resistentes a la acción de la luz. La ventaja de estos procesos es que no reaccionan con la superficie en contacto.
- Protección por el empleo de inhibidores: Los inhibidores son sustancias orgánicas o inorgánicas que, añadidas en proporciones muy pequeñas a un medio corrosivo, permiten reducir o detener la velocidad de corrosión del metal con el que están en contacto. Existen dos clases de inhibidores, los anódicos y los catódicos.
- Protección por el empleo de pasivadores: Son sustancias que producen una película no porosa e insoluble sobre las piezas metálicas, impidiendo la corrosión. Algunos metales como el aluminio forman, en contacto con el aire, una película muy adherente y fina, de óxido que actúa como pasivador, impidiendo la posterior corrosión.
- Protección catódica: Consiste en incluir la pieza que se desea proteger en un circuito eléctrico con fuerza electromotriz exterior aplicada, o sin

ella, de manera que el metal haga de cátodo. Este método se fundamenta en el hecho que, si se sumergen en una solución salina dos metales de distinto potencial galvánico, se produce una corriente eléctrica a través del electrolito, que va del metal anódico al catódico, neutralizando las acciones electroquímicas locales entre distintas zonas que habría en cualquiera de los metales de haberse aislado.

- **Protección por el empleo de metales autoprotectores:** Uno de los procedimientos más sencillos para proteger las piezas contra la corrosión y la oxidación, es fabricarlas con metales autoprotectores, es decir, metales que tengan la suficiente resistencia contra la oxidación y corrosión que haga innecesaria la aplicación de ninguna protección adicional. Ejemplos de estos materiales son cromo, níquel, platino, oro, tántalo y wolframio, entre otros, que son muy resistentes a la oxidación y corrosión atmosférica y a la acción de muchos ácidos. Sin embargo, su elevado costo impide su utilización salvo para aplicaciones científicas.
- **Diseño anticorrosión:** Se trata del problema de asegurar que, cualquiera que sea la velocidad a la que se produzca el ataque corrosivo, éste tenga lugar de una forma tan uniforme como sea posible y no cause fallas prematuras como resultado de una intensa corrosión localizada. Existen varios principios referentes al diseño, fundados en la naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión que merecen especial atención en el control de la corrosión. Uno de los principios de diseño más importantes consiste en evitar el contacto entre metales diferentes en presencia de una solución corrosiva, asimismo, deben evitarse las hendiduras, los tornillos y remaches y deben ser sustituidos preferentemente por soldaduras de tope o impedir el acceso a ellas del agente corrosivo, perfeccionando los ajustes, rellenando las grietas de un material impenetrable o pintado las piezas que han de estar en contacto antes del montaje. Es conveniente que el diseño

permita la limpieza adecuada de las piezas críticas del equipo para evitar la corrosión localizada.

Sobre la elección del procedimiento adecuado para la protección de un metal, no existen normas generales, por lo que cada problema debe ser estudiado como un caso particular, puesto que simplemente pequeñas impurezas en el medio o en el metal pueden cambiar por completo el planteamiento del problema. En este caso en específico, se elige la protección por recubrimientos no metálicos, ya que el empleo de cualquier otro medio de protección puede afectar el comportamiento deseado del freno electromagnético.

3.1.1.16. Peso y tamaño del disco

En un freno de fricción convencional, una de las partes que mayor peso agrega al sistema es el disco de freno, que dependiendo del vehículo en el que se utilice puede ir desde los 3.5 hasta los 10 kg. (BREMBO, 2017).

Al igual que el peso de disco, se pretende mejorar el tamaño del disco con respecto al de un disco de fricción convencional, el cual tampoco tiene dimensiones establecidas, y éstas nuevamente vuelven a depender del tipo de vehículo en que desea montar, sin embargo, para el presente proyecto se han establecido las siguientes dimensiones: Diámetro = 250 mm. y Espesor = 20 mm.

3.1.1.17. Piezas estándar

Se plantea como objetivo que el sistema de frenos electromagnético no requiera de ningún tipo de pieza de fabricación especial en ninguno de sus componentes, y que todos éstos cumplan con estándares comerciales, principalmente en sus elementos de unión y sujeción, es decir, que dichos elementos se encuentren regularizados por normas internacionales como las siguientes:

- a) *Hexagon head bolts (ISO 4014, ISO 4015, ISO 4016 AND ISO 8765).*
- b) *Hexagon head screws (ISO 4017, ISO 4018 AND ISO 8676).*

- c) *Hexagon nuts with flange (ISO 4161, ISO 7043, ISO 7044, ISO 10663).*
- d) *Hexagon bolts with flange (ISO 4162, ISO 15071, ISO 15072).*

3.1.1.18. Diseño del sistema

Los aspectos a tener en cuenta en la etapa de diseño son (Bonet Borjas & Pedro, 2012):

- Elección de componentes y elementos a utilizar: Elegir los materiales y componentes considerando las condiciones futuras de trabajo. Los materiales y componentes que formen parte del sistema deben satisfacer requisitos funcionales, de resistencia mecánica, térmica y precisión, entre otros. Se debe dar preferencia al uso de materiales y componentes que han mostrado buen desempeño en artículos semejantes.
- Definición del régimen de trabajo: Se debe reducir la intensidad de desgaste, se evitan excesos en el régimen térmico, en la dinámica general del equipo y, en general, se atenúa el ritmo de envejecimiento. La utilización de regímenes de trabajo imprevistos es una de las causas más frecuentes de fallos.
- Accesibilidad a todas las partes del producto: Muchas actividades de mantenimiento que pudieran elevar la fiabilidad del producto se ven imposibilitadas por no haberse previsto desde el diseño. En otros casos, se limita el trabajo preventivo a ajustes y regulaciones por no contarse con los mecanismos pertinentes que se debieron prever durante el diseño. La concepción de módulos y bloques favorece su rápido intercambio ante un fallo, aunque en ocasiones disminuye la posibilidad de su mantenimiento interno.
- Uso de dispositivos de protección: Éstos permiten que, ante un fallo, no se produzcan averías posteriores, es decir, se quita el carácter dependiente a muchos fallos (configuración del sistema en paralelo). Lo anterior evita grandes pérdidas y garantiza la seguridad operacional.

- Aspecto físico: Aunque la apariencia final del producto no aporta nada en cuestiones de funcionalidad, es un aspecto importante en la aceptación del producto.

3.1.1.19. Tiempo de montaje

El tiempo de montaje objetivo se ha establecido en 30 minutos por la cantidad de piezas que forman parte del sistema de frenos, las cuales se prevé sean menos que las que componen un sistema de freno por fricción, además que, al estar conformado por piezas estándar, no será necesario el uso de algún tipo de herramienta especial para su montaje.

3.1.1.20. Tiempo de mantenimiento

En cuestión de mantenimiento existen dos indicadores principales de especial interés para el desarrollo de los frenos electromagnéticos, estos dos indicadores son: tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio de reparación (MTTR).

El tiempo medio hasta la avería (MTTF, *Mean Time To Failure*) es otro de los parámetros utilizados, junto con la tasa de fallos $\lambda(t)$, para especificar la calidad de un componente o de un sistema (Muñoz Abella, 2003). Por ejemplo, si se ensayan N elementos idénticos desde el instante $t=0$, y se miden los tiempos de funcionamiento de cada uno hasta que se produzca alguna avería. Entonces el MTTF será la media de los tiempos t_i medidos, es decir:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad (51)$$

$$MTBF = \frac{TTO}{FT} \quad (52)$$

donde:

MTBF: tiempo medio entre fallas,

TTO: tiempo total de operación (tiempo de vida del producto),

FT: Total de fallas ocurridas durante la vida del producto.

En la práctica, la fiabilidad se mide como el tiempo medio entre ciclos de mantenimiento o el tiempo medio entre dos fallos consecutivos (MTBF, *Mean Time Between Failures*). Para un producto de N componentes operando durante un periodo de tiempo T , en el cual han fallado varios componentes (algunos en varias ocasiones), el i -ésimo componente habrá tenido n_i averías; luego el número medio de averías para el producto será (Muñoz Abella, 2003):

$$\bar{n} = \sum_{i=0}^N \frac{n_i}{N} \quad (53)$$

Siendo el MTBF:

$$MTBF = \frac{T}{\bar{n}} \quad (54)$$

3.1.1.21. Puntuación

La puntuación final es un medio que permite identificar el orden de prioridad de las distintas características de ingeniería tomando como base la puntuación relativa de los distintos requerimientos de ingeniería.

Para el cálculo de la puntuación relativa es necesario conocer primero cuál es la puntuación máxima de la correlación entre los requerimientos del sistema con los de ingeniería y después se calcula la puntuación absoluta de cada requerimiento de ingeniería, para ello se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso del Cómo} = \sum (\text{peso relativo del QUE}) * (\text{correlacion columna}) \quad (55)$$

$$\text{Peso relativo del Cómo} = \frac{\text{Peso del Cómo}}{\sum \text{Pesos de los Cómo}} \quad (56)$$

A partir de las ecuaciones 55 y 56, y de la información obtenida de etapas anteriores, se obtienen las puntuaciones absoluta y relativa de la ‘casa de la calidad’ para un sistema de frenos electromagnéticos (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Asignación de puntuaciones absolutas y relativas a los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).

Requerimientos de ingeniería	Puntuación absoluta	Puntuación relativa
Tiempo de respuesta (Activación/Desactivación)	184.62	9.94
Amplitud del campo magnético	130.77	7.04
Corrientes parásitas	161.54	8.70
Fuerza de frenado	92.31	4.97
Tiempo medio entre fallas	92.31	4.97
Cantidad de piezas	146.15	7.87
Tiempo de vida	69.23	3.73
Tipo de recubrimiento	69.23	3.73
Peso del disco	207.69	11.19
Tamaño del disco	161.54	8.70
Tipo de material	69.23	3.73
Piezas estándar	23.08	1.24
Diseño del sistema	256.41	13.81
Facilidad de instalación	115.38	6.22
Facilidad de mantenimiento	76.92	4.14

A partir de los resultados registrados en estas ocho etapas se construye lo que se denomina ‘casa de la calidad’, la cual se muestra en la Figura 3.7.

3.1.2. Etapa II QFD

El objetivo de esta etapa es determinar las partes críticas y sus características. La realización de esta etapa requiere una serie de pasos similares a los realizados en la primera etapa de la metodología, estos pasos se describen a continuación.

Tal como es posible apreciar en la columna de Peso Relativo (*Relative Weight*), los requerimientos del usuario que mayor peso tienen son: a) desactivación inmediata, b) par de frenado homogéneo, c) activación inmediata y, d) mayor confiabilidad. Todos ellos con un peso relativo de 10.3, es por ello que éstas serán las características del producto que requerirán mayor importancia en el desarrollo.

Se han definido estas características como las de mayor relevancia, debido a que están ligadas directamente con la funcionalidad del sistema, y al tratarse sobre un sistema de seguridad activa dentro de los vehículos, la funcionalidad cobra mayor importancia al respecto.

- a) Desactivación inmediata: Si el efecto de frenado sigue presente aún cuando el conductor ya no está activándolo, afectaría al funcionamiento y dirección del vehículo, lo cual provocará efectos indeseados durante su conducción, además de mermar el rendimiento del mismo.
- b) Par de frenado homogéneo: La fuerza frenante deberá ser en todo momento la misma en cada uno de los neumáticos, ya que, en caso contrario, podrían generar el bloqueo y derrape de alguna de las llantas, provocando de esta manera en efecto de giro en el vehículo.
- c) Activación inmediata: Se requiere que el efecto de frenado se haga presente el momento en que el conductor active el pedal de freno, ya que, en caso de que el tiempo de respuesta del freno no sea inmediato, reduce la distancia y el tiempo de frenado disponible para evitar cualquier tipo de accidente.
- d) Mayor confiabilidad: Esto debido a que lo que se desea con este proyecto es reducir la cantidad de variables que pudiesen fallar en un sistema de frenado, para que, de esta manera, el porcentaje de accidentes debidos a fallas en el sistema de frenado se vea reducido.

Todas estas características son de gran importancia, debido a que si no se satisfacen de manera correcta existe el riesgo de provocar un accidente.

3.1.2.1. Identificar los medios de satisfacción de los requerimientos de ingeniería

Para llevar a cabo esta etapa, es necesario considerar que los requerimientos de ingeniería ahora toman la posición que ocupaban los requerimientos del freno electromagnético, y los medios de satisfacción de cada uno de estos requerimientos pasa a tomar un lugar en donde anteriormente se encontraban los requerimientos de ingeniería.

En la Tabla 3.9, se identifican los medios de satisfacción de cada uno de los requerimientos de ingeniería que se identificaron en la Etapa I.

Tabla 3.9. Medios de satisfacción de los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).

Requerimientos	Requerimientos de ingeniería	Medios de Satisfacción
Desactivación inmediata	Tiempo de respuesta	Circuito electromagnético
No afecte otros sistemas	Amplitud del campo magnético	Diseño del electroimán
No se caliente	Corrientes parásitas	Campo magnético constante
Par de frenado homogéneo	Fuerza de frenado	Suministro y regulación de corriente
Activación inmediata	Tiempo de respuesta	Circuito electromagnético
Mayor confiabilidad	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Reducción cantidad de piezas
	Cantidad de piezas	Componentes con alta tasa de vida
Mayor durabilidad	Tiempo de vida	Componentes con alta tasa de vida
Resistencia a la corrosión	Tipo de recubrimiento	Tratamiento superficial
Disco ligero	Peso del disco	Selección del material
	Tipo de material	Selección del material
	Tamaño del disco	Diseño del sistema
Adaptabilidad a cualquier auto	Piezas estándar	Uso de piezas estándar
Aspecto agradable	Diseño del sistema	*
Fácil instalación	Facilidad de instalación	Reducir cantidad de piezas
		Reducir variedad de piezas
Fácil mantenimiento	Facilidad de mantenimiento (MTTR)	Diseño del sistema
		Reducir cantidad de piezas

3.1.2.2. Realizar la matriz de sensibilidad con los medios de satisfacción

Al igual que en la Etapa I, es necesario identificar si existe correlación entre los distintos medios de satisfacción identificados en el paso anterior, y en caso de haber algún tipo de correlación, es necesario identificar su tipo, de la misma manera que se realizó en el paso 5 de la Etapa I. La Figura 3.8, muestra las distintas correlaciones identificadas entre cada uno de los medios de satisfacción.

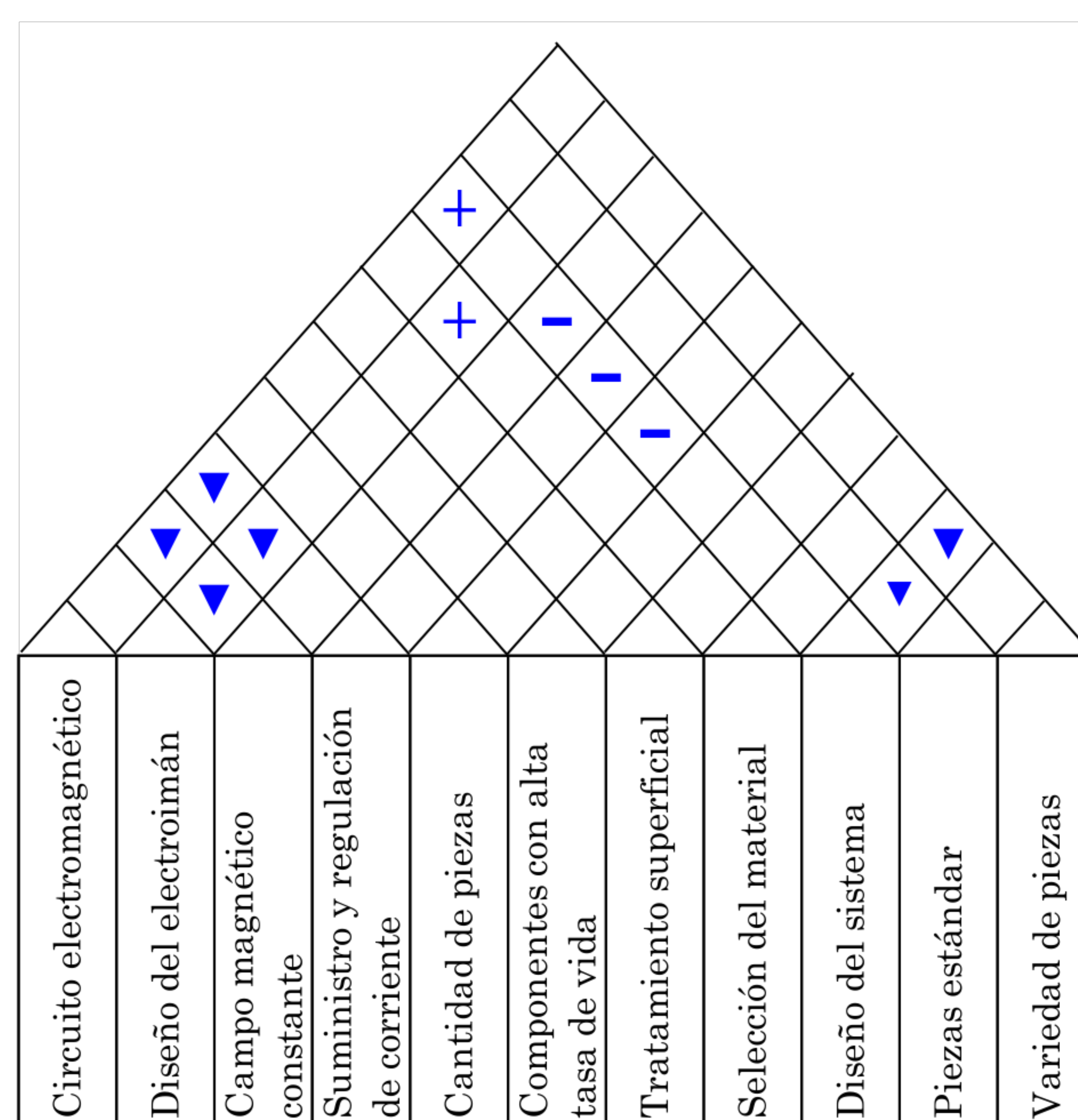


Figura 3.8. Matriz de sensibilidad de los requerimientos de ingeniería (Elaboración propia).

3.1.2.3. Matriz de correlación: requerimientos de ingeniería y sus medios de satisfacción

El contraste entre los requerimientos de ingeniería y sus medios de satisfacción permite establecer el grado de influencia de las características en la satisfacción de cada requerimiento, esto mediante la asignación de valores de relación. La Figura 3.9, muestra la matriz de correlación que se da entre los requerimientos de ingeniería y sus medios de satisfacción.

Demanded Quality (a.k.a. "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")										
	Circuito electromagnético	Diseño del electroimán	Campo magnético constante	Suministro y regulación de corriente	Cantidad de piezas	Componentes con alta tasa de vida	Tratamiento superficial	Selección del material	Diseño del sistema	Piezas estándar	Variedad de piezas
Tiempo de respuesta	⊕	⊕	▲	⊕					⊕		
Amplitud del campo magnético		⊕						⊕			
Corrientes parásitas		⊖	⊕	⊕							
Fuerza de frenado		⊖		⊕					⊖		
Tiempo medio entre fallas					⊖	⊖			⊖		▲
Cantidad de piezas						⊕					⊖
Tiempo de vida						⊕					
Tipo de recubrimiento							⊕				
Peso del disco			▲		⊖			⊕	▲		
Tamaño del disco								⊕	⊖		
Tipo de material								⊕			
Piezas estándar										⊕	
Diseño del sistema									⊕		
Facilidad de instalación					⊕				⊕		⊕
Facilidad de mantenimiento					⊕				⊕		⊕

Figura 3.9. Matriz de correlación (requerimientos de ingeniería vs medios de satisfacción) (Elaboración propia).

3.1.2.4. Cuantificar los objetivos de los medios de satisfacción

La cuantificación de los valores objetivos de los medios de satisfacción se hace de manera distinta a la anterior, pues ahora no se busca un valor numérico, sino más bien un producto, componente o parte en específico. La Tabla 3.10 lista los medios de satisfacción de los requerimientos de ingeniería en un sistema de frenos electromagnéticos.

Tabla 3.10. Cuantificación de objetivos de los medios de satisfacción (Elaboración propia).

Medios de satisfacción	Objetivo
Circuito electromagnético	*
Campo magnético constante	Teslas
Suministro y regulación de corriente i	Amperes
Reducción de la cantidad de piezas	Piezas
Selección de componentes con alta tasa de vida	Años
Diseño del electroimán	*
Tratamiento superficial	Recubrimiento no metálico (Vinílico)
Selección del material	Ferromagnético/Cobre
Uso de piezas estándar	DIN/ISO
Diseño del sistema	*
Reducir la variedad de piezas	*

3.1.2.5. Circuito electromagnético

Resulta imposible establecer un valor objetivo cuantitativo al circuito electromagnético, es por ello que la Tabla 3.10 no muestra ningún valor. En su

lugar, es necesario realizar el diseño del circuito electromagnético, es decir, habrá que obtener un circuito eléctrico que proporcione las características tanto de activación como desactivación del sistema, así como de la magnitud del campo magnético \mathbf{B} deseado. Para poder diseñar el mejor circuito es necesario realizar una serie de cálculos que permita conocer las características necesarias del circuito (requerimientos de la fuente de alimentación, activación/desactivación, rango de i y configuración del circuito, entre otras).

3.1.2.6. Campo magnético constante

La importancia de mantener un campo magnético constante radica en la eficiencia del frenado, ya que cualquier variación de su intensidad durante el proceso de frenado se verá reflejado en la distancia de parada.

Para obtener un valor objetivo de la intensidad de \mathbf{B} , que se ha de mantener constante, es necesario realizar los cálculos de la fuerza de frenado requerida para llevar un vehículo en movimiento a un estado de reposo.

3.1.2.7. Suministro y regulación de corriente i

La regulación de la corriente resulta especialmente importante para la fuerza de frenado, pues tal como se ha mencionado, la fuerza de frenado está en función de la corriente i que circula por la masa metálica, el campo \mathbf{B} en el que se encuentra inmersa dicha masa y la longitud l de la masa metálica que se encuentra inmersa en \mathbf{B} ; al ser l constante y depender i de \mathbf{B} , lo único que hay que variar para regular la fuerza de frenado es la corriente suministrada al electroimán, que es el que genera el campo magnético y a su vez i , mediante la inducción de corrientes parásitas. Dicha regulación se pretende lograr con el uso de un potenciómetro de tipo deslizable.

3.1.2.8. Reducción de la cantidad de piezas

En las etapas iniciales de la metodología QFD se propone aumentar la fiabilidad del sistema, esto a través de la reducción de la cantidad de piezas, por

lo cual, se pretende que la mayor cantidad de piezas que compongan al sistema estén relacionadas con la sujeción del mismo y no como partes funcionales. Sin embargo, para tener una cantidad exacta de la cantidad de piezas que compondrán al sistema es necesario terminar el diseño completo del sistema de frenos electromagnético.

3.1.2.9. Selección de componentes con alta tasa de vida

La fiabilidad de un sistema, además de depender de la cantidad de piezas que lo componen, depende también de la tasa de vida de cada uno de sus componentes, ya que, al tratarse de un sistema en serie, basta que alguno de los componentes del sistema falle para provocar el fallo total del sistema. Por este motivo, resulta indispensable una tasa de vida alta para los distintos componentes que formen parte de este sistema de frenos electromagnético.

3.1.2.10. Diseño del electroimán

Una de las partes más importantes del sistema es el electroimán, ya que está directamente relacionada con la fuerza de frenado, además que dependiendo del diseño que tenga puede afectar a otros sistemas cercanos a él, lo cual puede ser peligroso. Es por ello, que el diseño del electroimán debe considerar que su intensidad no afecte a sistemas ni atraiga objetos del medio cercano, pero que tenga la suficiente intensidad para generar el par de frenado necesario para reducir y detener la marcha del vehículo. Para lograr esto es necesario considerar que el núcleo del electroimán debe ser un material que tenga una permeabilidad magnética adecuada, es por ello que la elevada permeabilidad magnética de los materiales ferromagnéticos, los cuales utilizan profusamente en las máquinas eléctricas donde se requiere de un campo magnético intenso, hacen que este material se adecue más a las necesidades del electroimán (Apartado 2.5.2). Los materiales ferromagnéticos más empleados son el hierro y sus aleaciones. El valor objetivo de la inducción magnética B de este electroimán se calculó en el inciso 2.4.3.10.

3.1.2.11. Diseño del sistema

Considerando las características y ventajas que presentan los distintos tipos de recubrimientos no metálicos, se ha considerado que el recubrimiento vinílico es el que mejor se ajusta a los requerimientos del freno electromagnético a diseñar (Apartado 2.5.1).

Se plantean dos opciones de diseño distintas. En la primera opción, la generación de un campo magnético constante implica que éste no varíe ni con el tiempo ni con la posición en la que se encuentre el disco de freno, por tal motivo se requiere de un electroimán lo suficientemente grande para abarcar la superficie completa del disco del freno y que su intensidad no varíe en ningún momento, además, requiere que el electroimán esté suministrado de corriente eléctrica en todo momento para lo cual es necesario el uso de una batería que asegure el suministro de dicha corriente en todo momento. Por otra parte, la generación del par de frenado requiere de una corriente eléctrica que circule a través del disco de freno, dicha corriente es suministrada por una batería y se debe asegurar que ésta circule en dirección tal que genere el par de frenado y no provoque la aceleración del mismo. Respecto a la segunda opción, la generación de un campo magnético variable resulta más fácil, ya que se puede variar su magnitud ya sea con respecto a una posición dada, o bien, respecto al tiempo; por cuestiones prácticas para esta opción se considera un campo magnético variable con respecto a una posición dada. La variación del campo magnético variable provoca corrientes parásitas que generan el par de frenado requerido para reducir e incluso detener la marcha del vehículo. La corriente eléctrica requerida para generar el campo magnético es suministrada por una batería.

La Tabla 3.11 muestra una comparación entre las opciones planteadas y es posible apreciar que la opción 1, a pesar de considerar campos magnéticos constantes como se indicó en la primera etapa del QFD, también presenta una serie de aspectos que resultan contrarios a aquellos que se plantearon en la misma etapa y al ser más los aspectos contrarios a lo proyectado al principio, se

opta por desarrollar la segunda opción de diseño. En el Anexo A se presenta el diseño de las partes y sus respectivos planos.

Tabla 3.11. Ventajas y desventajas de diseño comparando las opciones 1 y 2 (Elaboración propia).

Opción 1	Opción 2
Alto consumo de energía eléctrica	Bajo consumo de energía eléctrica
No corrientes parásitas	Requiere corrientes parásitas
Dificultad de inducir una corriente en el disco	Facilidad de inducir corriente en el disco
Dificultad de instalación	Facilidad de instalación
Dimensiones grandes	Dimensiones pequeñas
Mayor peso del sistema	Menor peso del sistema
Posible generación de campo magnético no deseado	No se generan campos magnéticos no deseados
Mayor complejidad del sistema	Menor complejidad del sistema
Mayor cantidad de piezas	Menor cantidad de piezas

3.1.2.12. Puntuación final

La puntuación final es un medio que permite identificar el orden de prioridad de los distintos medios de satisfacción, tomando como base la puntuación relativa de cada uno de éstos. Para el cálculo de la puntuación relativa de los medios de satisfacción se usan las mismas fórmulas de la Etapa I, y la puntuación absoluta de los requerimientos de ingeniería de la suma de la relación que tienen los requerimientos del freno con los requerimientos de ingeniería, esta suma se muestra en el renglón *Weight/Importance* de la ‘Casa de la calidad’ construida en la Etapa I (Figura 3.7).

Una vez realizados estos cinco pasos se tiene construida la Etapa II de la metodología, la cual corresponde a la ‘Matriz de partes o diseño’ (Figura 3.10).

3.2. Diseño del sistema de freno electromagnético

En esta sección se analizan los distintos elementos que componen un sistema de frenos electromagnéticos (Figura 1.2) para conocer su importancia y las características que han de cumplir para diseñarlos y adaptarlos de la mejor manera.

Los frenos de inducción magnética tienen componentes muy similares a los frenos convencionales, por lo cual, su funcionamiento y activación son muy

parecidos, exceptuando, el fenómeno físico que da origen al frenado. El freno es activado por el conductor por medio del pedal de freno, lo cual provoca que un circuito eléctrico se cierre y permita el paso de la corriente a través de las bobinas. Además, el conductor tendrá la capacidad de regular la cantidad de corriente que es suministrada al sistema, controlando así la fuerza de frenado del vehículo. A partir de la descripción anterior y de la Figura 3.10 se pueden identificar los siguientes elementos que compondrán el sistema de frenos a desarrollar:

- **Pedal de freno:** Este elemento es el encargado de activar y regular el frenado del automóvil. Este mecanismo no tiene por qué sufrir algún tipo de alteración con respecto a cualquier otro pedal de freno, la única diferencia que existe, es que el pedal de un freno electromagnético en lugar de ir conectado a un circuito hidráulico, está conectado a un circuito eléctrico a través del cual circula la corriente necesaria para la activación del freno.
- **Circuito electromagnético:** Éste es el encargado de dirigir la corriente eléctrica tanto al inductor (electroimán) como al inducido (disco de freno).
- **Electroimán:** Es el equivalente a las pastillas o balatas de los frenos convencionales, ya que, gracias a éste y los efectos provocados por el campo electromagnético que genera, es posible la aparición de la fuerza de frenado.
- **Inducido (disco de freno):** El disco de freno debe ser capaz de ser inducido por las corrientes parásitas generadas por el campo magnético variable generado por el electroimán, ya que de no satisfacer este requerimiento no se genera la fuerza de frenado.

Título: QFD FRENOS ELECTROMAGNETICOS
Author: CARAVANTES JUAREZ MAURO ISRAEL

Legend	
⊙	Relación Fuerte 9
○	Relación Moderada 3
▲	Relación Débil 1
+++	Strong Positive Correlation
+	Positive Correlation
-	Negative Correlation
▼	Strong Negative Correlation
▼	Objective Is To Minimize
▲	Objective Is To Maximize
X	Objective Is To Hit Target

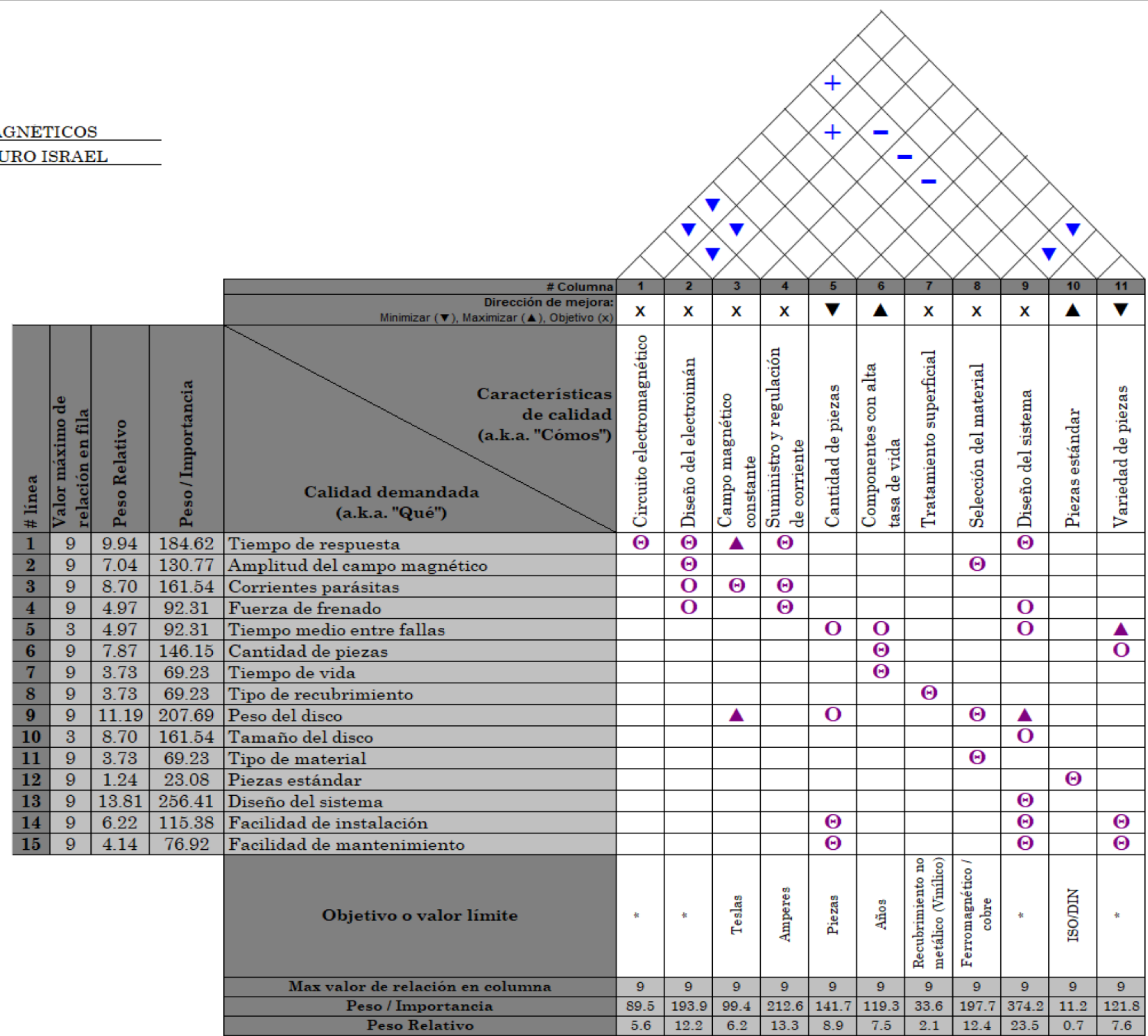


Figura 3.10. QFD, partes y componentes (Plantilla obtenida de <http://www.QFDOnline.com>).

Para el diseño del disco inducido, se han contemplado dos opciones distintas. Una de ellas consiste en un disco con alambre enrollado en su interior a través del cual circule una corriente eléctrica suministrada por una batería, mientras que la otra opción contempla un disco de freno que tenga por sí mismo la capacidad de conducir corriente eléctrica, ya sea debido a una batería o debido a la inducción de un campo magnético variable.

La primera de ellas se ha pensado a partir de la idea de mantener un campo magnético constante y así evitar la aparición de corrientes parásitas, sin embargo, al plantear esta opción se identifica una serie de circunstancias que afectan y dificultan el diseño no sólo del disco en sí, sino de todo el sistema de frenado tales como: a) el peso del disco, el cual sufre un incremento significativo; b) el alambre enrollado, el cual crea un solenoide y así un nuevo electroimán que puede generar efectos indeseados sobre el sistema; c) suministro de corriente, el disco de freno debe ser un elemento que se encuentre en todo momento en rotación, por tal motivo el alambre dentro de él también deberá estar en rotación, lo cual dificulta el suministro de corriente eléctrica al mismo; y d) alto consumo energético, al ser la corriente requerida para generar el efecto de frenado, suministrada por baterías se requiere una gran cantidad de ellas para que el sistema de frenos esté siempre funcionando de manera óptima y no se reduzca su eficacia según transcurra el tiempo y según se descarguen las baterías. Por tal motivo se ha optado por tener un disco de freno con las siguientes características:

- Diámetro: 250 mm. y Ancho (Espesor): 36.5 mm.²
- Material: Se realizan cálculos con distintos materiales tales como cobre, aluminio y acero, esto debido a la distinta conductividad eléctrica que tiene cada uno de estos materiales. De la misma manera, se ha de trabajar en un diseño de disco tal que esté enfocado a prevenir áreas en las cuales se pueda presentar corrosión en el disco.

² Medidas típicas de un disco de freno.

- Inductor (electroimán): El electroimán debe estar compuesto por una cantidad de bobinas que generen el par de frenado suficiente para provocar la reducción de la velocidad del vehículo. El cálculo del diseño del inductor se presenta en el Inciso 2.4.3.10.
- Fuente de alimentación: Al ser el inductor un electroimán, es necesario que a éste se le suministre una corriente eléctrica, la cual será proporcionada por una batería típica de automóvil, que fue la considerada para el cálculo y diseño del inductor.

Capítulo 4. Modelado del sistema de freno electromagnético

4.1. Modelado en SolidWorks

En la Figura 1.2, se especifican las partes del sistema que se han de diseñar y para llevar a cabo su diseño se utiliza el software SolidWorks. A continuación, se detalla el proceso de diseño.

Los discos de freno, tanto delanteros como traseros, han de contar con las mismas características tanto de diseño como de materiales. Las Figuras 4.1-4.4 muestran la creación del perfil del disco, la creación del sólido, la asignación de material y las propiedades físicas, respectivamente.

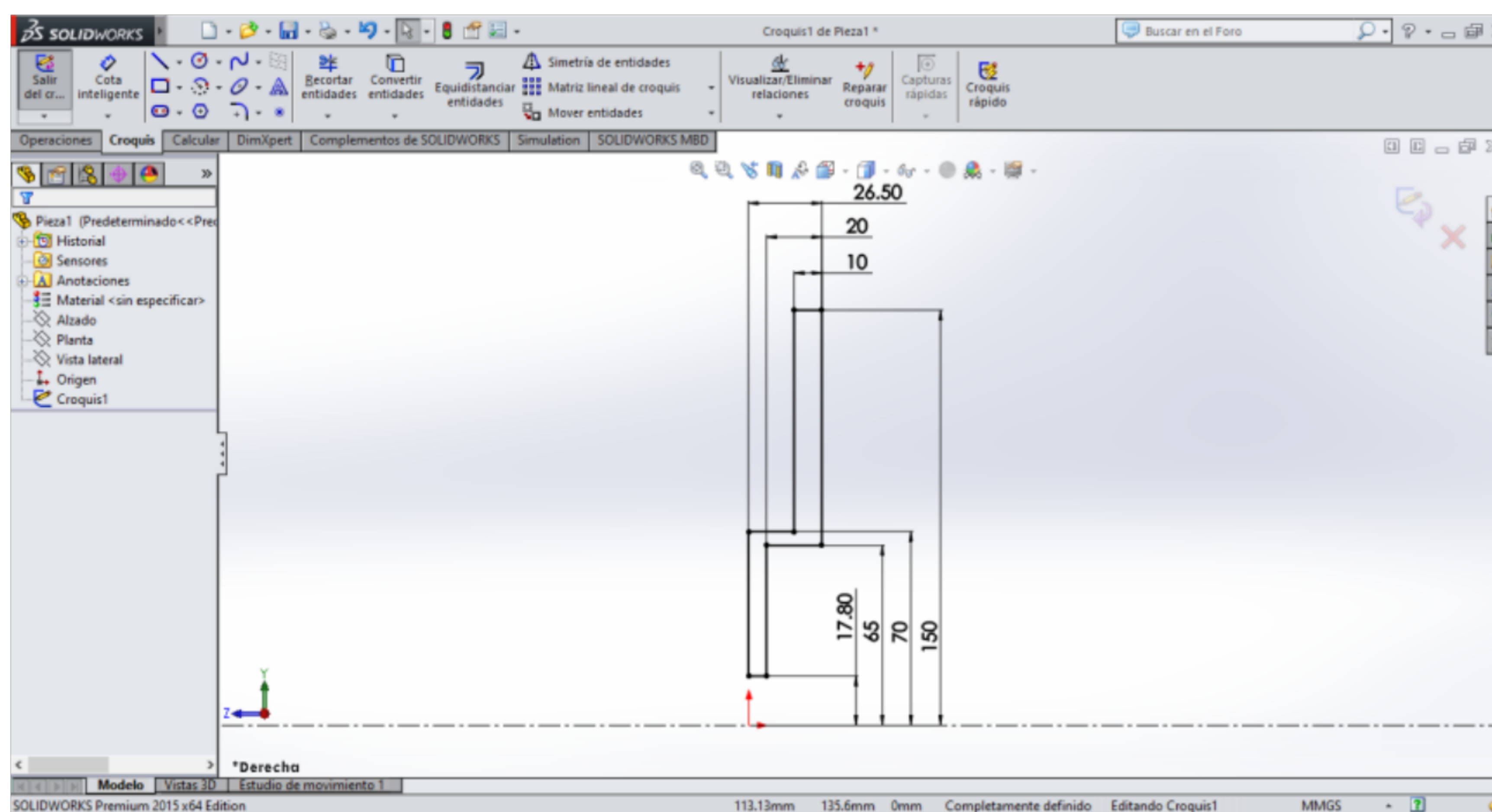


Figura 4.1. Perfil de disco de freno (Elaboración propia).

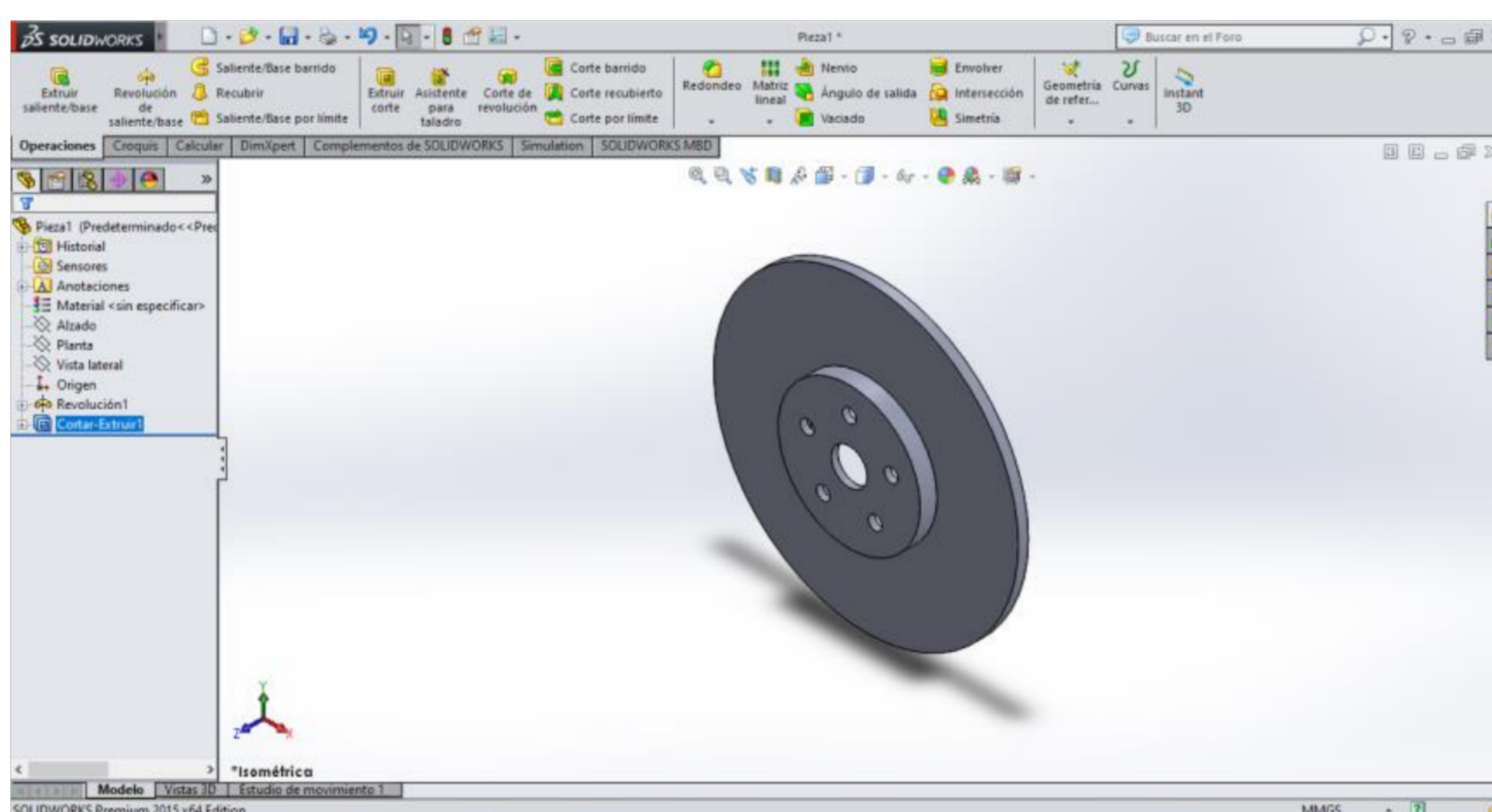


Figura 4.2. Disco de freno sólido (Elaboración propia).

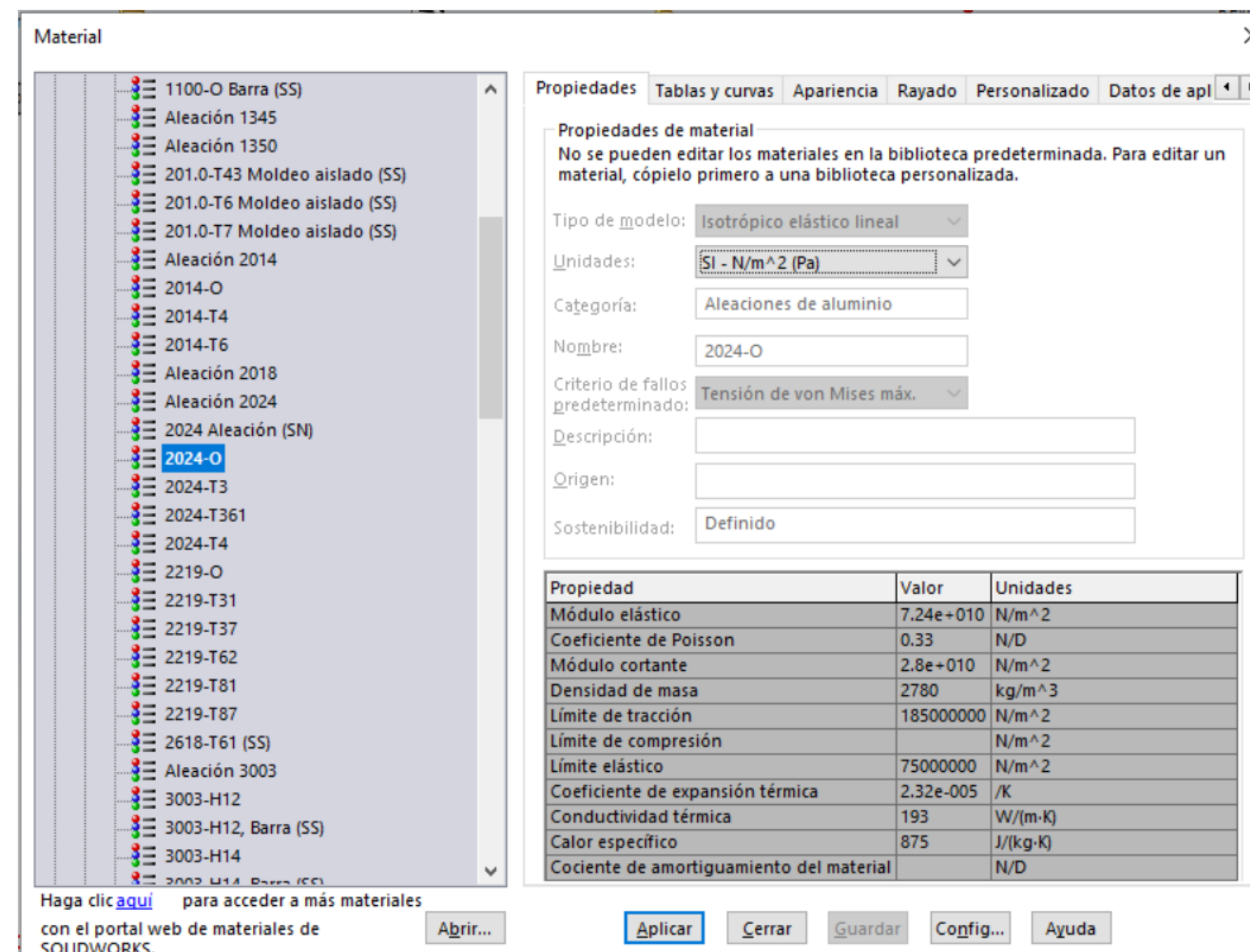


Figura 4.3. Propiedades mecánicas del material Aluminio 2024-0 (Elaboración propia).

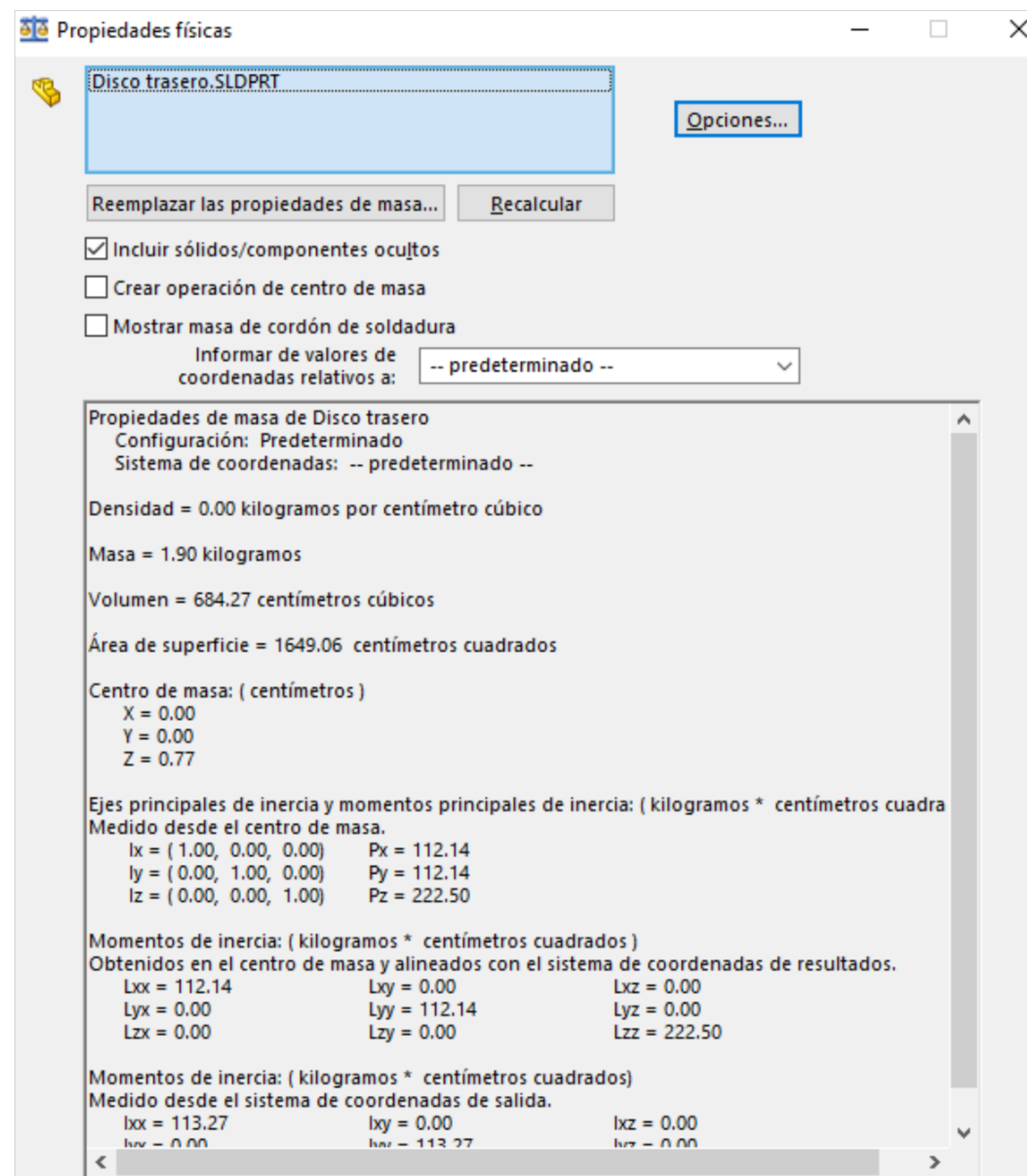


Figura 4.4. Propiedades físicas del disco (Elaboración propia).

El modelado en SolidWorks del embobinado delantero y del embobinado trasero, ha de cumplir las características establecidas en el Inciso 2.4.3.10. Las Figuras 4.5-4.11 muestran la creación de la matriz de embobinado, la creación del sólido, la asignación de materiales y sus propiedades físicas.

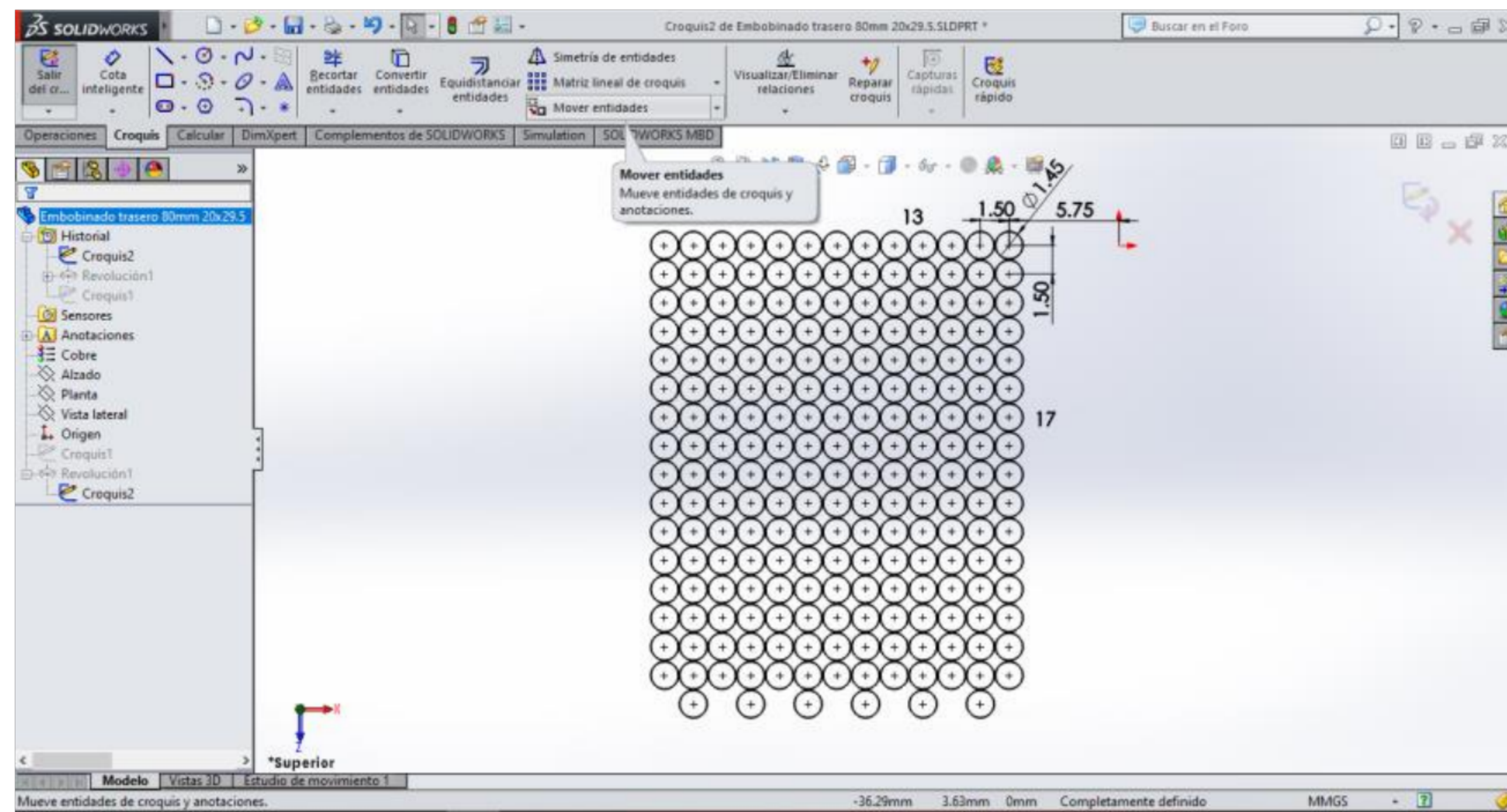


Figura 4.5. Matriz de embobinado trasero (6x16 + 7x17 vueltas) (Elaboración propia).

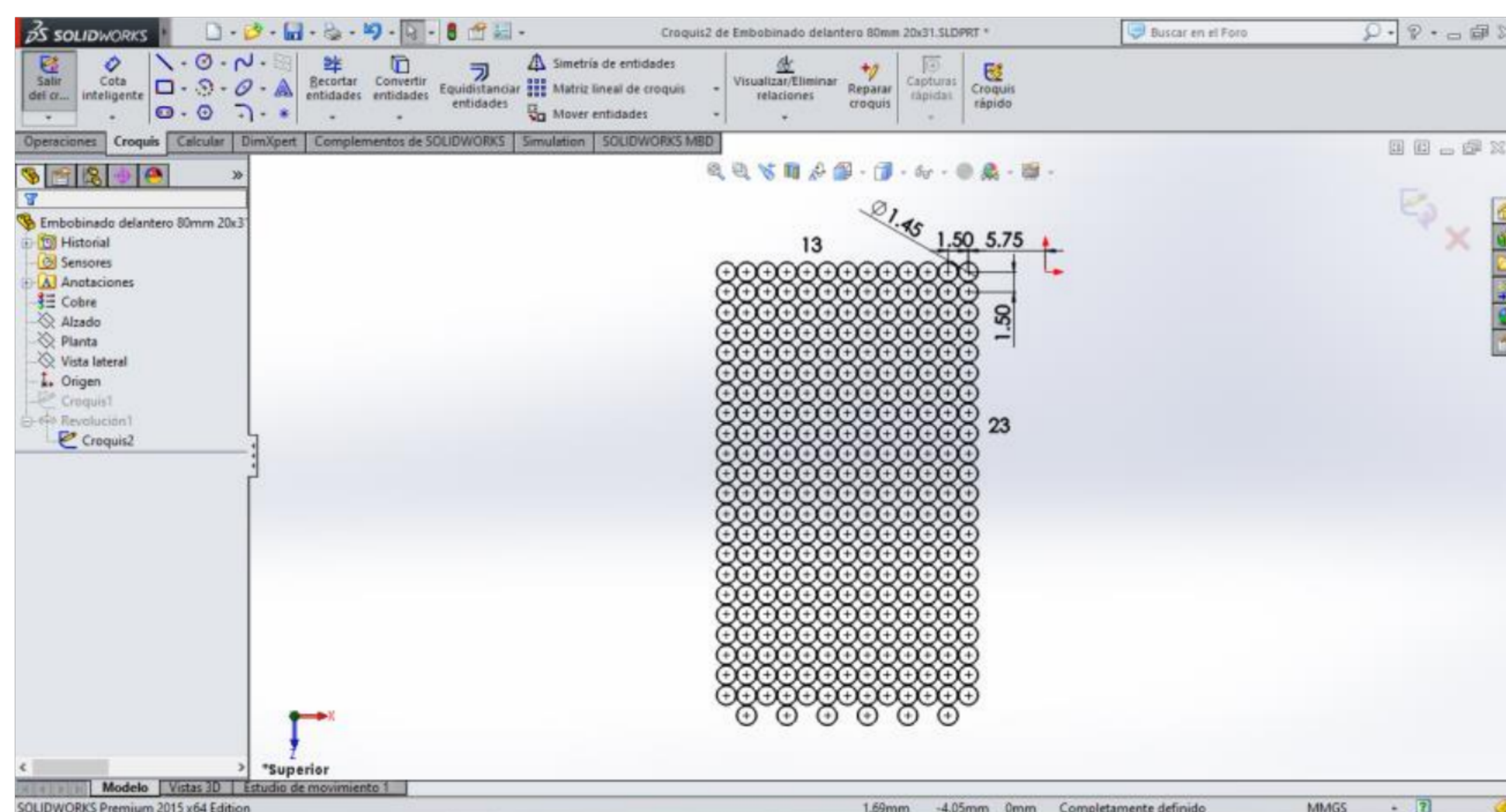


Figura 4.6. Matriz de embobinado delantero (6x22 + 7x23 vueltas) (Elaboración propia).

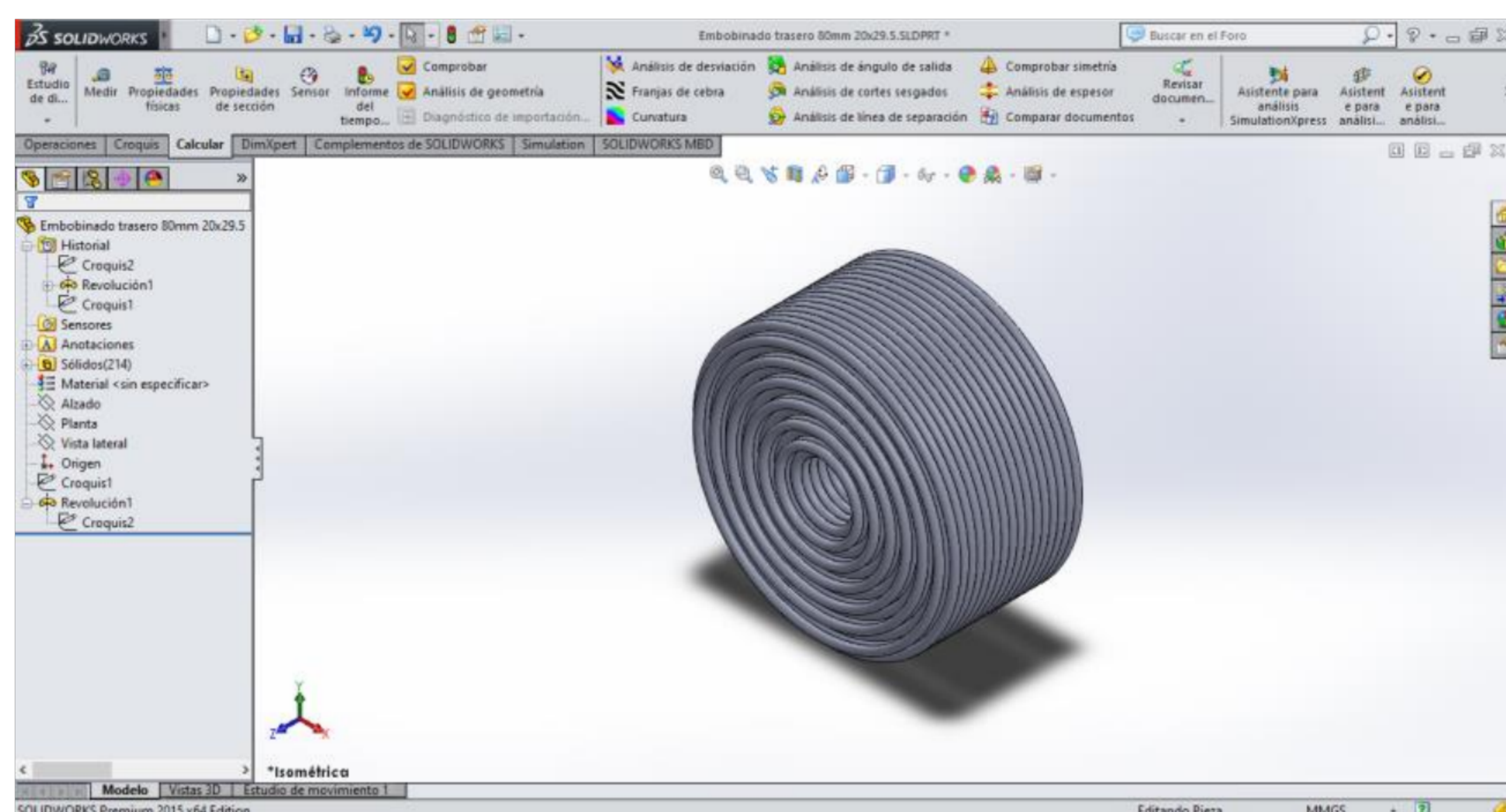


Figura 4.7. Embobinado trasero obtenido con la operación revolución (215 vueltas) (Elaboración propia).

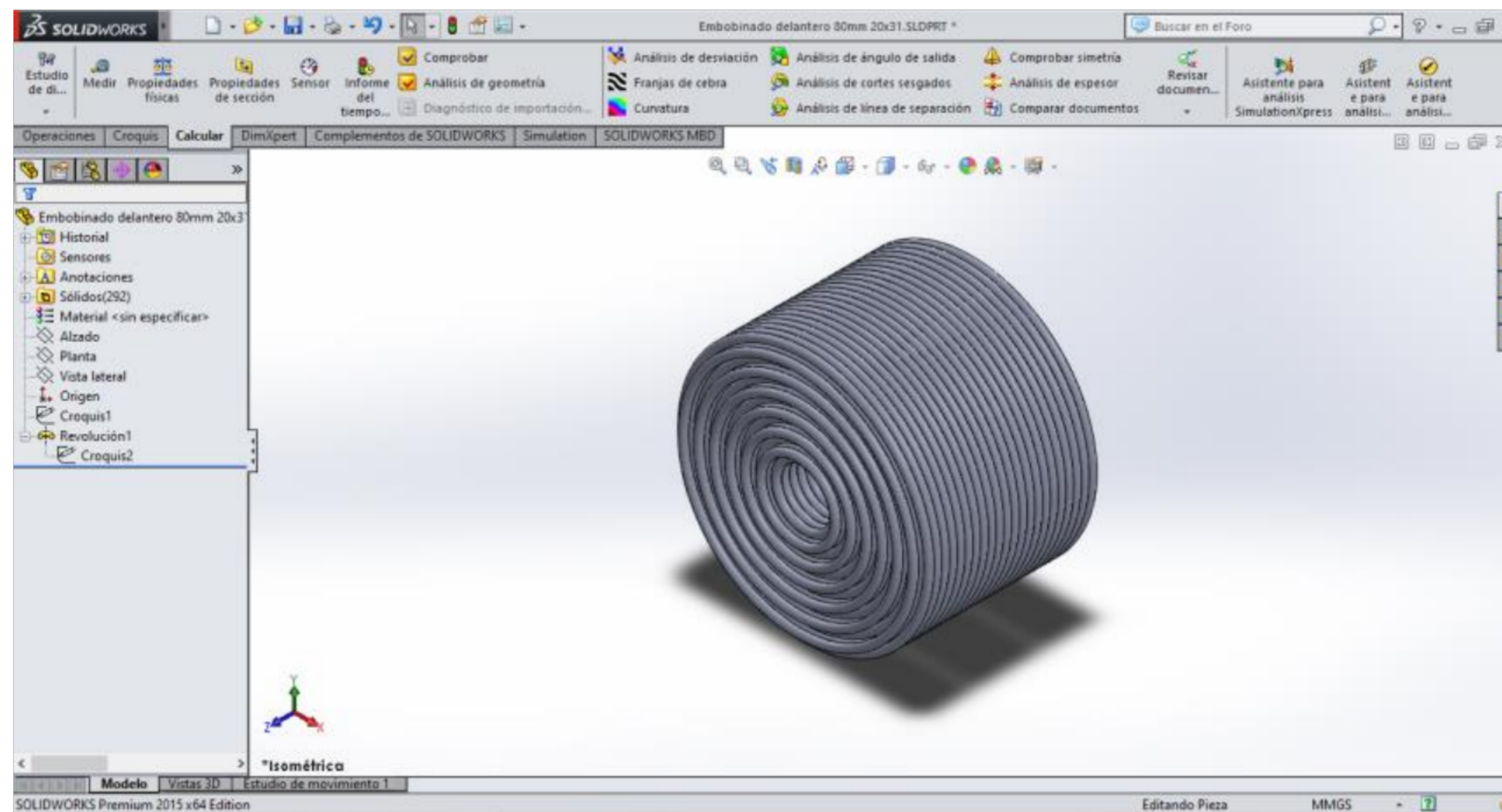


Figura 4.8. Embobinado delantero obtenido con la operación revolución (293 vueltas) (Elaboración propia).

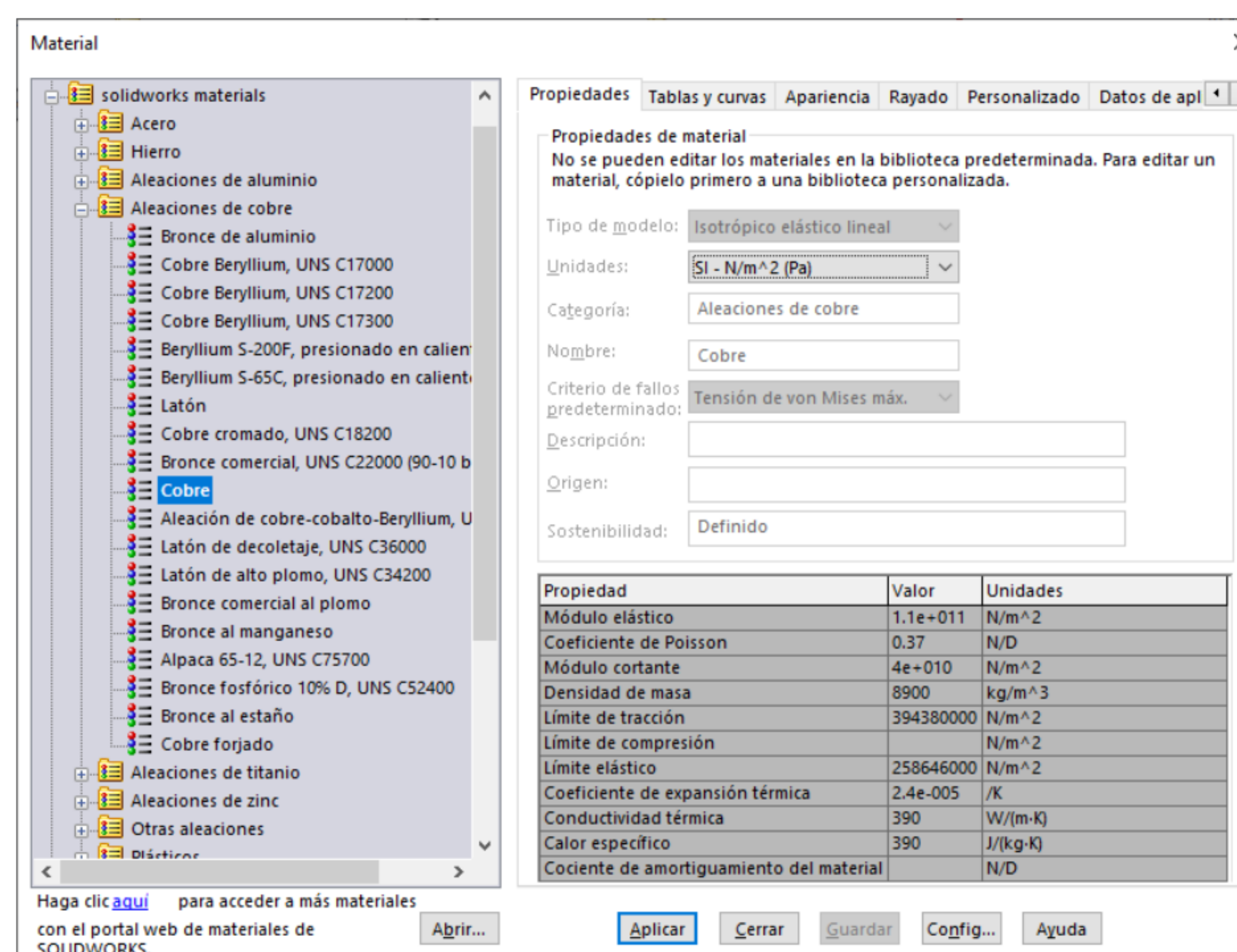


Figura 4.9. Asignación de material para embobinado trasero y delantero cobre (Elaboración propia).

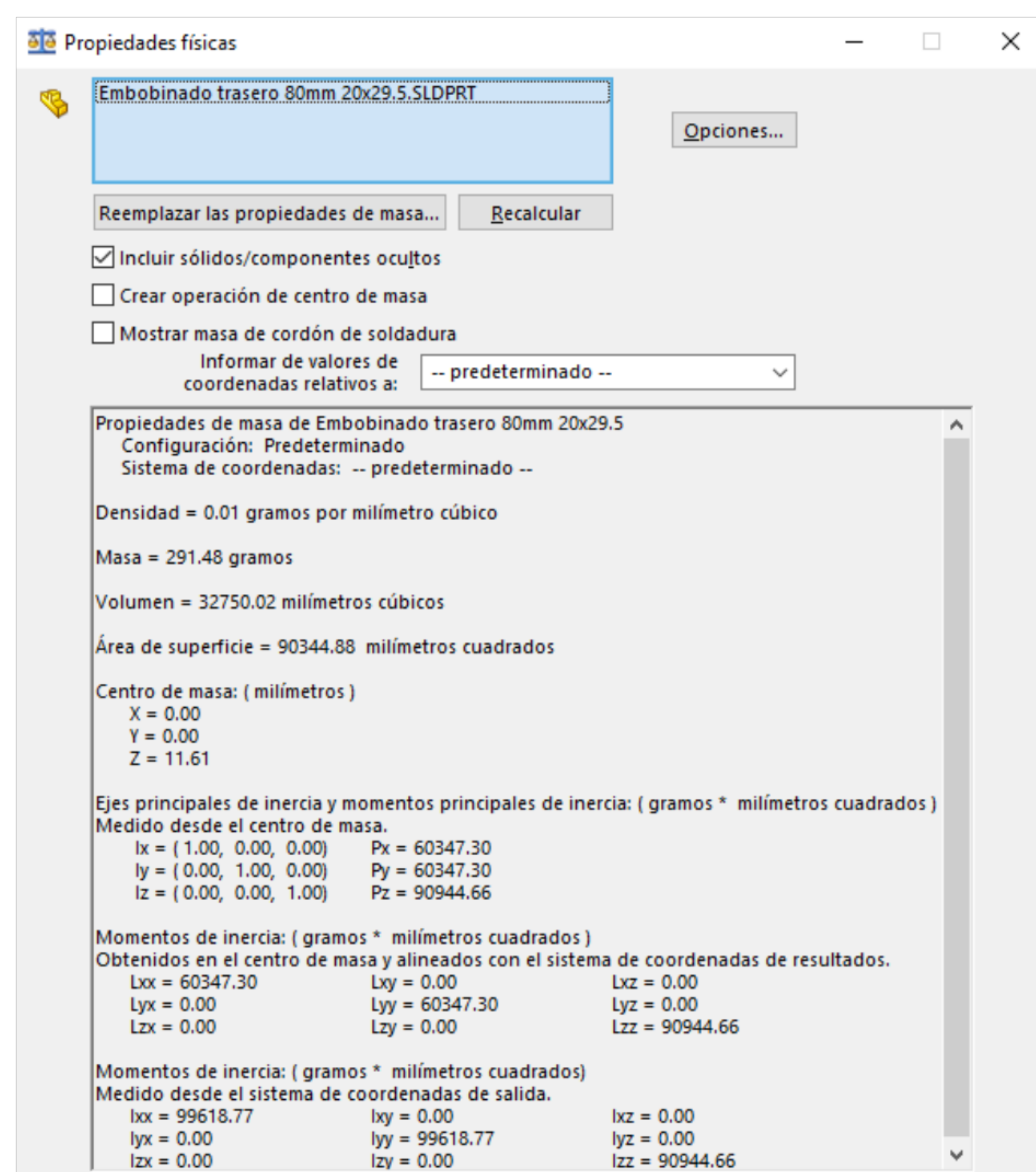


Figura 4.10. Propiedades físicas del embobinado trasero (Elaboración propia).

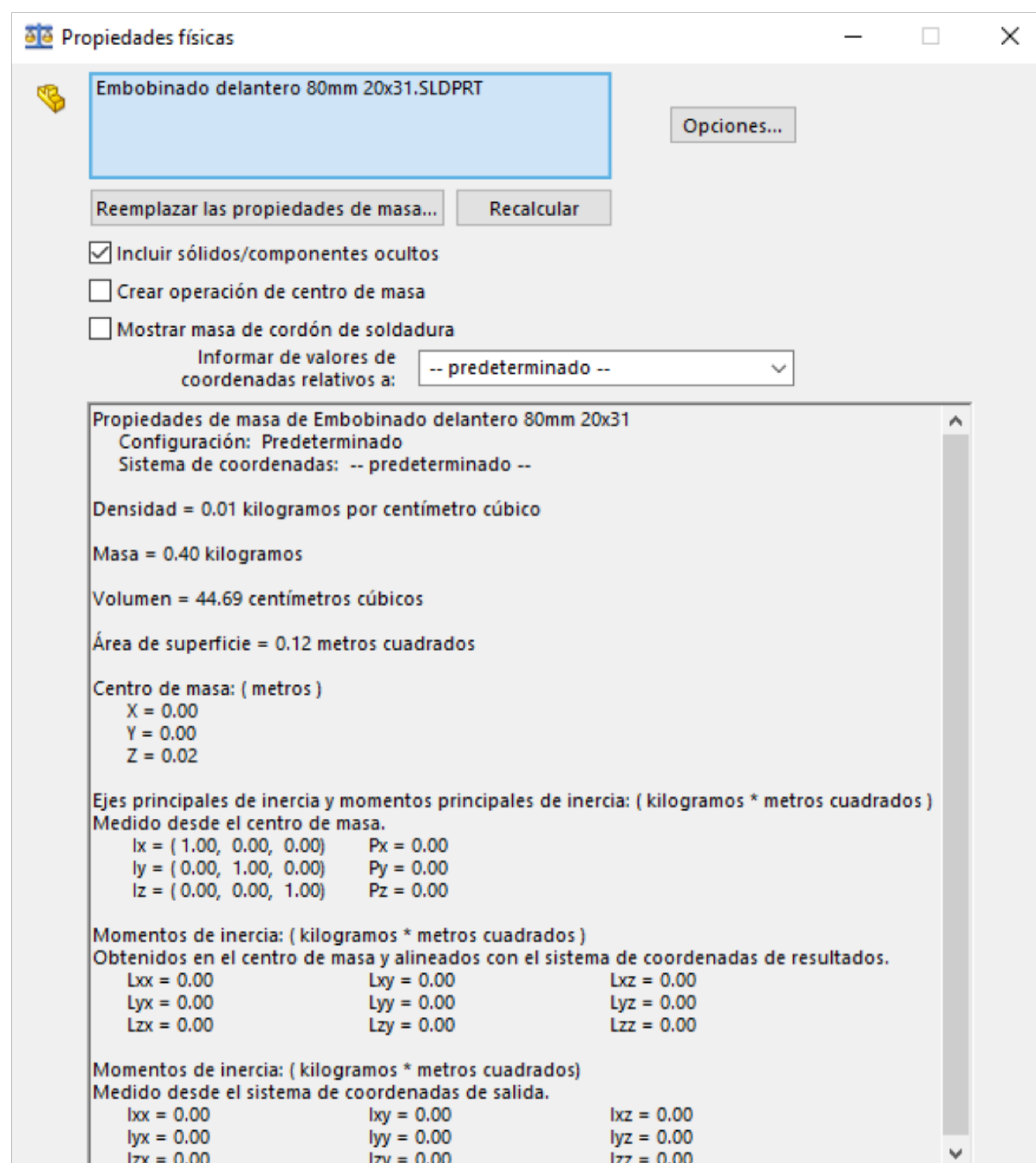


Figura 4.11. Propiedades físicas del embobinado delantero (Elaboración propia).

Respecto al diseño de los núcleos, delantero y trasero, éstos están definidos por las dimensiones de los embobinados y el material debe ser hierro fundición

gris. Las Figuras 4.12-4.18 ilustran los perfiles del núcleo delantero y trasero, la creación del sólido, la asignación de material y sus propiedades físicas.

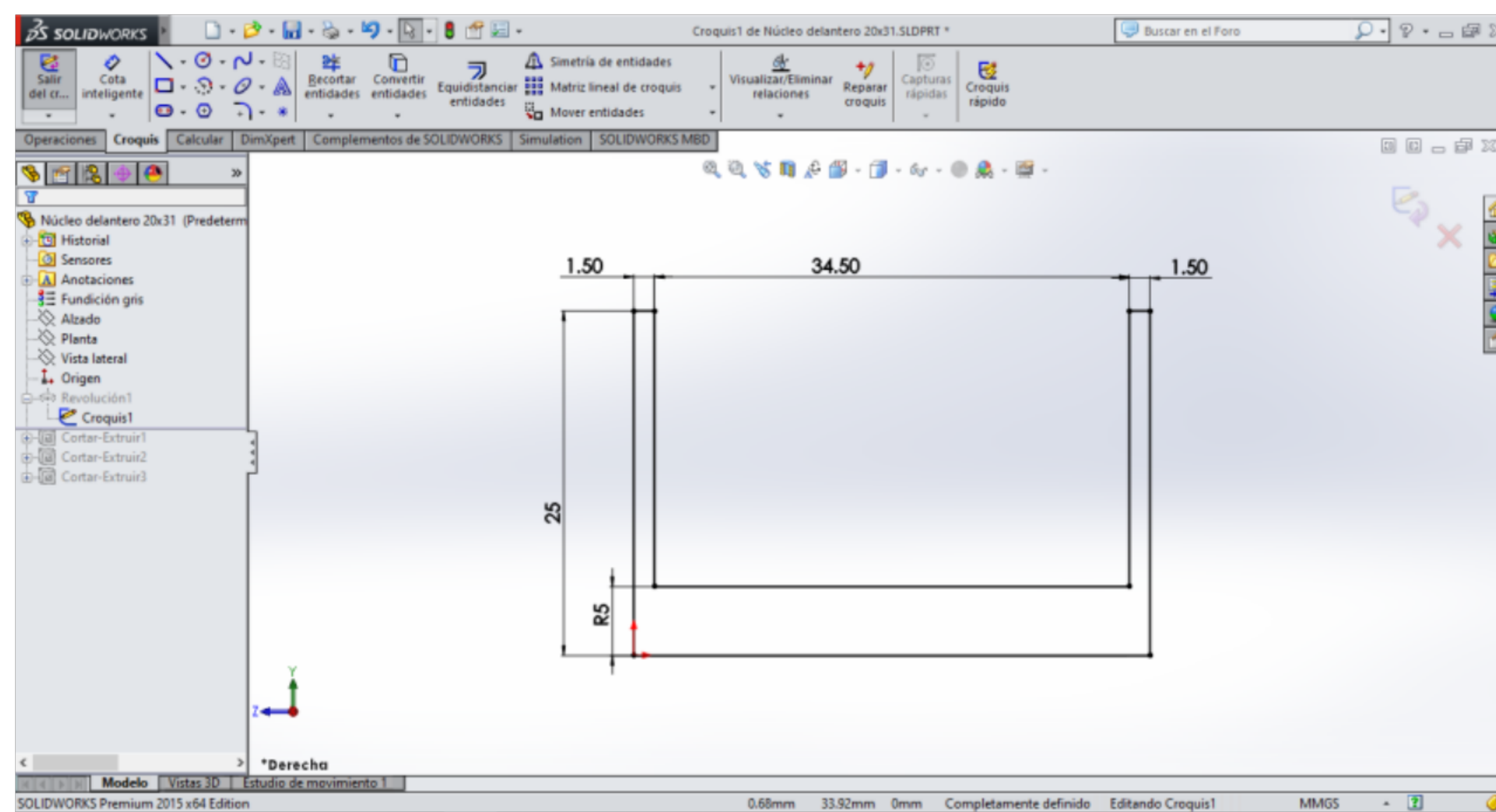


Figura 4.12. Perfil del núcleo delantero (Elaboración propia).

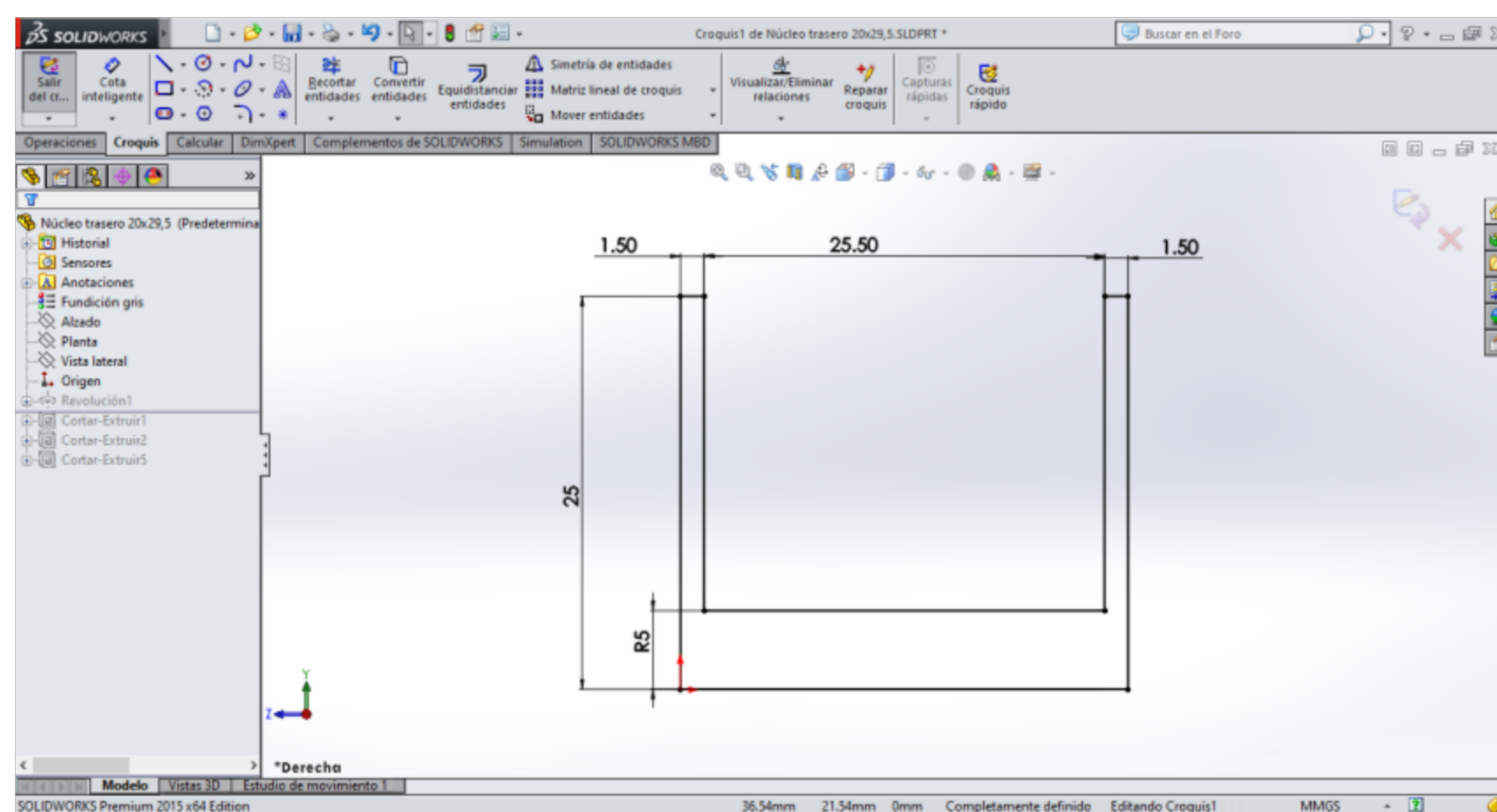


Figura 4.13. Perfil del núcleo trasero (Elaboración propia).

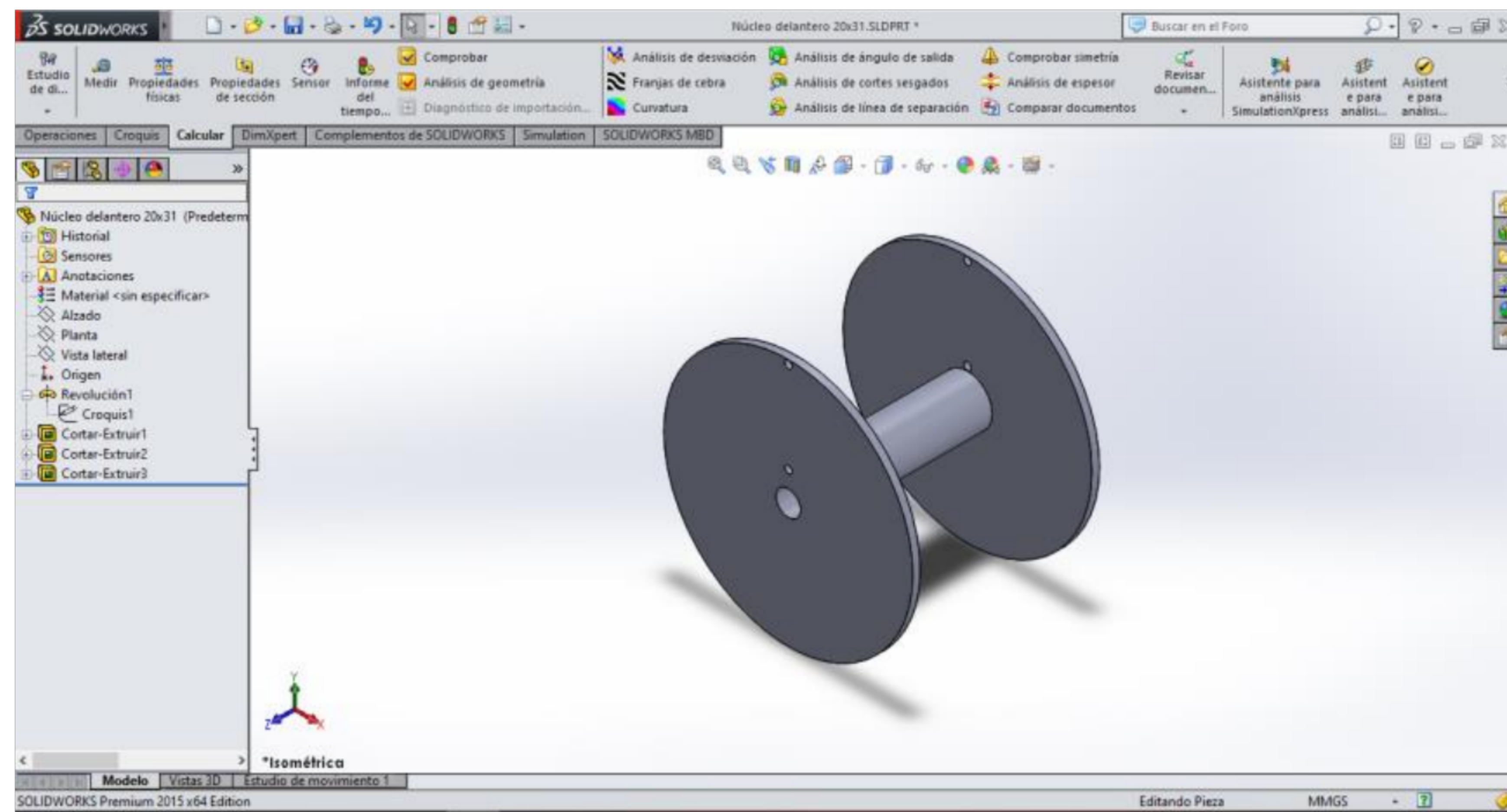


Figura 4.14. Núcleo delantero (sólido) (Elaboración propia).

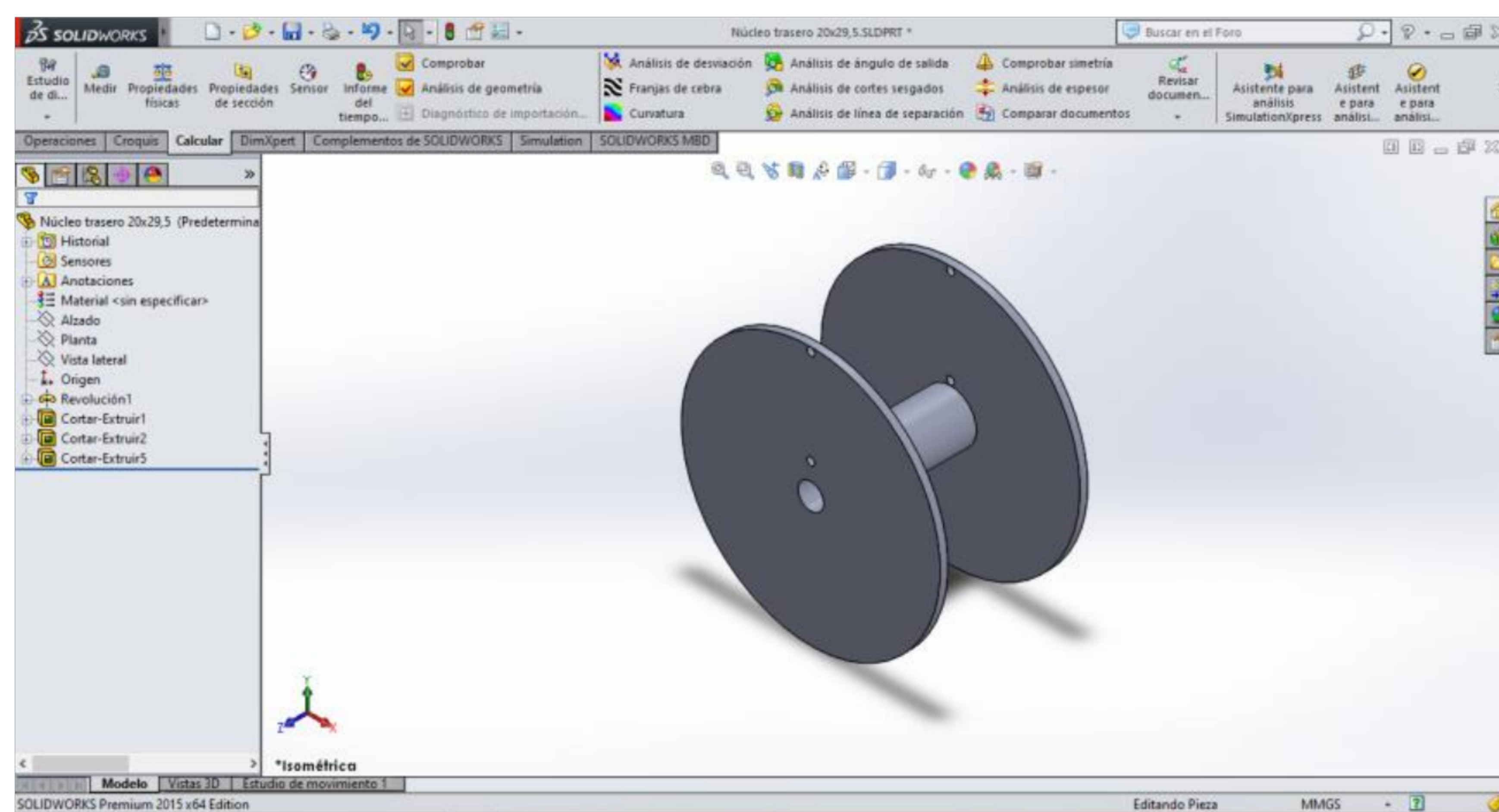


Figura 4.15. Núcleo trasero (sólido) (Elaboración propia).

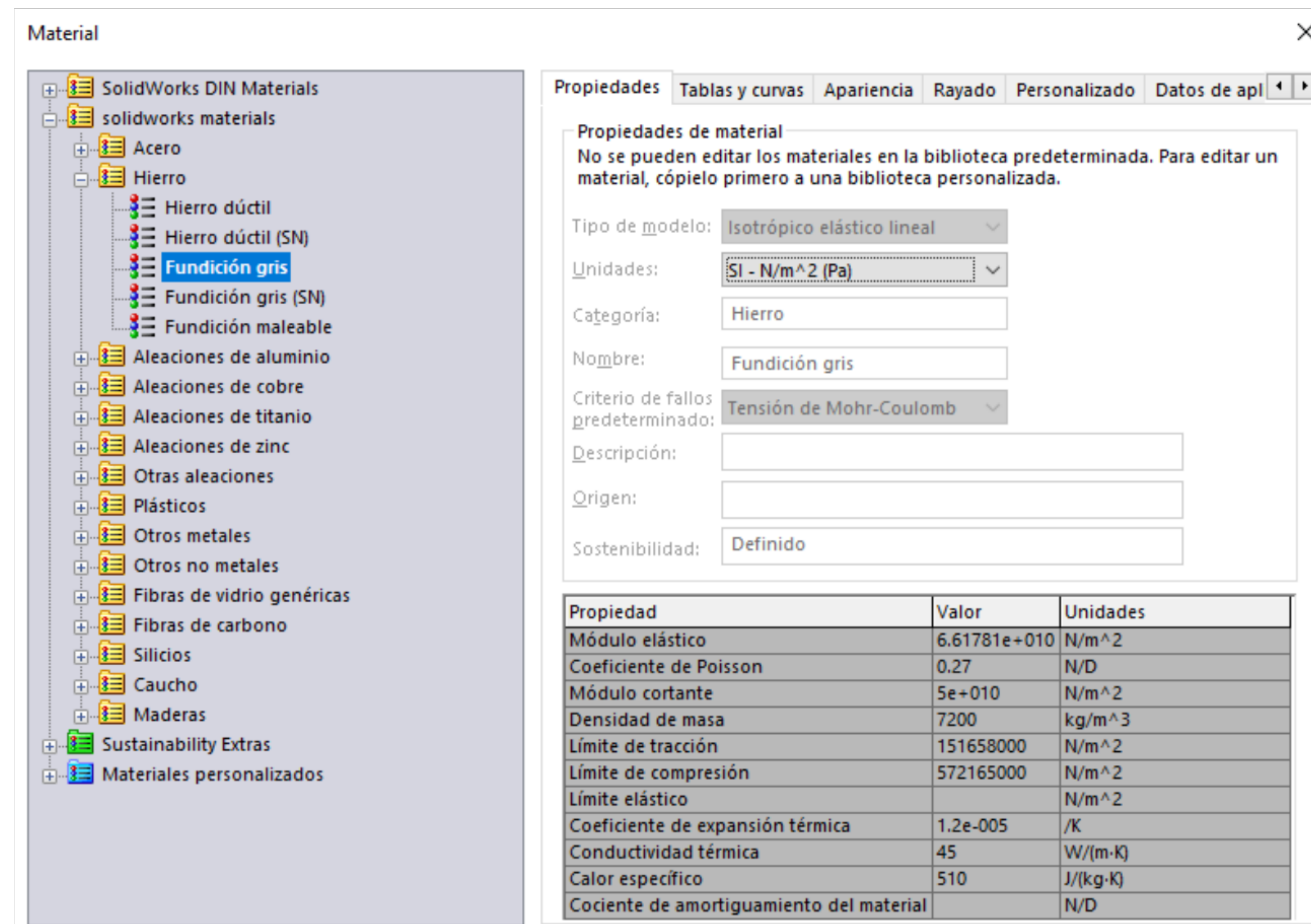


Figura 4.16. Asignación de material para el núcleo delantero y trasero. Fundición gris (Elaboración propia).

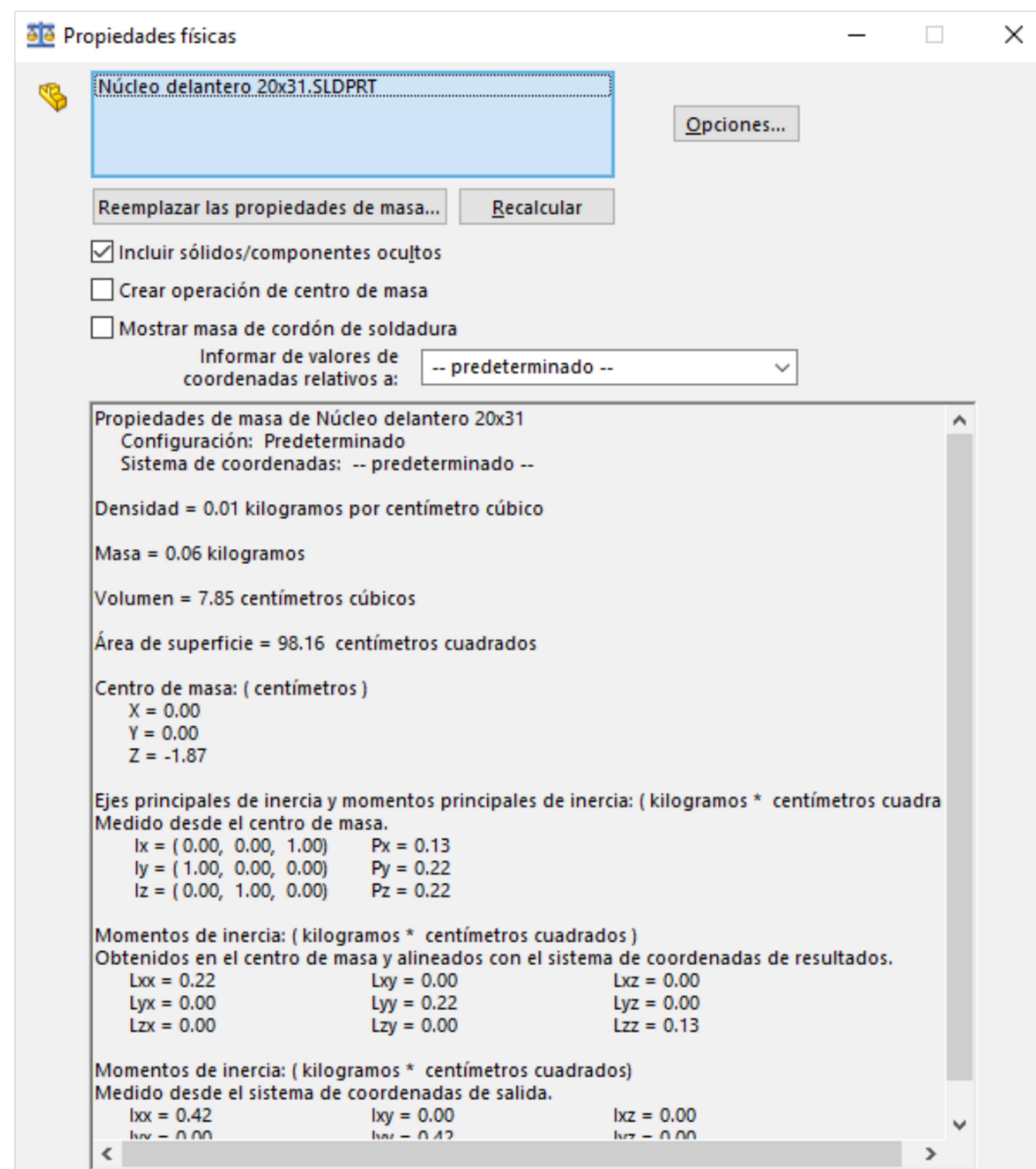


Figura 4.17. Propiedades físicas del núcleo delantero (Elaboración propia).

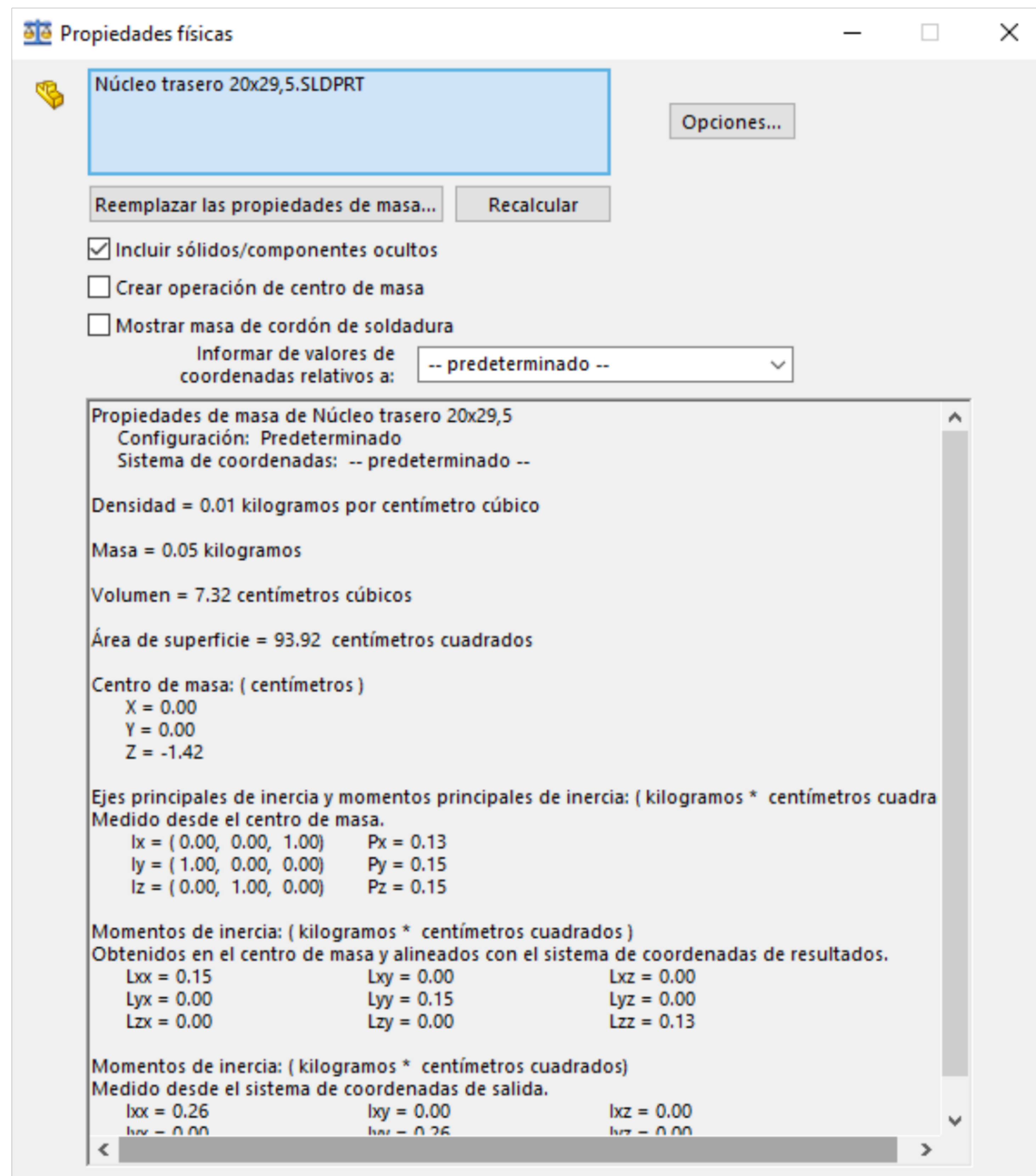


Figura 4.18. Propiedades físicas del núcleo trasero (Elaboración propia).

Una vez obtenido el modelo 3D, tanto de los embobinados como de los núcleos traseros y delanteros, se realizó el ensamble de estas piezas para obtener los frenos delanteros y traseros, como muestran las Figuras 4.19 y 4.20, respectivamente.

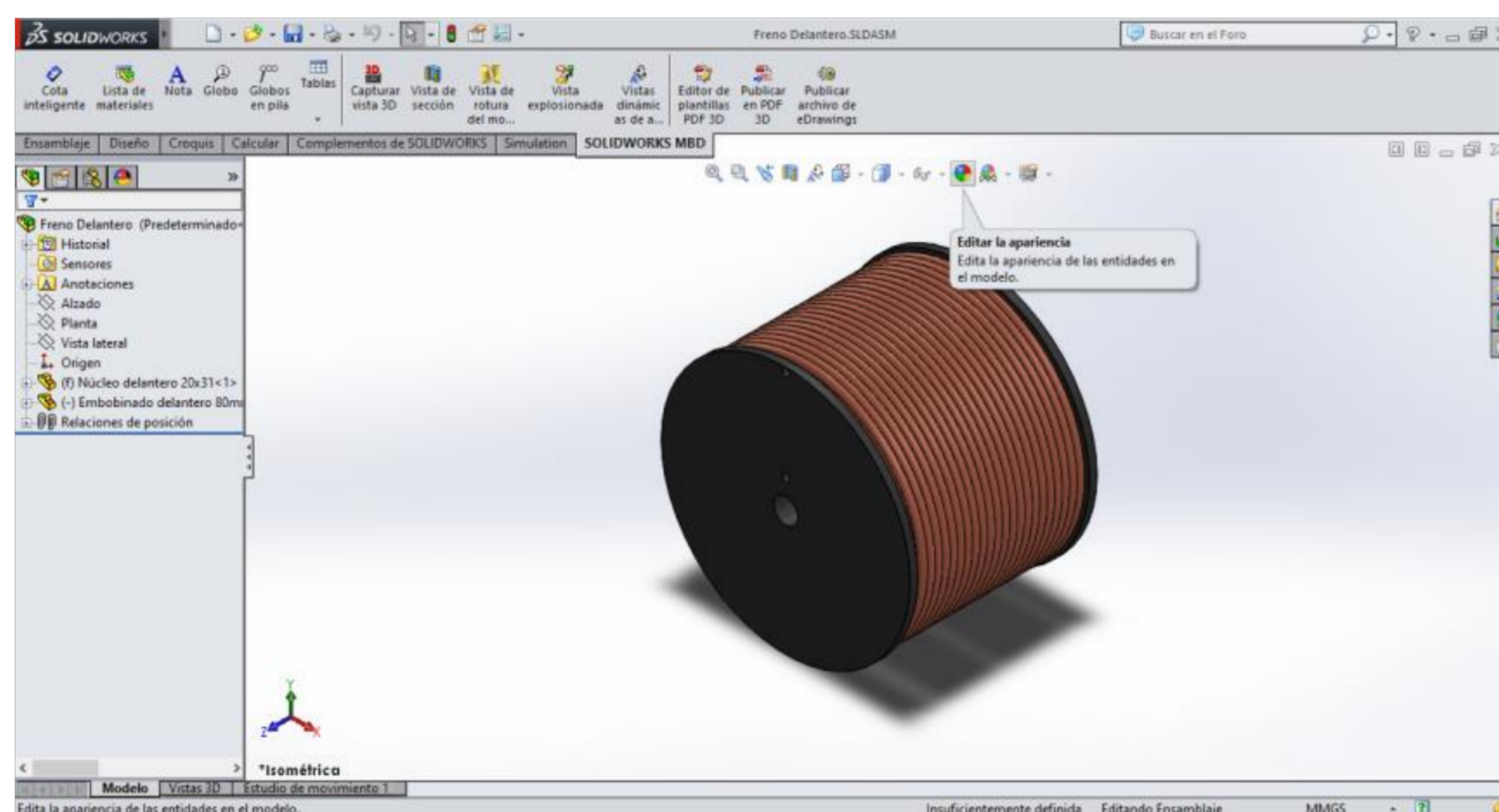


Figura 4.19. Ensamble freno delantero (Elaboración propia).

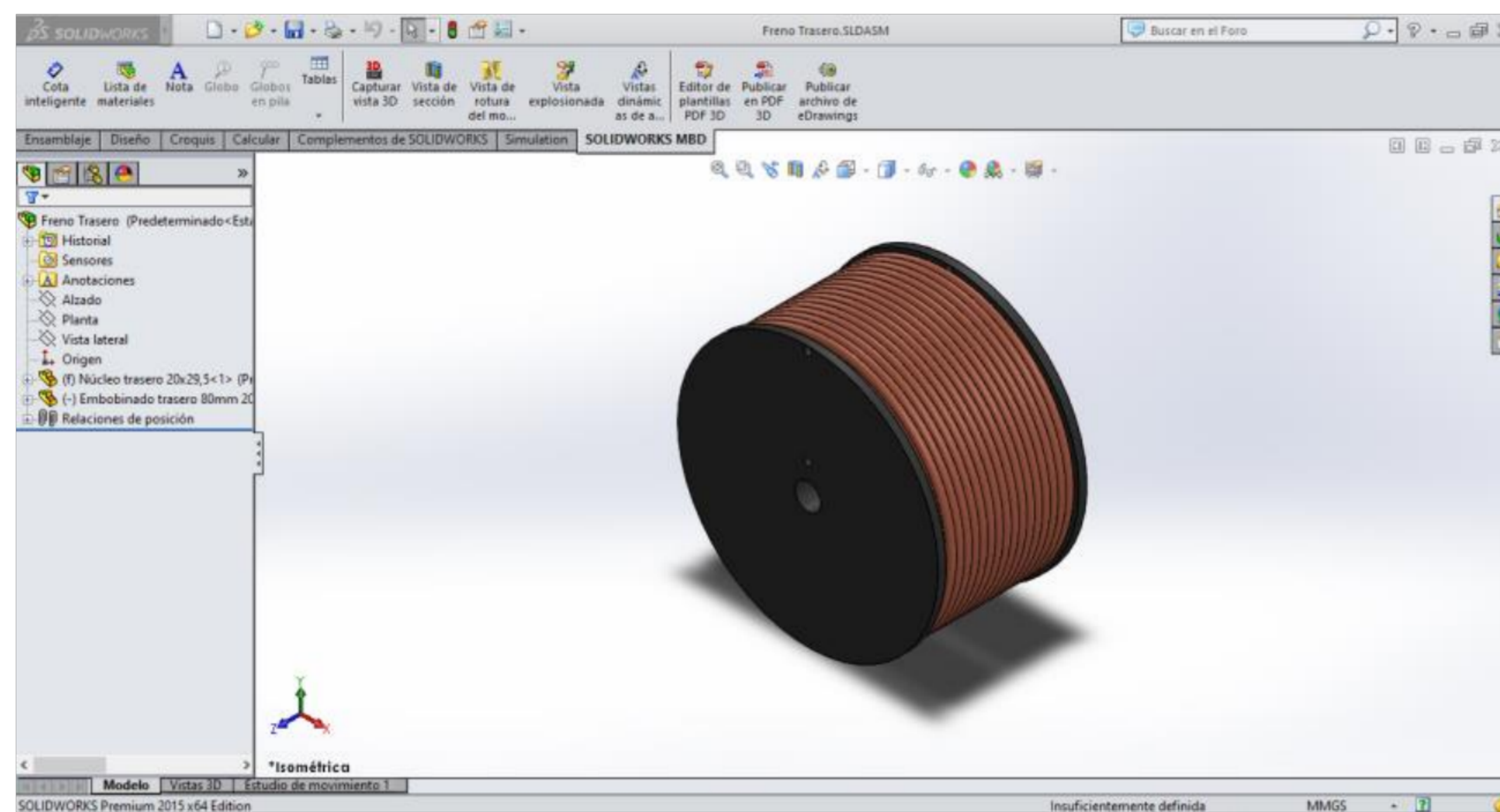


Figura 4.20. Ensamble freno trasero (Elaboración propia).

Por otra parte, se ha de trabajar en el ensamble final del sistema de frenos electromagnéticos, para ello, es requerido tener el modelo 3D de las distintas partes que compondrán al sistema tales como suspensión delantera y trasera, neumáticos, pedal de freno y batería. Estas partes se muestran en las Figuras 4.21-4.25. Por último, el ensamble de estos componentes, junto con los frenos delanteros, traseros y discos de freno se muestran en la Figura 4.26.

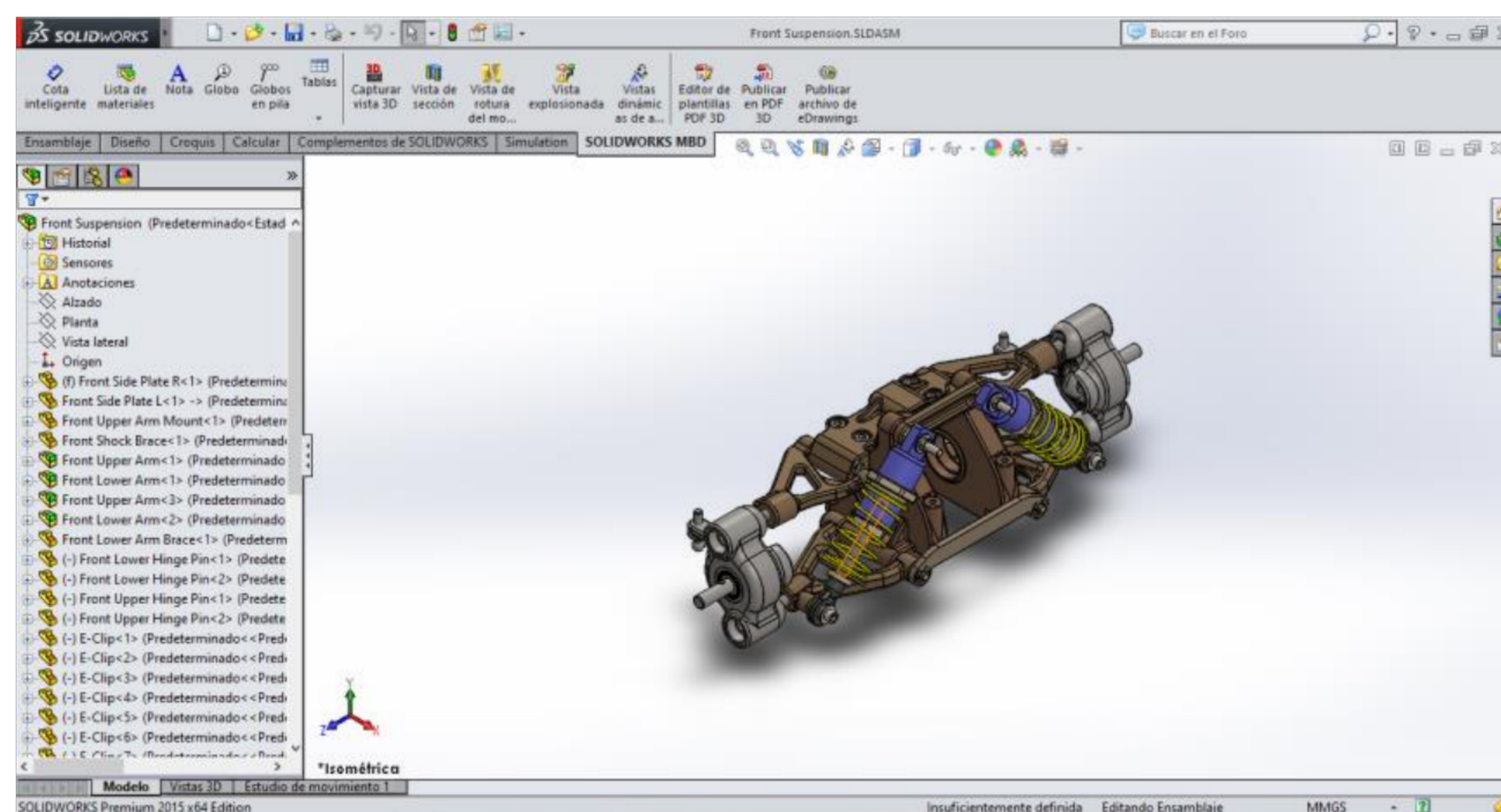


Figura 4.21. Modelo 3D de la suspensión frontal (Elaboración propia).

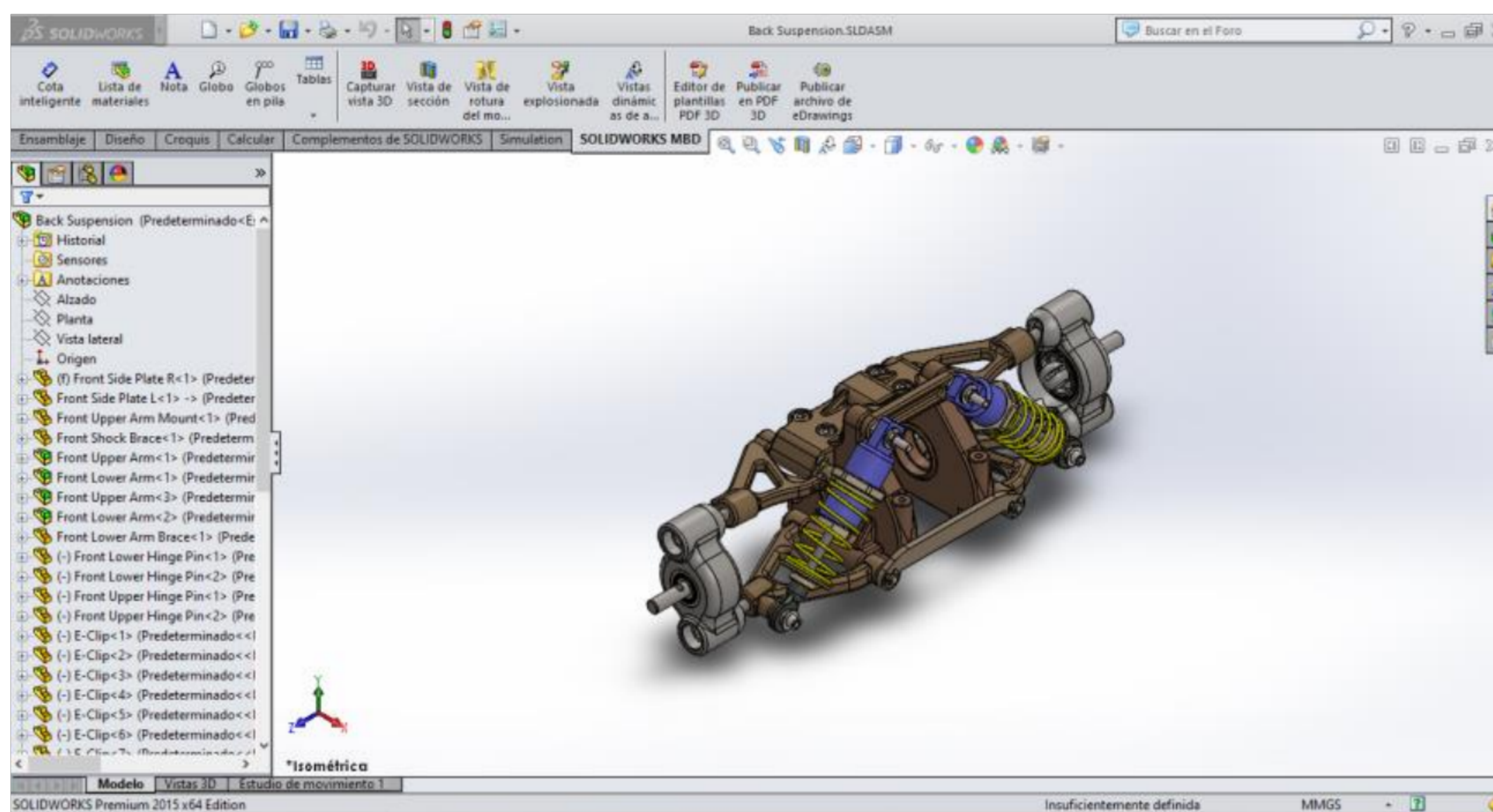


Figura 4.22. Modelo en 3D de la suspensión trasera (Elaboración propia).

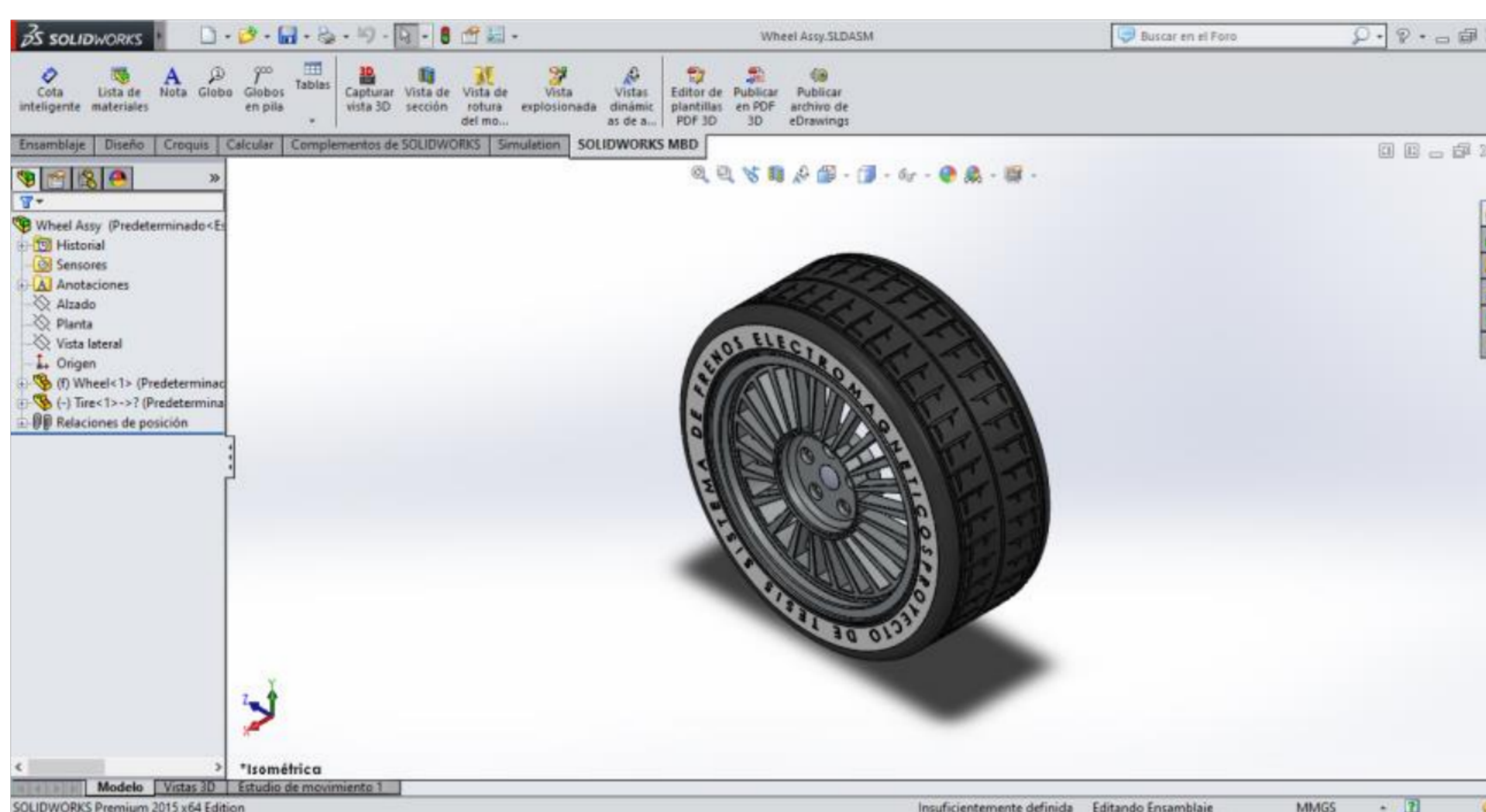


Figura 4.23. Modelo 3D del neumático (Elaboración propia).

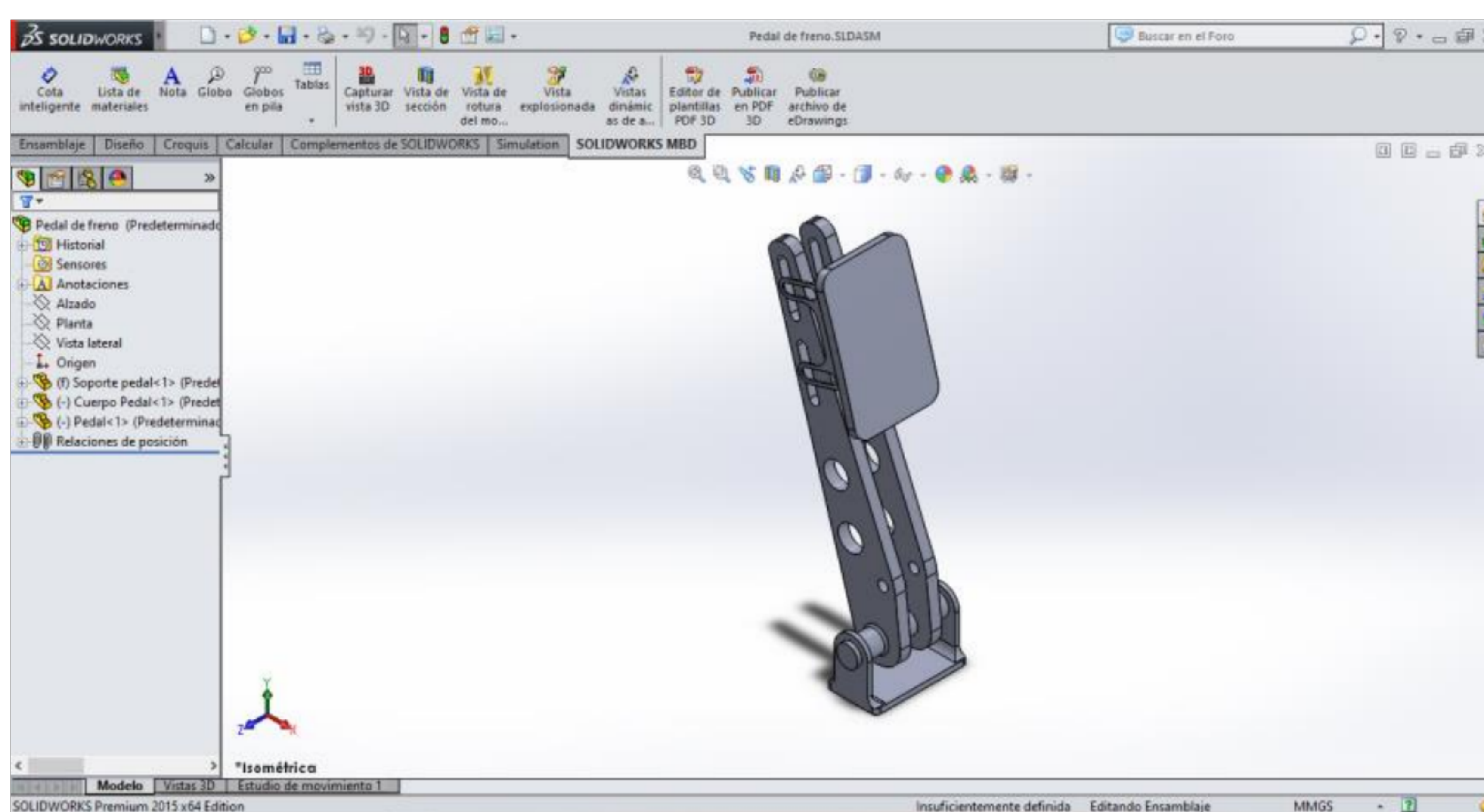


Figura 4.24. Modelo 3D del pedal de freno (Elaboración propia).

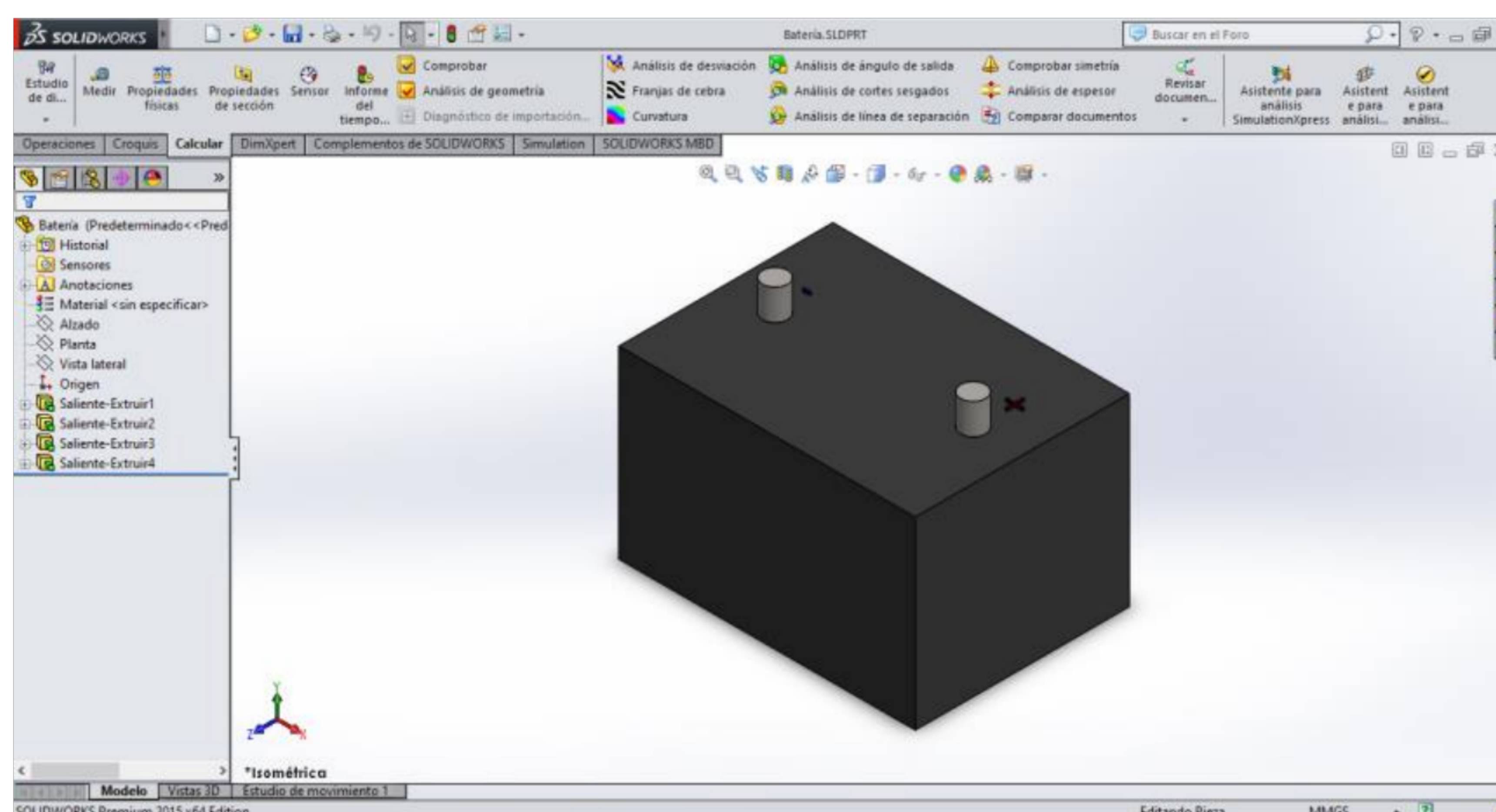


Figura 4.25. Modelo 3D de la batería (Elaboración propia).

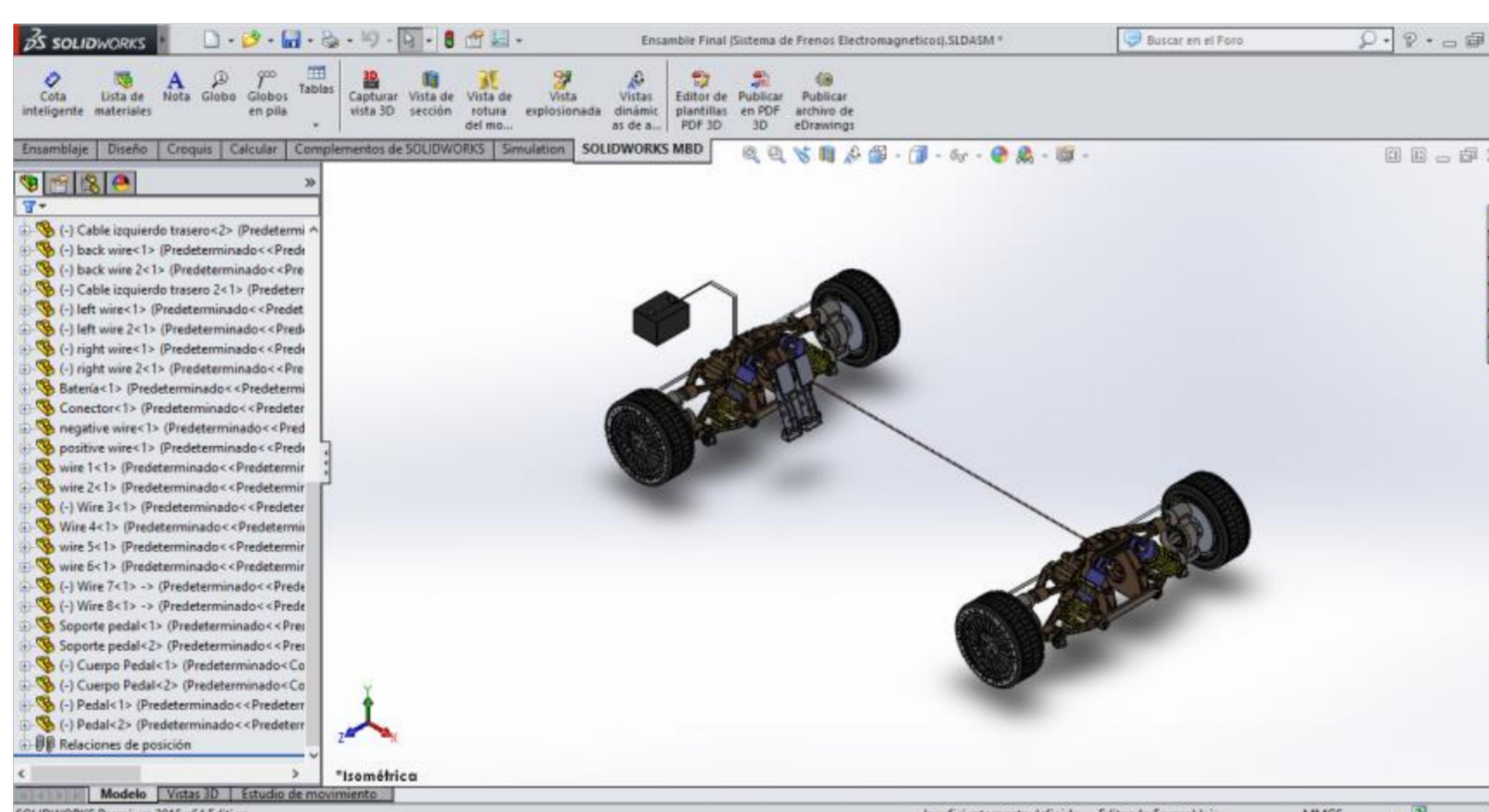


Figura 4.26. Ensamble final del sistema de frenos electromagnéticos (Elaboración propia).

4.2. Modelado en LabVIEW del sistema de freno electromagnético

En la etapa de modelado en LabVIEW se programaron distintos aspectos funcionales del sistema de frenos electromagnéticos diseñado en el presente proyecto. La base para el desarrollo y programación de éstos son las ecuaciones que describen los distintos fenómenos físicos relacionados con el frenado electromagnético. A continuación, se describen las fases de diseño.

4.2.1. Sistema de regulación de frenado (pedal de freno)

El pedal de freno se representa por un controlador numérico tipo *Scrollbar* (Figura 4.27), al cual, se le han de modificar las propiedades para que su valor tanto máximo como mínimo coincidan con los especificados en el diseño del

sistema (Figura 4.28). Al ser el pedal del freno, regulador de la corriente eléctrica que ha de circular en el electroimán su valor se limita a 23.999 mA, que es el especificado en el diseño (Inciso 2.4.3.10).

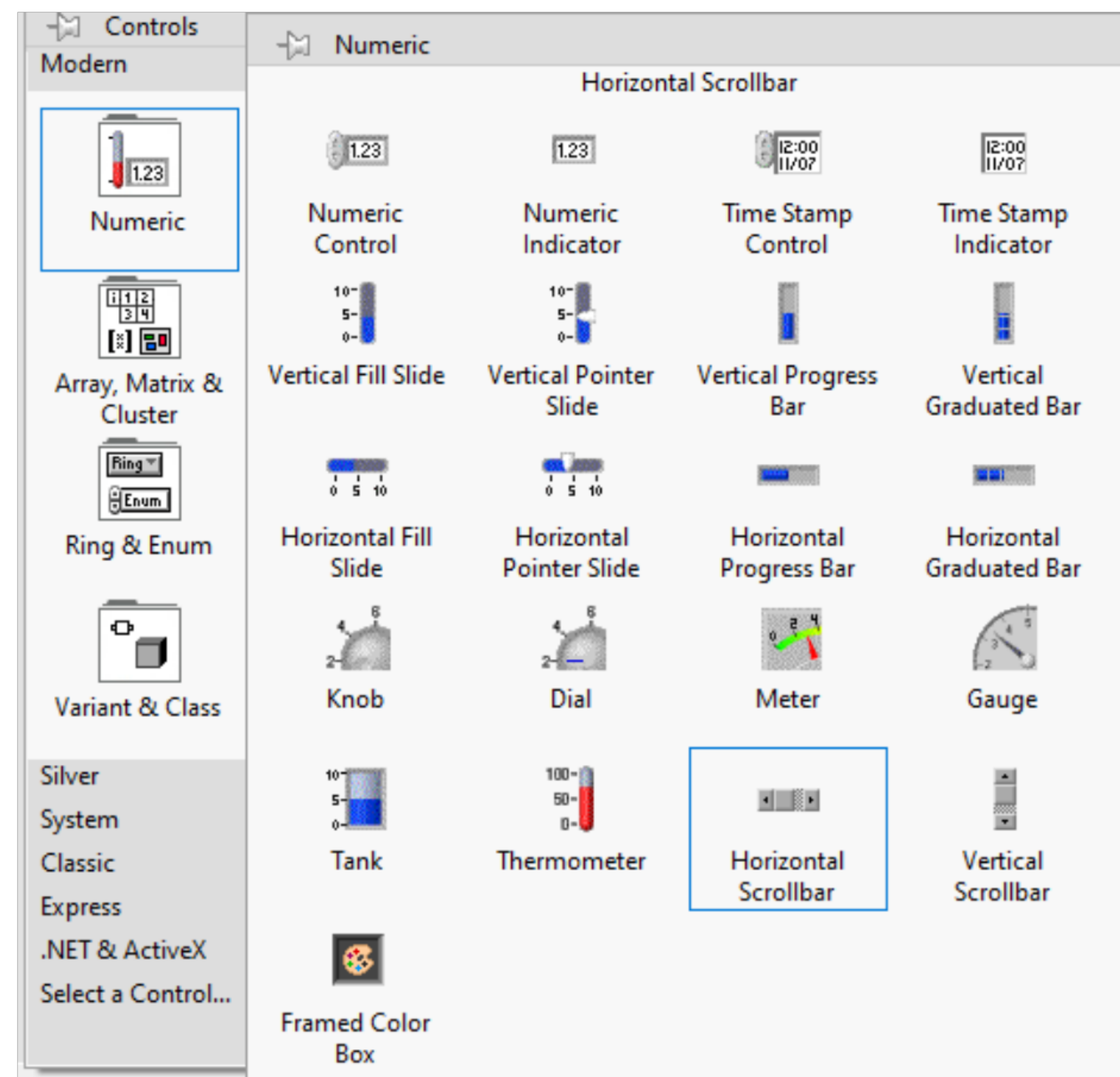


Figura 4.27. Controlador numérico tipo Scrollbar para pedal de freno y acelerador (Elaboración propia).

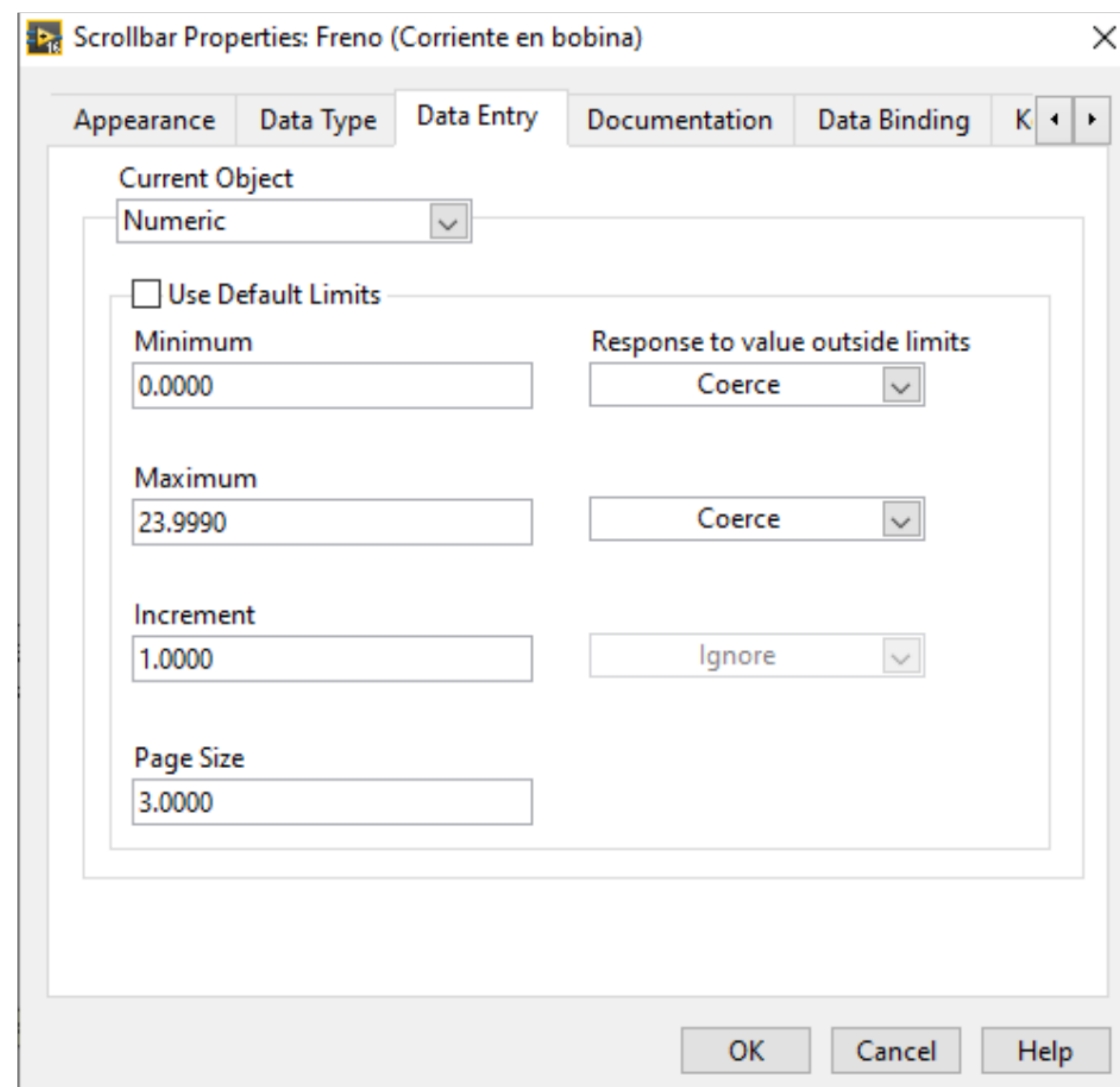


Figura 4.28. Valor máximo y mínimo del pedal de freno (Elaboración propia).

4.2.2. Sistema de aceleración del vehículo

El pedal acelerador, al igual que el pedal de freno, está representado por un controlador numérico tipo *Scrollbar*. Sin embargo, sus valores máximo y

mínimo se limitan a lo mostrado en la Figura 4.29. Estos límites se obtienen de promediar los valores máximos de aceleración de distintos vehículos existentes en el mercado actual (Tabla 4.1).

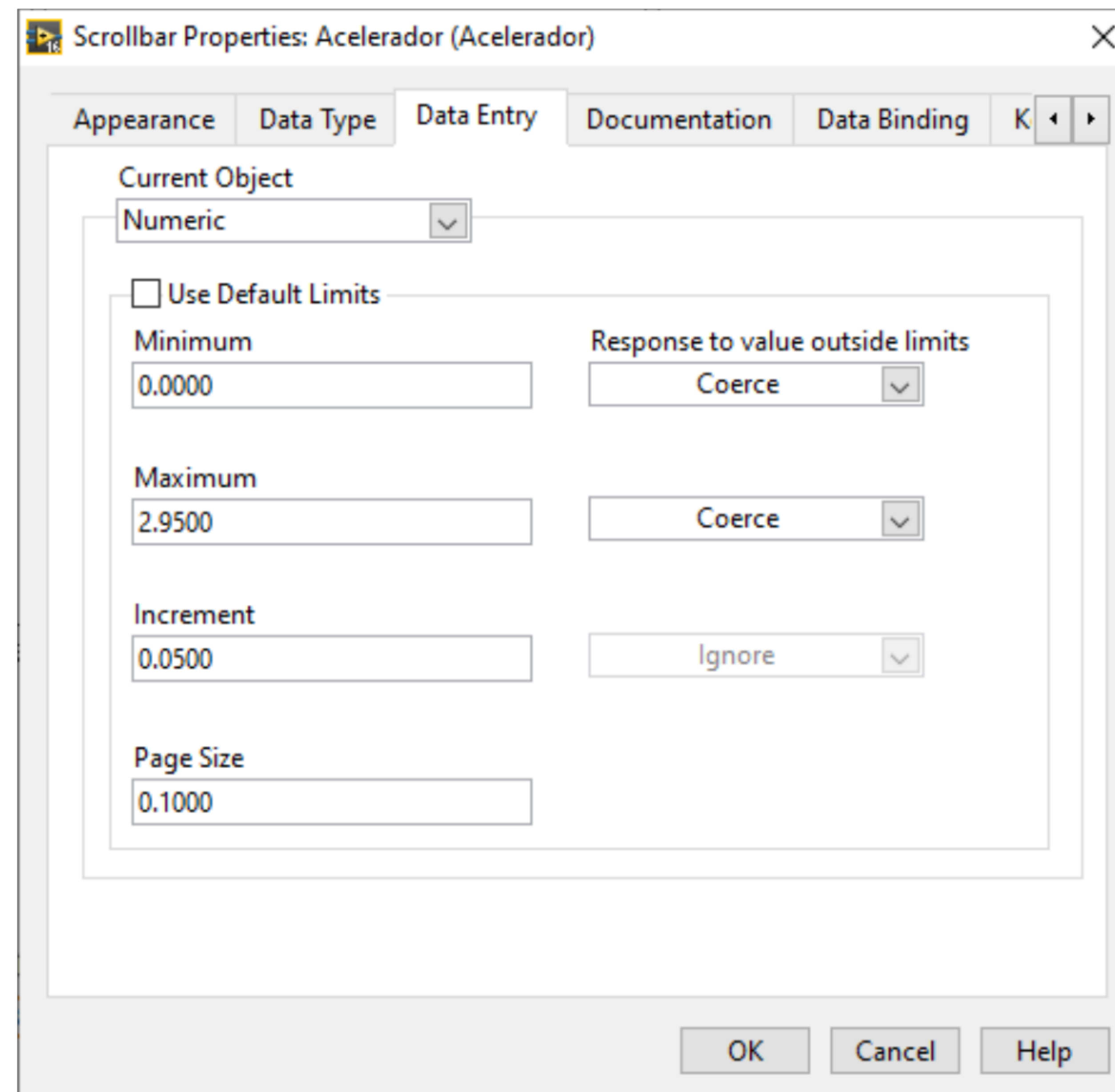


Figura 4.29. Límites de aceleración (Elaboración propia).

Tabla 4.1. Tiempo de aceleración de 0 a 100 km/h en vehículos en mercado (Elaboración propia).

Modelo	Tiempo
Jetta MT	8.4
Jetta RT	9.0
408 Allure Pack	11.9
408 Allure Pack THP Tiptronic	10.1
408 Allure Pack 1.6 HDI	12.0
408 Allure Plus	9.0
408 Feline	12.0
408 Feline THP	10.1
208 Gti	6.5
301 Allure	10.3
301 Allure HDI	12.4
301 Allure Plus	10.3
301 Allure Plus Tiptronic	12.1
301 VTI MT5	10.3
301 VTI EAT6	11.1
301 HDI MT5	11.2
Ford Focus sedán	8.9
Ford Focus hatchback	9.1
Audi S3	5.0
Audi RS3	4.1
BMW M3	4.1

4.2.3. Cálculo del campo magnético generado por los electroimanes

El campo electromagnético generado por los electroimanes está definido por la ecuación $B_i = \frac{\mu NiA}{2\pi(R^2+Z^2)^{3/2}}$. Para poder llevar esta ecuación al modelo, es necesario usar las distintas funciones y operaciones matemáticas disponibles en LabVIEW (Figura 4.30).

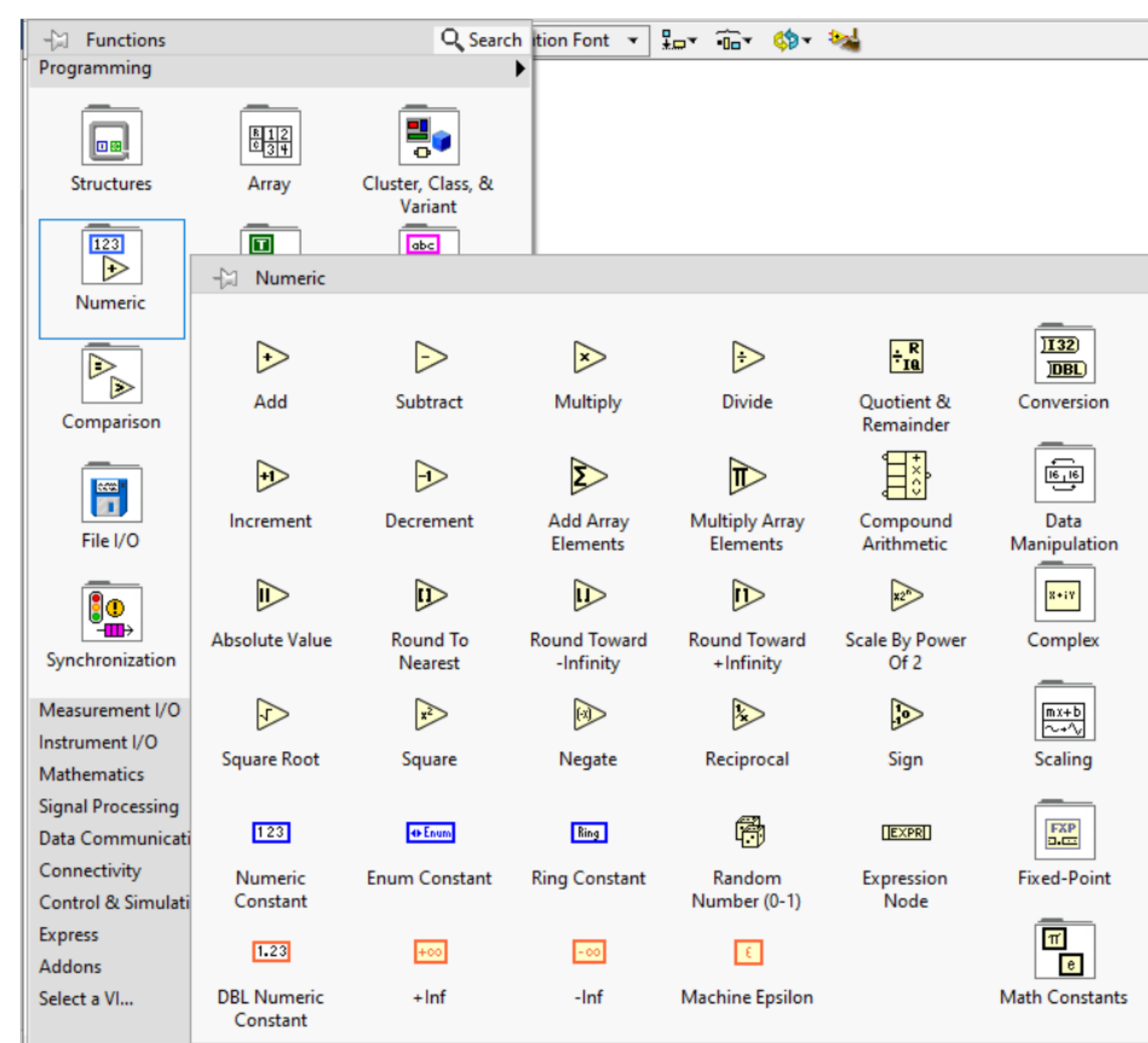


Figura 4.30. Operadores matemáticos disponibles en LabVIEW (Elaboración propia).

Con el uso de dichos operadores es posible llevar la ecuación del campo electromagnético a LabVIEW, quedando según se muestra en la Figura 4.31.

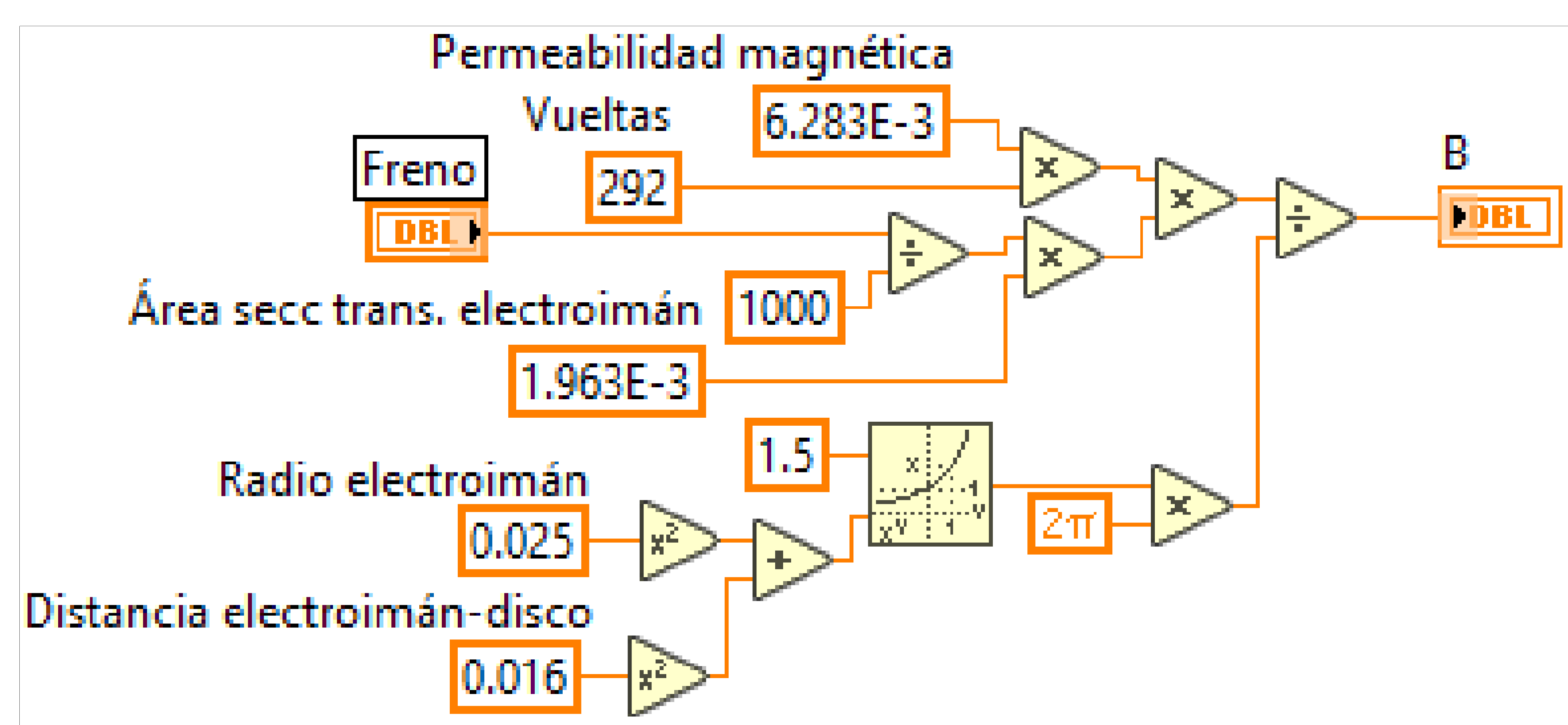


Figura 4.31. Modelo en LabVIEW del campo magnético generado por los electroimanes diseñados (Elaboración propia).

4.2.4. Cálculo del delta de velocidad generado por la fuerza electromagnética generada

El cambio de velocidad angular de los neumáticos debido a la fuerza electromagnética generada por los electroimanes se encuentra definida por la Ecuación 31 ($\omega = \omega_0 e^{-\frac{k}{I}t}$). Al igual que con el campo magnético generado por los electroimanes, se hace uso de los operadores matemáticos disponibles en LabVIEW (Figura 4.32).

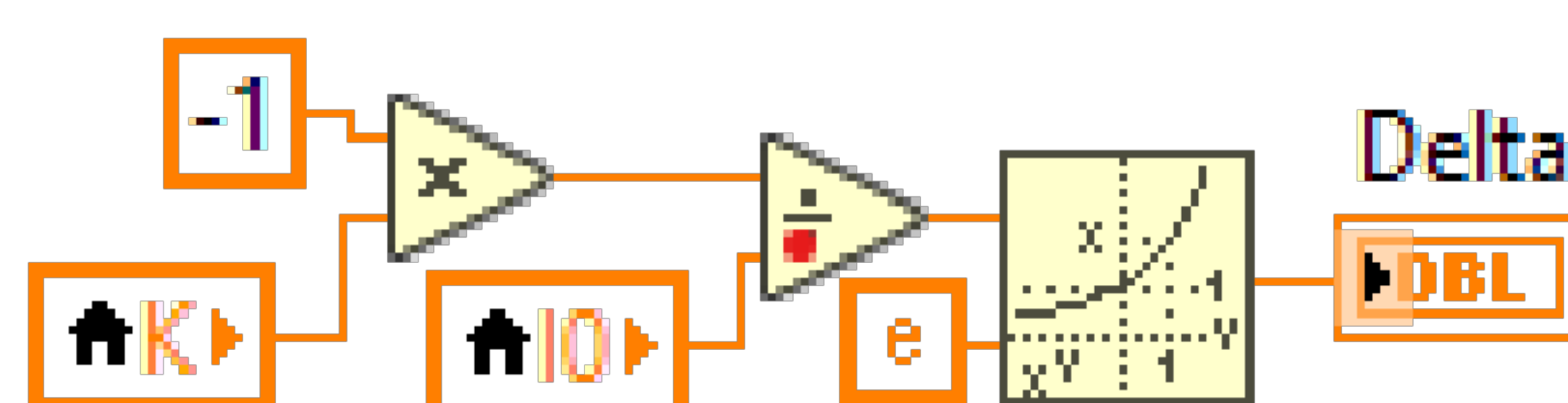


Figura 4.32. Modelo en LabVIEW de la velocidad angular final tras un lapso de tiempo t (Elaboración propia).

Las variables k e I presentes en la Ecuación 31, también se llevan al entorno de LabVIEW, quedando como se muestra en las Figuras 4.33 y 4.34.

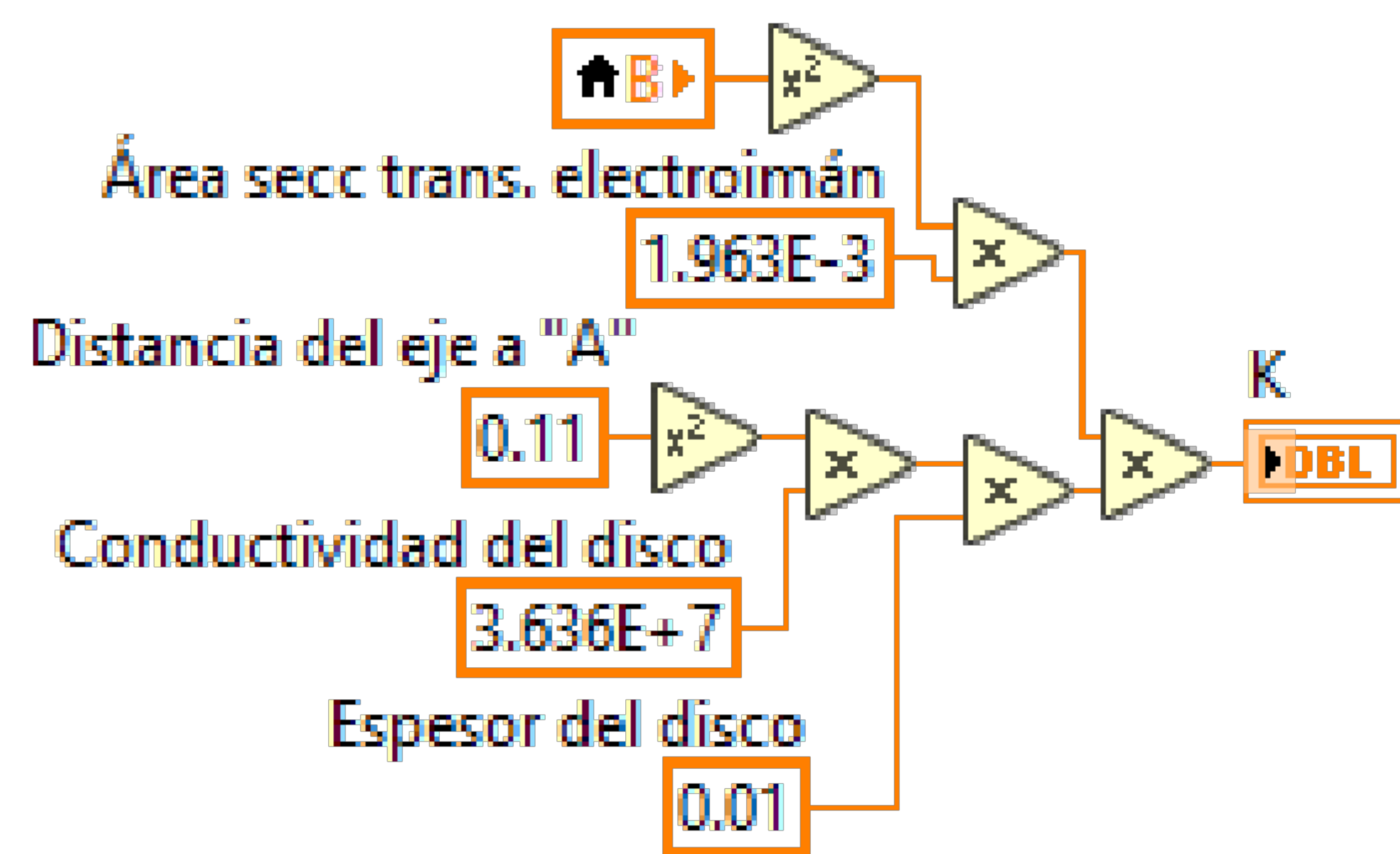


Figura 4.33. Modelado en LabVIEW de la variable k de la ecuación 22 (Elaboración propia).

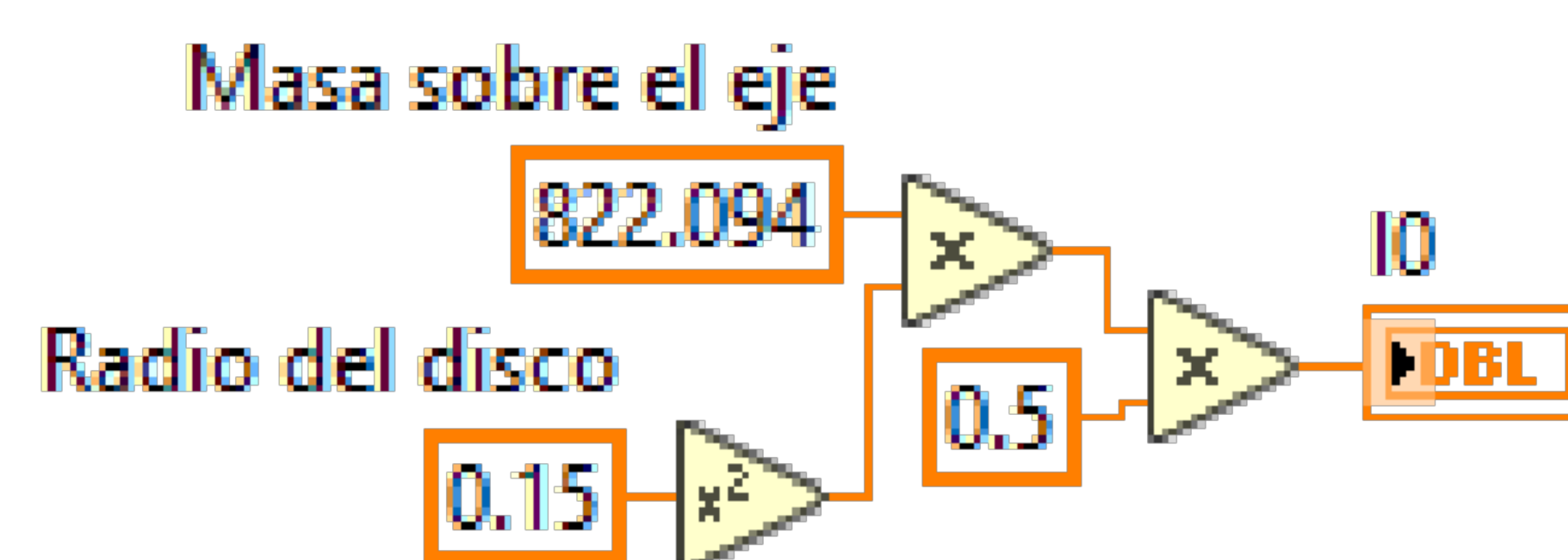


Figura 4.34. Modelado en LabVIEW de la variable IO (Inercia del disco de freno) (Elaboración propia).

Las variables y parámetros modelados y mostrados en las Figuras 4.31-4.34, sirven para realizar los cálculos básicos del fenómeno de frenado electromagnético. Para poder realizar la simulación del sistema diseñado es necesario hacer uso de distintas estructuras disponibles en LabVIEW. Las estructuras de que se utilizan para el modelar el sistema de frenos electromagnéticos son *While Loop*, *Case Structure* y *Flat Sequence* (Figura 4.35).

La estructura *Flat Sequence* es una estructura que consiste en uno o más subdiagramas (*frames*) que se ejecutan secuencialmente, asegurando que cada subdiagrama se ejecute antes o después de otro subdiagrama.

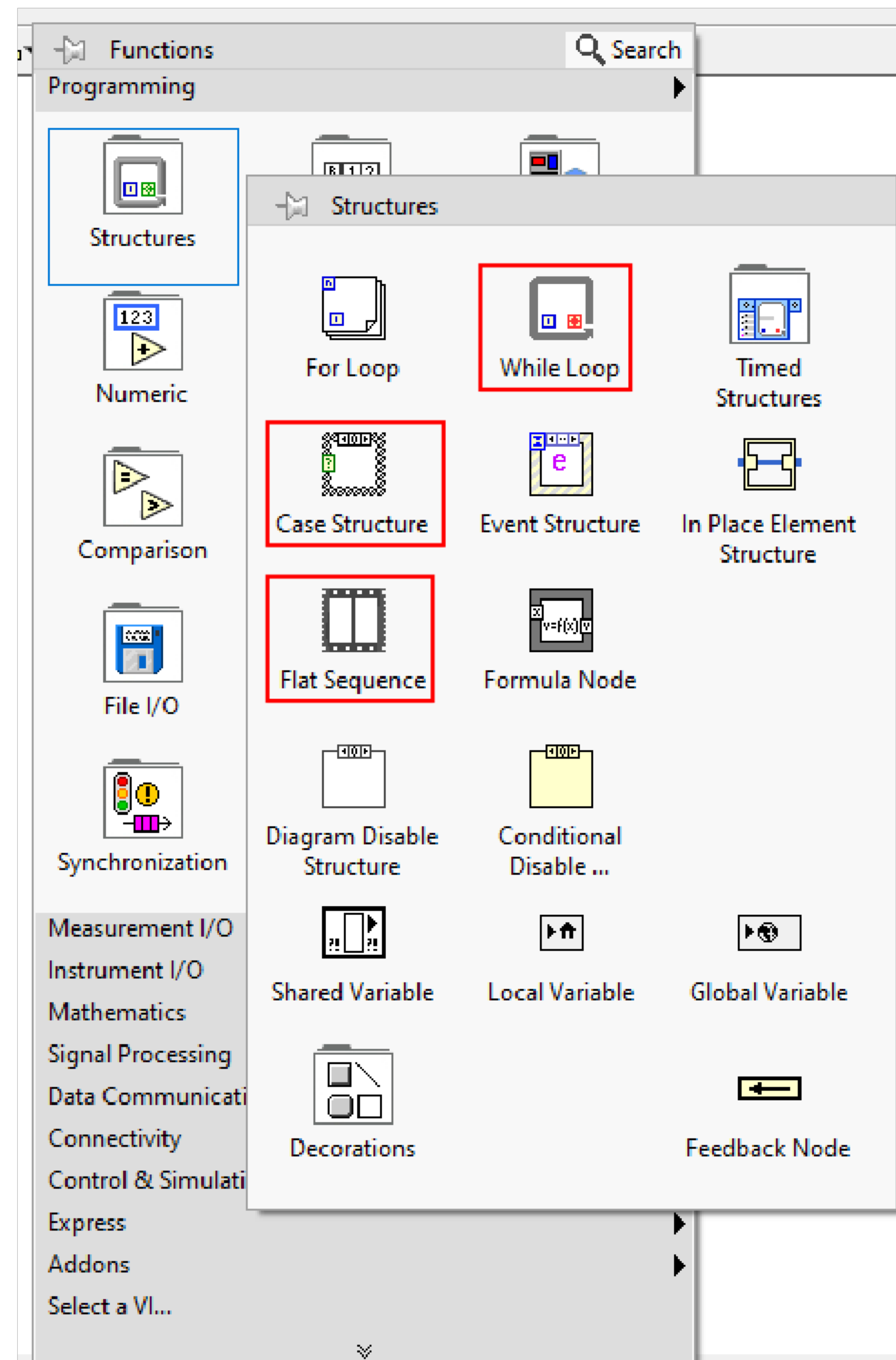


Figura 4.35. Estructuras de LabVIEW utilizadas en el modelado de un freno electromagnético (Elaboración propia).

En el modelado del presente proyecto, la estructura *Flat Sequence* se utiliza para facilitar las conexiones entre las distintas variables involucradas, logrando así, favorecer tanto la interpretación y la verificación del modelo como para asegurar el cálculo correcto de las distintas variables que intervienen en el proceso del frenado electromagnético (Ecuación 31); el utilizar variables locales y no contar con una secuencia definida para realizar los cálculos de dichas variables, el software podría realizar dichas estimaciones de forma tal que los resultados del modelo sean incorrectos. La programación de esta estructura y las variables involucradas se muestran en la Figura 4.36.

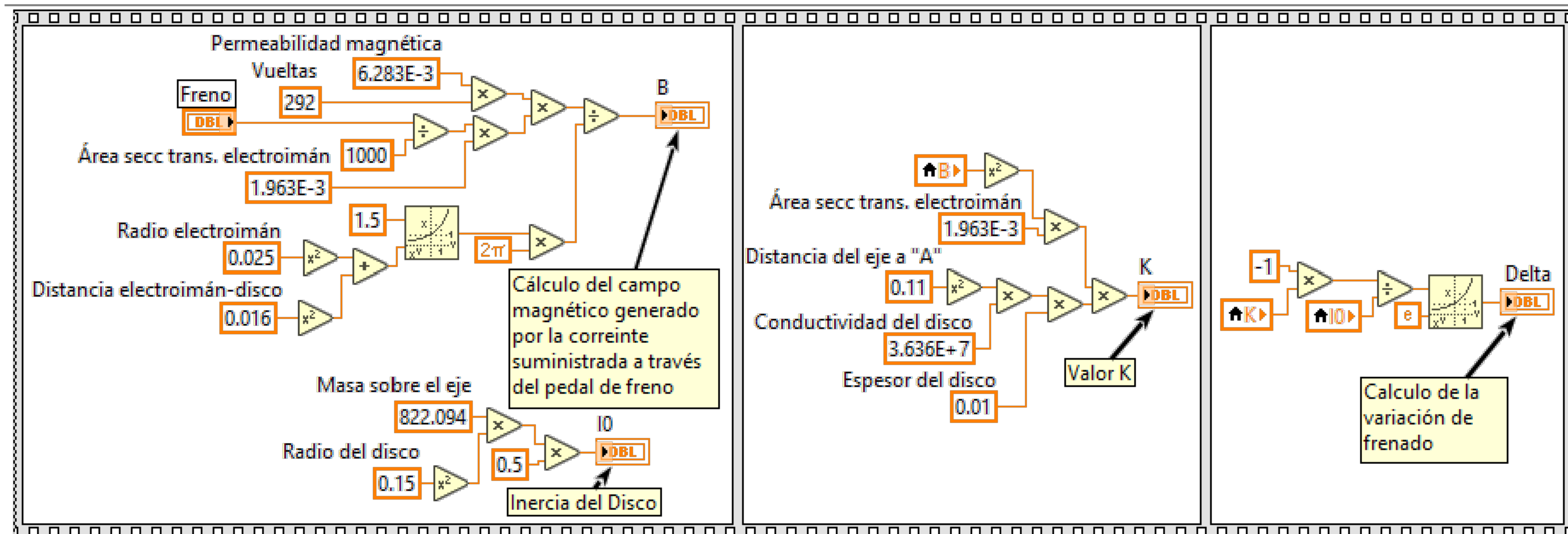


Figura 4.36. Flat Sequence de las variables de frenado involucradas en la Ecuación 31 (Elaboración propia).

La estructura *Case* es una estructura compuesta por dos subdiagramas o casos y permite la ejecución selectiva de solo un caso, según el valor de entrada especificado. Para el presente proyecto, esta estructura tiene distintas aplicaciones, entre las que se encuentran: a) el cálculo de aceleración del vehículo (Figura 4.37); b) el conteo del tiempo transcurrido desde la activación del freno hasta su desactivación o alto total del vehículo, según ocurra primero, (Figura 4.39) y c) el cálculo de la desaceleración del vehículo (Figura 4.38).

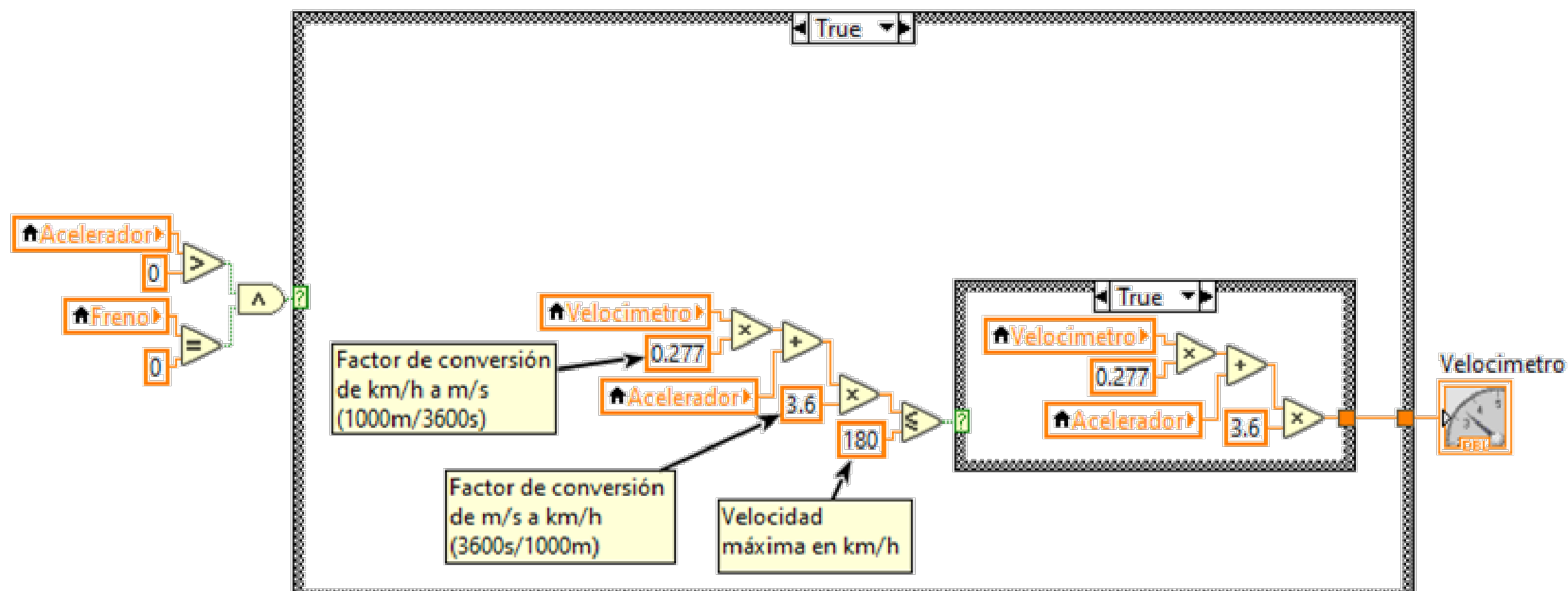


Figura 4.37. Case Structure verdadero para generar la aceleración de un vehículo (Elaboración propia).

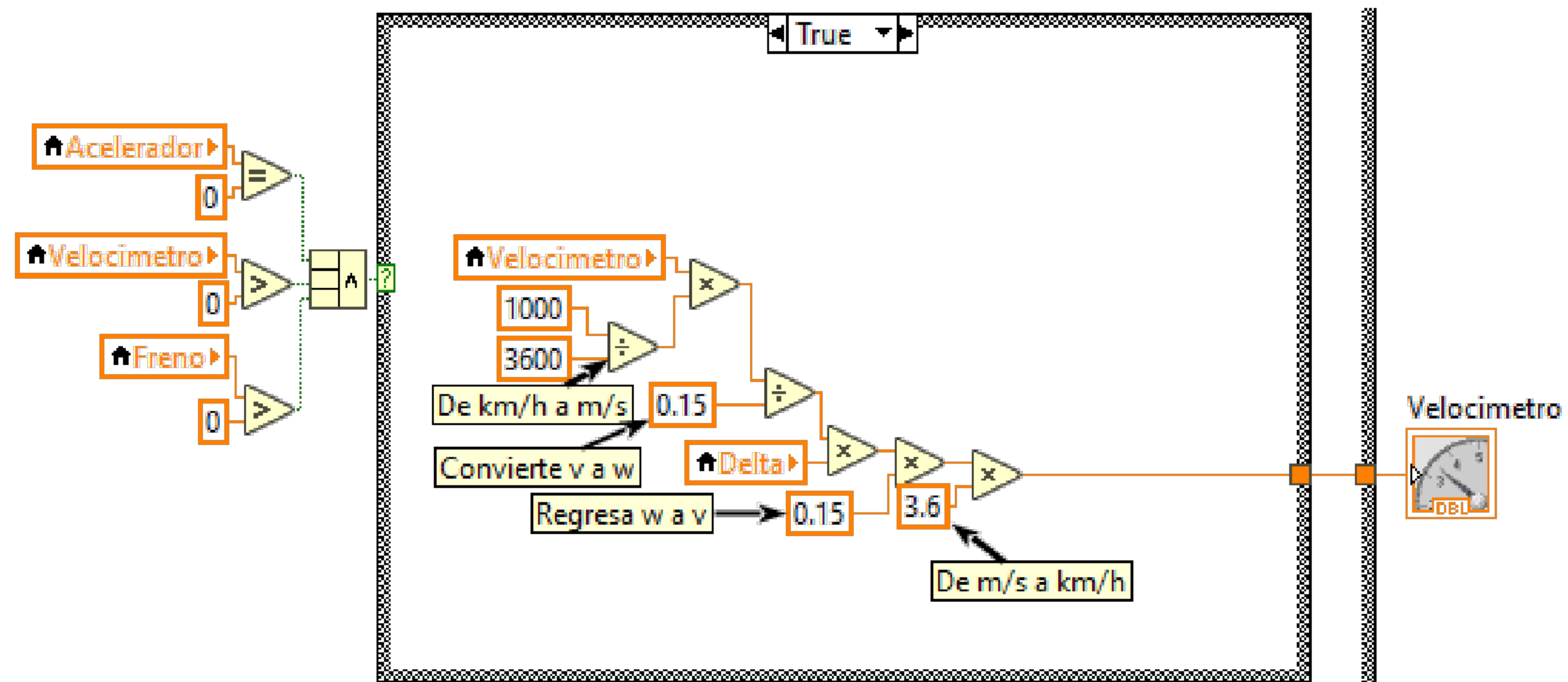


Figura 4.38. Case Structure verdadero para generar el frenado del vehículo (Elaboración propia).

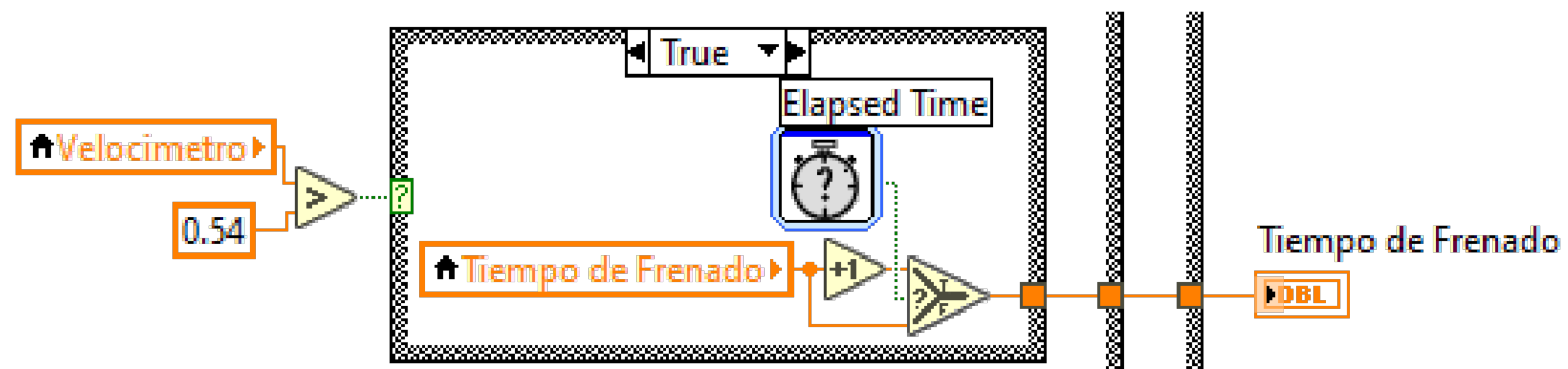


Figura 4.39. Case Structure verdadero para el conteo del tiempo de frenado (Elaboración propia).

La estructura *While Loop* es una estructura que permite la ejecución repetitiva de uno o más códigos y subcódigos que se encuentren dentro de él, hasta que ocurra cierta condición. En el caso del modelo que se está desarrollando, esta estructura se utiliza para que, tanto los efectos de aceleración como de desaceleración del vehículo, se ejecuten hasta que el usuario decida detener la simulación (Figura 4.40).

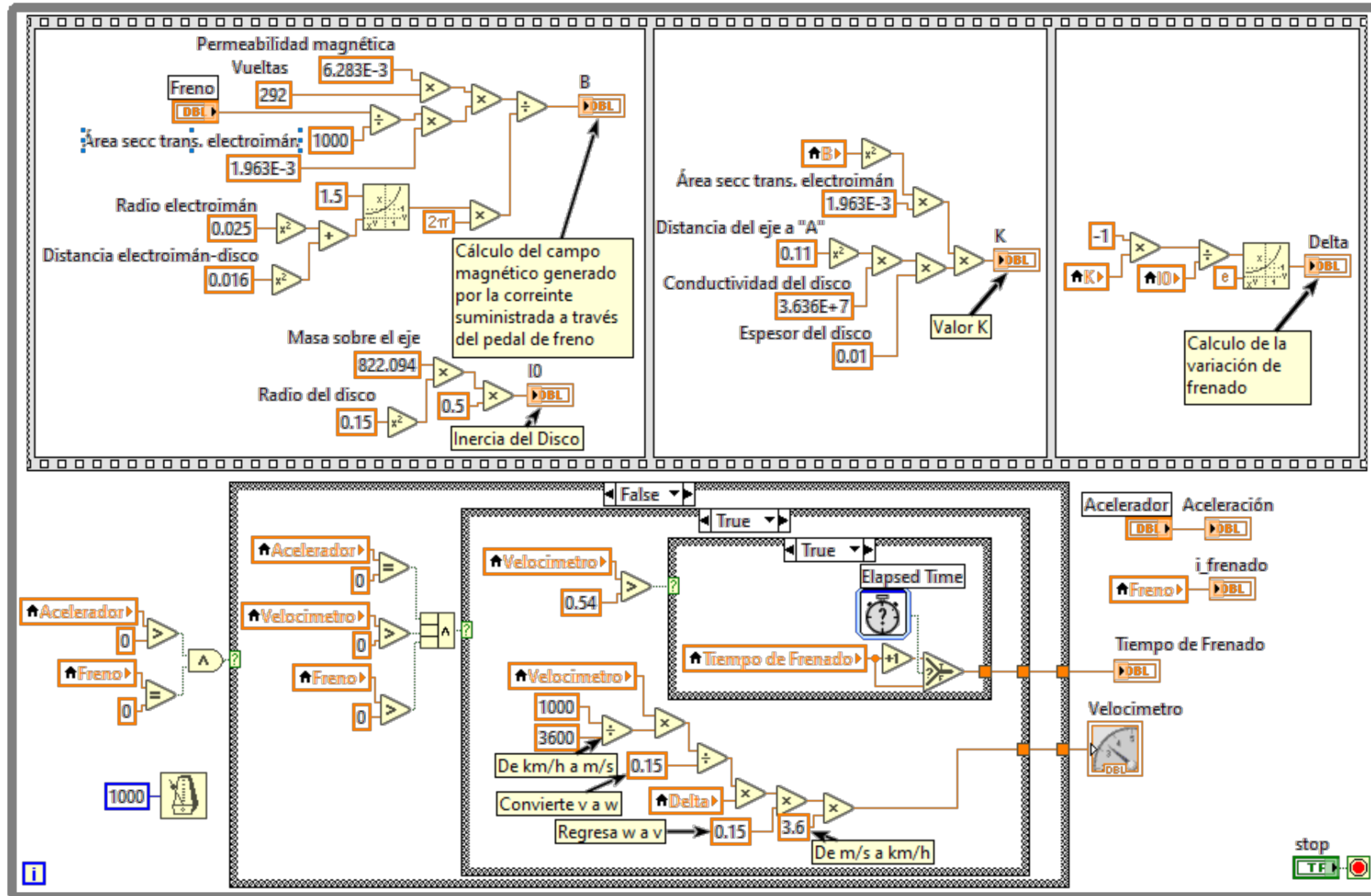


Figura 4.40. Código en LabVIEW para el modelado de un freno electromagnético (Elaboración propia).

4.3. Prueba de caja negra

La prueba de caja negra es una técnica con la cual se evalúa la funcionalidad del software bajo testeo. En esta prueba no se tiene conocimiento de la estructura del código interno y solo se pretende evaluar su funcionalidad. Usualmente se utiliza para detectar los siguientes errores: a) funciones incorrectas o no reconocidas, b) Errores de interfaz, y c) Errores de inicio y finalización de la ejecución.

En el caso del sistema de frenos electromagnéticos desarrollado en este proyecto, esta prueba consistió en asegurar la funcionalidad y apego del proceso de frenado y su tiempo a lo indicado por la Ecuación 31. En la Figura 4.43, se muestran los valores esperados de velocidades según el campo magnético generado por los electroimanes y el tiempo transcurrido desde la activación del freno. La Figura 4.41, muestra el estado inicial de cada una de las pruebas mostradas en las Figuras 4.42, 4.44 y 4.45, las cuales están enfocadas en los valores indicados en la Figura 4.43. Por otra parte, la Tabla 4.2, muestra la

distancia recorrida según el tiempo de frenado y el campo magnético generado por los electroimanes.



Figura 4.41. Estado inicial de la prueba $v=180\text{km/h}$; $\mathbf{B}=0$ (Elaboración propia).



Figura 4.42. Prueba 1. $\mathbf{B}=0.437\text{ T}$; $t=34\text{ seg}$ (Elaboración propia).

Frenado según B

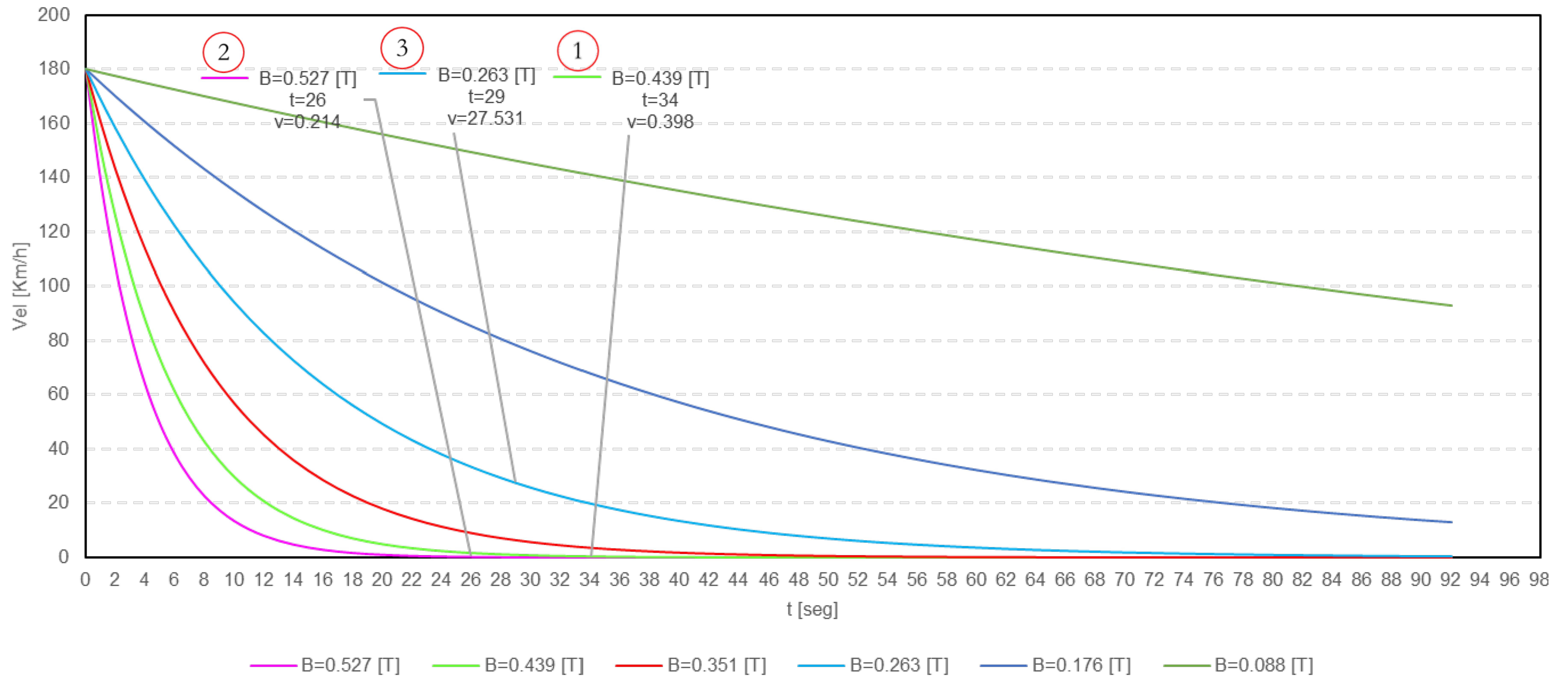


Figura 4.43. Velocidad según el tiempo y el campo magnético aplicado (Elaboración propia).

Tabla 4.2. Distancia recorrida según el tiempo de frenado y campo magnético aplicado (Elaboración propia).

t [seg]	Distancia Recorrida [km]					
	B=0.527 [T]	B=0.439 [T]	B=0.351 [T]	B=0.263 [T]	B=0.176 [T]	B=0.088 [T]
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.044	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050
2	0.078	0.084	0.089	0.094	0.097	0.099
3	0.104	0.116	0.127	0.136	0.144	0.148
4	0.125	0.143	0.160	0.176	0.189	0.197
5	0.140	0.165	0.190	0.214	0.233	0.246
6	0.152	0.184	0.217	0.249	0.276	0.294
7	0.162	0.199	0.240	0.281	0.317	0.341
8	0.169	0.212	0.261	0.312	0.357	0.389
9	0.174	0.223	0.280	0.341	0.396	0.436
10	0.179	0.232	0.297	0.368	0.434	0.482
11	0.182	0.240	0.312	0.393	0.471	0.529
12	0.184	0.246	0.325	0.417	0.507	0.575
13	0.186	0.251	0.337	0.439	0.542	0.621
14	0.188	0.256	0.348	0.460	0.576	0.666
15	0.189	0.259	0.357	0.480	0.609	0.711
16	0.190	0.262	0.366	0.498	0.641	0.756
17	0.191	0.265	0.373	0.515	0.672	0.800
18	0.191	0.267	0.380	0.531	0.702	0.844
19	0.192	0.269	0.386	0.547	0.732	0.888
20	0.192	0.270	0.391	0.561	0.760	0.931
21	0.192	0.272	0.396	0.574	0.788	0.975
22	0.192	0.273	0.400	0.586	0.815	1.017
23	0.193	0.274	0.404	0.598	0.841	1.060
24	0.193	0.274	0.407	0.609	0.867	1.102
25	0.193	0.275	0.410	0.619	0.891	1.144
26	0.193	0.275	0.413	0.629	0.915	1.186
27	0.193	0.276	0.415	0.638	0.939	1.227
28	0.193	0.276	0.417	0.646	0.961	1.268
29	0.193	0.276	0.419	0.654	0.983	1.309
30	0.193	0.277	0.421	0.662	1.005	1.349
31	0.193	0.277	0.422	0.668	1.025	1.389
32	0.193	0.277	0.423	0.675	1.046	1.429
33	0.193	0.277	0.425	0.681	1.065	1.469
34	0.193	0.277	0.426	0.687	1.084	1.508
35	0.193	0.277	0.427	0.692	1.103	1.547
36	0.193	0.278	0.427	0.697	1.121	1.586
37	0.193	0.278	0.428	0.702	1.138	1.624
38	0.193	0.278	0.429	0.706	1.155	1.662
39	0.193	0.278	0.430	0.710	1.172	1.700
40	0.193	0.278	0.430	0.714	1.188	1.738
41	0.193	0.278	0.431	0.718	1.204	1.775
42	0.193	0.278	0.431	0.721	1.219	1.812
43	0.193	0.278	0.431	0.725	1.233	1.849
44	0.193	0.278	0.432	0.728	1.248	1.886
45	0.193	0.278	0.432	0.730	1.262	1.922
46	0.193	0.278	0.432	0.733	1.275	1.958
47	0.193	0.278	0.432	0.735	1.288	1.994
48	0.193	0.278	0.433	0.738	1.301	2.029
49	0.193	0.278	0.433	0.740	1.313	2.065
50	0.193	0.278	0.433	0.742	1.325	2.100
51	0.193	0.278	0.433	0.744	1.337	2.135
52	0.193	0.278	0.433	0.746	1.348	2.169
53	0.193	0.278	0.433	0.747	1.359	2.203
54	0.193	0.278	0.434	0.749	1.370	2.237
55	0.193	0.278	0.434	0.750	1.381	2.271
56	0.193	0.278	0.434	0.752	1.391	2.305
57	0.193	0.278	0.434	0.753	1.401	2.338
58	0.193	0.278	0.434	0.754	1.410	2.371
59	0.193	0.278	0.434	0.755	1.419	2.404
60	0.193	0.278	0.434	0.756	1.428	2.436



Figura 4.44. Prueba 2. $B=0.526$ T; $t=26$ seg (Elaboración propia).



Figura 4.45. Prueba 3. $B=0.259$ T; $t=29$ seg (Elaboración propia).

A pesar de que los resultados obtenidos con el modelado en LabView son muy parecidos a los mostrados en la Tabla 4.1, es posible apreciar ciertas diferencias entre unas y otras, esto es debido a que durante el modelado no fue posible igualar las condiciones indicadas en la Tabla 4.1, sin embargo los resultados son aceptables pues la diferencia es mínima.

Capítulo 5. Conclusiones

Para la elaboración de la matriz de planeación fue necesario identificar todas aquellas características que debía cumplir el sistema a diseñar. Para ellos se realizaron consultas de diversos manuales, normas y artículos de investigación que permitieron identificar y describir las características y modo de funcionamiento de los distintos componentes que conforman tanto a un sistema de frenos convencionales como de uno electromagnético.

Aunque la información respecto a los sistemas de frenos electromagnéticos aplicada a vehículos automotrices no se encuentra muy desarrollada, fue posible realizar una comparación entre las partes, características y funcionamiento de los diversos componentes, lo cual permitió desarrollar la casa de la calidad.

A partir de la descripción del funcionamiento de las partes que componen al sistema de frenos electromagnéticos, fue posible definir los requerimientos de ingeniería del sistema, los cuales son la parte más importante de la matriz de despliegue de partes.

La casa de la calidad como la matriz de despliegue de partes, proporcionó información relevante para poder llevar a cabo el diseño del sistema de freno, sin embargo, era necesario entender el fenómeno físico y las variables involucradas en dicho fenómeno. Una vez hecho esto, se pudieron realizar los cálculos de cada una de estas variables (centro de gravedad del vehículo, fuerza de frenado, par de frenado, desaceleración y cálculo del electroimán, entre otras). A pesar de que el cálculo de todas estas variables fue complejo, la parte más difícil del proyecto se presentó al momento de plasmar cada una de estas variables en un modelo tridimensional, pues, además de las distintas variables físicas (electromagnéticas) involucradas, los cálculos realizados también se veían afectados tanto por limitantes dimensionales del vehículo como por la disposición y afectación que otros sistemas cercanos pudiesen tener al momento de encontrarse dentro de un campo electromagnético además de los estándares

dimensionales bajo los cuales se encuentran diseñados actualmente los vehículos. Una vez realizados los cálculos y definidos los parámetros de diseño del sistema de frenos electromagnéticos, fue posible plasmar los distintos componentes en un modelo 3D, y, con ello, realizar el ensamble del sistema completo, todo esto usando el software CAD SolidWorks.

Adicionalmente, los cálculos realizados en las secciones 2.4.1.6 a 2.4.3.10 hicieron posible obtener las distintas ecuaciones que influyen en el proceso de frenado, tales como el campo magnético (Ecuación 38), velocidad en un instante de tiempo t (Ecuación 31) y tiempo de parada (Ecuación 32), las cuales, fueron utilizadas para realizar el modelado en LabView del sistema desarrollado, además de las Ecuaciones 10 y 11 (distancia entre el centro de gravedad y ejes delantero y trasero respectivamente), Ecuación 16 (altura del centro de gravedad), Ecuación 26 (fuerza máxima de frenado), Ecuación 34 (distancia de parada), así como las Ecuaciones 43 y 44 (número de vueltas del electroimán delantero y trasero respectivamente), las cuales, a pesar de no verse reflejadas de manera directa en el modelo de LabView, fueron de gran importancia para el desarrollo del proyecto, principalmente para el modelado 3D de los componentes del sistema.

La validación del modelo de LabView se hizo a través de pruebas de caja negra, para lo cual fue necesario ejecutar el modelo desarrollado, al cual se introdujeron valores aleatorios de aceleración del vehículo hasta obtener un valor de velocidad aleatorio v , a partir del cual se dejó de acelerar el vehículo y se comenzó a ejercer una fuerza frenante aleatoria F suministrada por el pedal de freno, la cual se eliminó una vez transcurrido un tiempo t . En este punto se tomaron los distintos registros obtenidos de las velocidades finales y se compararon contra los valores numéricos resultantes de introducir los distintos valores de tiempo, velocidad inicial y campo magnético generado por los electroimanes al pisar el pedal de freno, obteniéndose de esta forma, resultados similares entre el modelo matemático y el modelo desarrollado en LabView.

Por otra parte, la implementación de un sistema de frenos electromagnéticos presenta una serie de circunstancias que afectan de manera negativa el efecto de frenado de un automóvil, lo cual implica poner en riesgo la seguridad del usuario y pasajeros, así como de peatones alrededor del vehículo, dentro de las principales desventajas de este sistema se pueden mencionar las siguientes:

- La potencia frenante es enteramente disipada en forma de calor, el cual se concentra por completo en el disco de freno.
- Su funcionamiento depende completamente de baterías. Su constante y demandante uso provocan un rápido desgaste de dichas baterías.
- La acción frenante está estrechamente ligada a la velocidad de rotación del disco de freno, es decir, a bajas velocidades de rotación el efecto de frenado se vuelve muy débil, por lo tanto, la baja velocidad de rotación del disco debe compensarse con un incremento en la corriente suministrada a los electroimanes.
- Alto costo de operación debido al consumo de dicha energía.
- El óptimo funcionamiento del sistema se va mermando con el paso del tiempo, ya que su constante uso provoca que la fuente de energía se agote o bien no sea suficiente para generar el campo magnético requerido por el usuario.
- Debido al magnetismo residual presente en los electroimanes, una fuerza frenante continuará presente aún después de soltar el pedal de freno.

Tomando en cuenta las ventajas y desventajas encontradas con el desarrollo del proyecto, se considera que la implementación de un sistema de frenos electromagnéticos no es recomendable como un sistema primario de frenado, ya que su constante y necesario consumo de energía eléctrica lo hace susceptible a inconsistencias al momento de su activación y/o uso.

Su comportamiento y funcionamiento se ve afectado por distintas condiciones que quedan fuera del alcance del conductor, es por ello que se considera que este tipo de sistema de frenos sea utilizado preferentemente como un sistema auxiliar (secundario) de frenado, que interactúe en conjunto con un sistema de frenado principal del tipo convencional. Esta interacción conjunta, permite potencializar el efecto del frenado y reduce el desgaste generado por los frenos de fricción, obteniendo de esta manera un mejor desempeño y un incremento en el tiempo de vida del sistema.

Referencias bibliográficas

- Abril, E. (2012). *Estudio del sistema de frenos ABS y EBS en tracto camiones MAN*. Tesis de licenciatura. Universidad del Auay.
- Ahumada, V., & Rojas Z., P. (2014). Frenos de motor y retardadores. Retrieved from MecanicoAutomotriz.org
- Álvarez, C., Marín, J., & González, J. (2007). Caracterización mecánica de un motor eléctrico de corriente alterna utilizando un freno de foucault. *Scientia et Technica*, 1(37), 187–192. Retrieved from <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4057/2215>
- Álvarez, M. (2014). Frenos: la historia. Retrieved May 4, 2017, from https://issuu.com/marian1088/docs/historia_de_los_frenos_en_la_indust
- Alzallú, J. (2016, July 25). Historia de los frenos en los coches. *Publicaciones Didácticas*, pp. 75–80.
- Arango, S., Sabogal, L., & Idárraga, J. (2013). *Freno electromagnético: Prototipo para experimentación*. Tesis de licenciatura. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Becerra, K. S., Cortés, L. F., & Hernández, J. M. (2016). *Sistema de cálculo de error en las máquinas despachadoras de gasolina mediante una aplicación móvil*. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
- Bonet, C. M., & Domingos, E. M. Fiabilidad de máquinas automorices e industriales (2012).
- Bosch. (1999). *Manual de la técnica del automovil*. (A. Cypra, A. Beer, & B. Hans, Eds.) (3ra ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté S.A. DOI: 9788429148060
- BREMBO. (2017). Mercado de Recambios. Retrieved from <http://www.brembo.com/es/automóviles/aftermarket>
- Condumex, G. ALAMBRE MAGNETO (2016). México: Cables Condumex.
- Criado Ocaña, E. (2012). *Diseño y cálculo del sistema de frenado para un prototipo formula student*. Tesis de licenciatura. Universidad Carlos III de Madrid.
- Cuesta Fernandez, F. L. (2009). *Análisis del fenómeno de la corrosión en materiales de uso técnico: Metales. Procedimientos de protección*.
- Cuevas, A. C., Pérez, J. G., Mayoral, E. F., & Mendoza, A. (2015). *Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales (2013)*. Sanfandila, Qro. Retrieved from <http://207.248.177.30/mir/uploadtests/32470.177.59.1.02> Anuario accidentes 2012.pdf

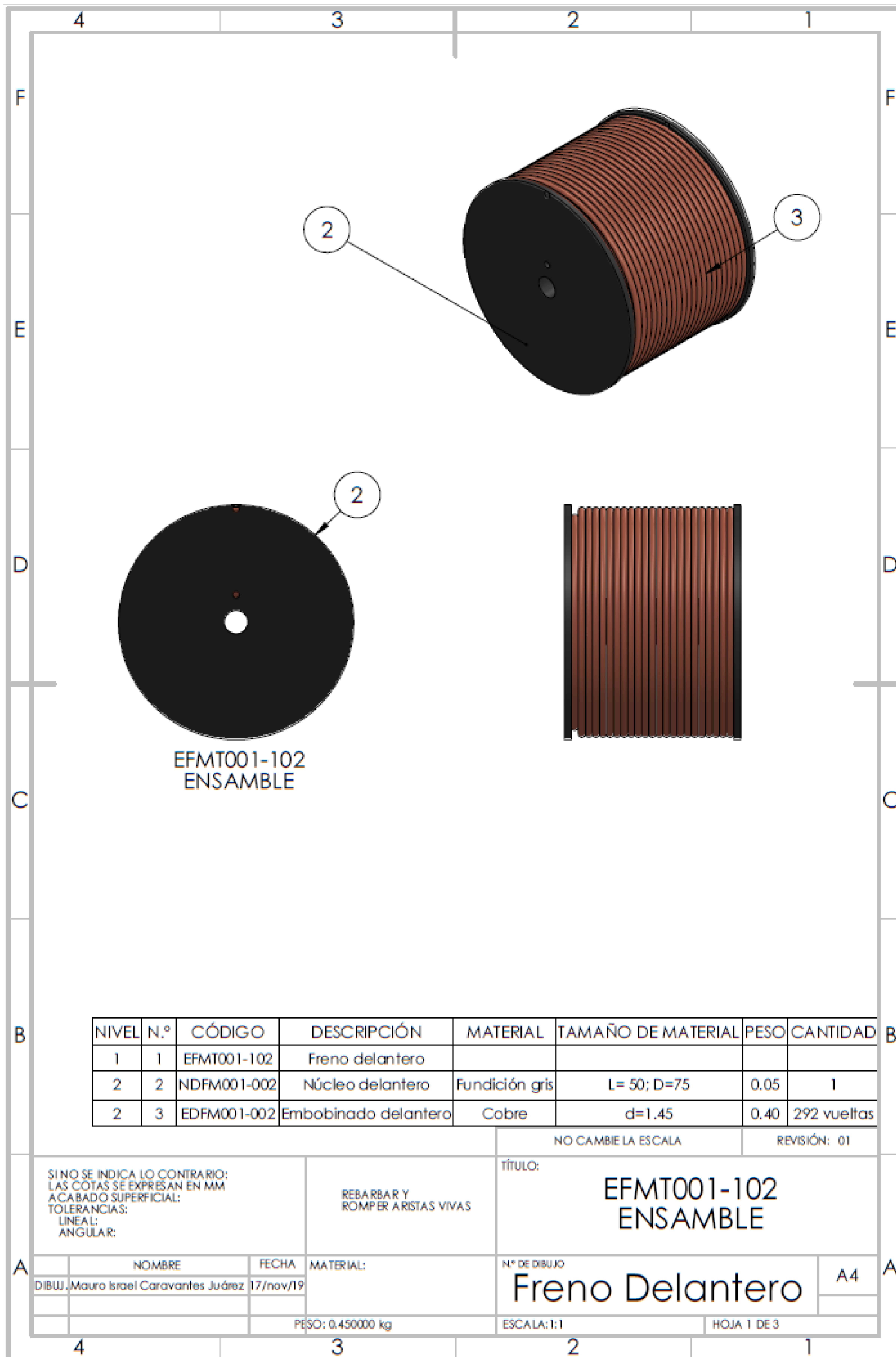
- Dominighi, C. (2001). Protección contra la corrosión. Retrieved February 24, 2018, from <https://educarenergetico.wordpress.com/?s=Dominighi>
- Flores, F., & Remache, A. (2014). *Reingeniería de los sistemas de dirección y de frenos del automóvil Land Rover Hard tipo del año 1981 para taller móvil de la escuela de ingeniería automotriz*. Tesis de licenciatura. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Halliday, D., Resnick, R., & Kenneth, K. (1999). *Física Volumen II* (4a ed.). Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- Hernández, J., & Rojas, A. (2012). Frenado de un disco metálico mediante el dipolo electromagnético. *Congreso Internacional Anual de La Somim*, 1123–1127.
- INEGI. (2015). Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/accidentes.asp?s=est&c=13159&proy=atus_accidentes
- International Standards Organization. ISO 611:2003 Road vehicles - Braking of automotive vehicles and their trailers — Vocabulary (2003).
- López, A. (2013). *Sistemas de Frenos*. Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/123770425/SISTEMA-DE-FRENOS-pdf>
- Muñoz Abella, M. B. (2003). *Mantenimiento Industrial*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Peña, F. (2012). Sistema de Frenos: Tipos de Frenos. Retrieved April 30, 2017, from <https://sites.google.com/site/sistemadefrenos29/home>
- Prensa del transporte y logística. (2015, June). Alta tecnología: Los frenos eléctricos de inducción. 315, 36. Retrieved from <http://www.telmausa.com/Downloads/PrensadelTransporte315.pdf>
- Quality Function Deployment tools and information for real life application. (2017). Retrieved April 3, 2017, from <http://www.qfdonline.com/templates/qfd-and-house-of-quality-templates>
- Rodríguez, M. Á. (2014). *Materiales y circuito magnéticos*. Universidad de Cantabria.
- Rodríguez, M. Á. (2017). *Magnetostática en el vacío: Materiales magnéticos*. España.
- Saavedra, Á. (2016). *Elaboración de un manual del sistema de frenos abs y su aplicación en el proceso de enseñanza aprendizaje de los estudiantes del segundo año de bachillerato de la unidad educativa "chunchi" en el año 2016*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Chimborazo.

- Telma. (2015). *Manual de Mantenimiento Telma* (Vol. 7714). Retrieved from <https://www.telmausa.com/technical-support/maintenance>
- Tiempo, E. (2007). Manual de conductores: Distancia, reacción y frenado (novena parte). Retrieved January 20, 2018, from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3552835>
- UNILAB, L. (1992). *Freno electromagnético DL 1019M*. Italia.
- Vallejo, J. C. (2006). *Conocimiento y prevención de la corrosión*. Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos Guatemala.
- Villanueva, P., Martínez, P., & Pérez, A. (2008, July). Proceso de diseño de un servofreno electromagnético con función ABS: gestión del conocimiento de la empresa.
- WABCO. (2011). *Anti-Lock Braking System (ABS) and Anti-Slip Regulation (ASR)* (2nd ed.). (WABCO, Ed.). Wabco.

Anexo A: Listado de planos

A continuación, se presentan los siguientes planos:

- Freno Delantero (Ensamble):
 - Núcleo Delantero (pieza).
 - Embobinado Delantero (pieza).
- Freno Trasero (Ensamble):
 - Núcleo Trasero (pieza).
 - Embobinado Trasero (pieza).
- Disco de Freno Delantero (pieza).
- Disco de Freno Trasero (pieza).



EFMT001-102
ENSAMBLE

NIVEL	N.º	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	TAMAÑO DE MATERIAL	PESO	CANTIDAD
1	1	EFMT001-102	Freno delantero				
2	2	NDFM001-002	Núcleo delantero	Fundición gris	L= 50; D=75	0.05	1
2	3	EDFM001-002	Embobinado delantero	Cobre	d=1.45	0.40	292 vueltas

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN: 01

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS VIVAS

TÍTULO:

EFMT001-102
ENSAMBLE

A

NOMBRE

FECHA

MATERIAL:

Nº DE DIBUJO

DIBUJ. Mauro Israel Caravantes Juárez 17/nov/19

Freno Delantero

A4

A

PESO: 0.450000 kg

ESCALA: 1:1

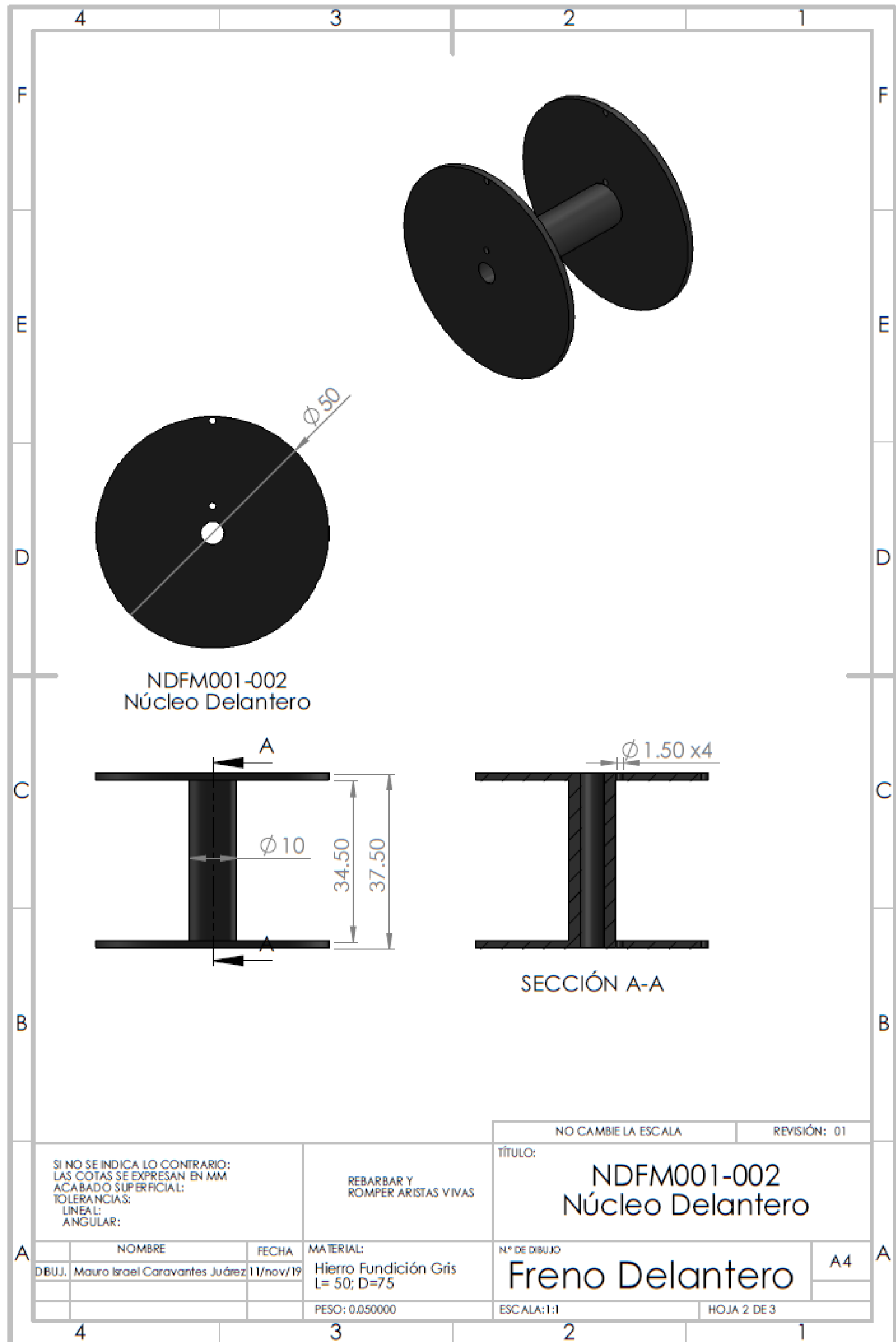
HOJA 1 DE 3

4

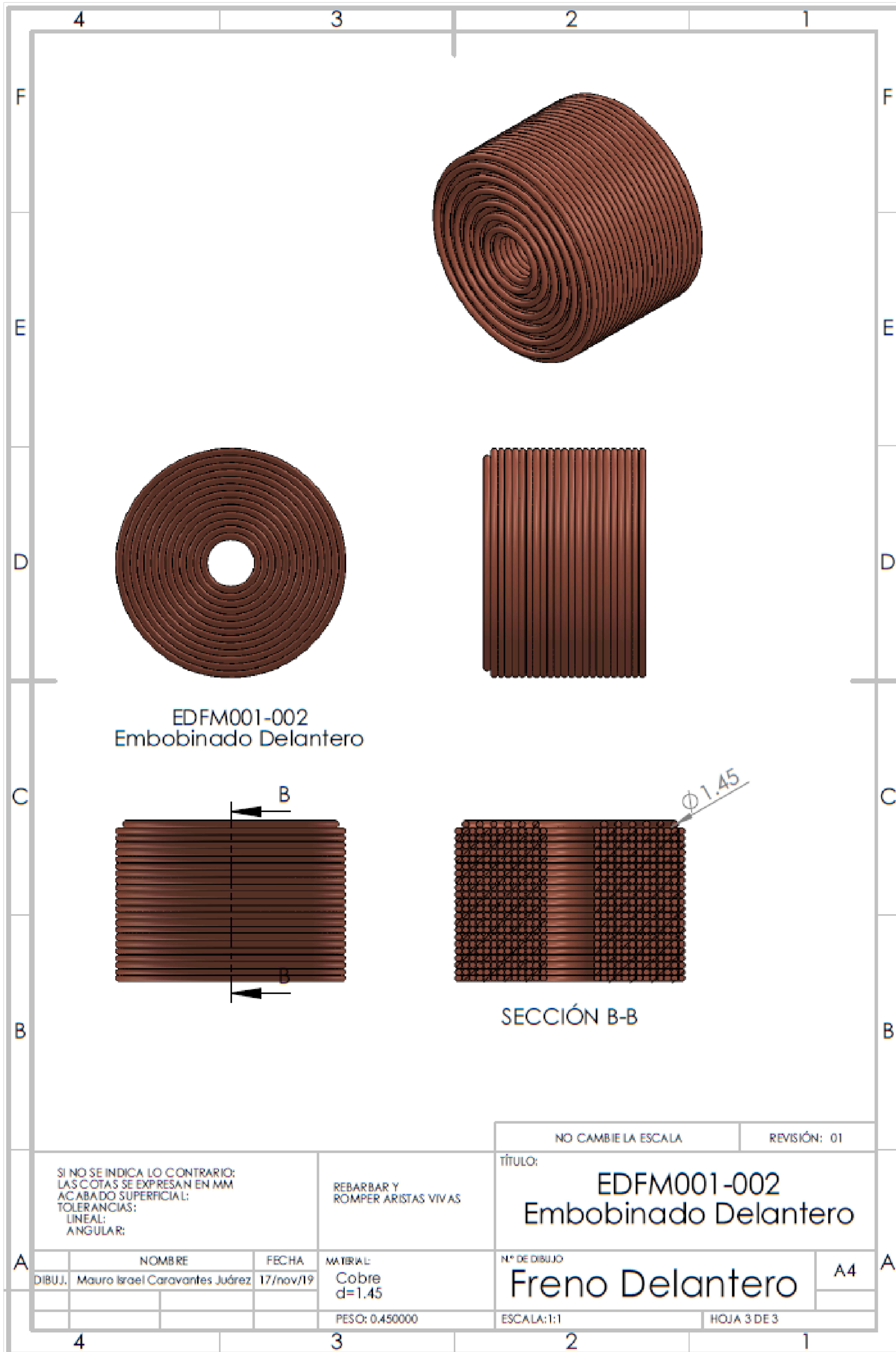
3

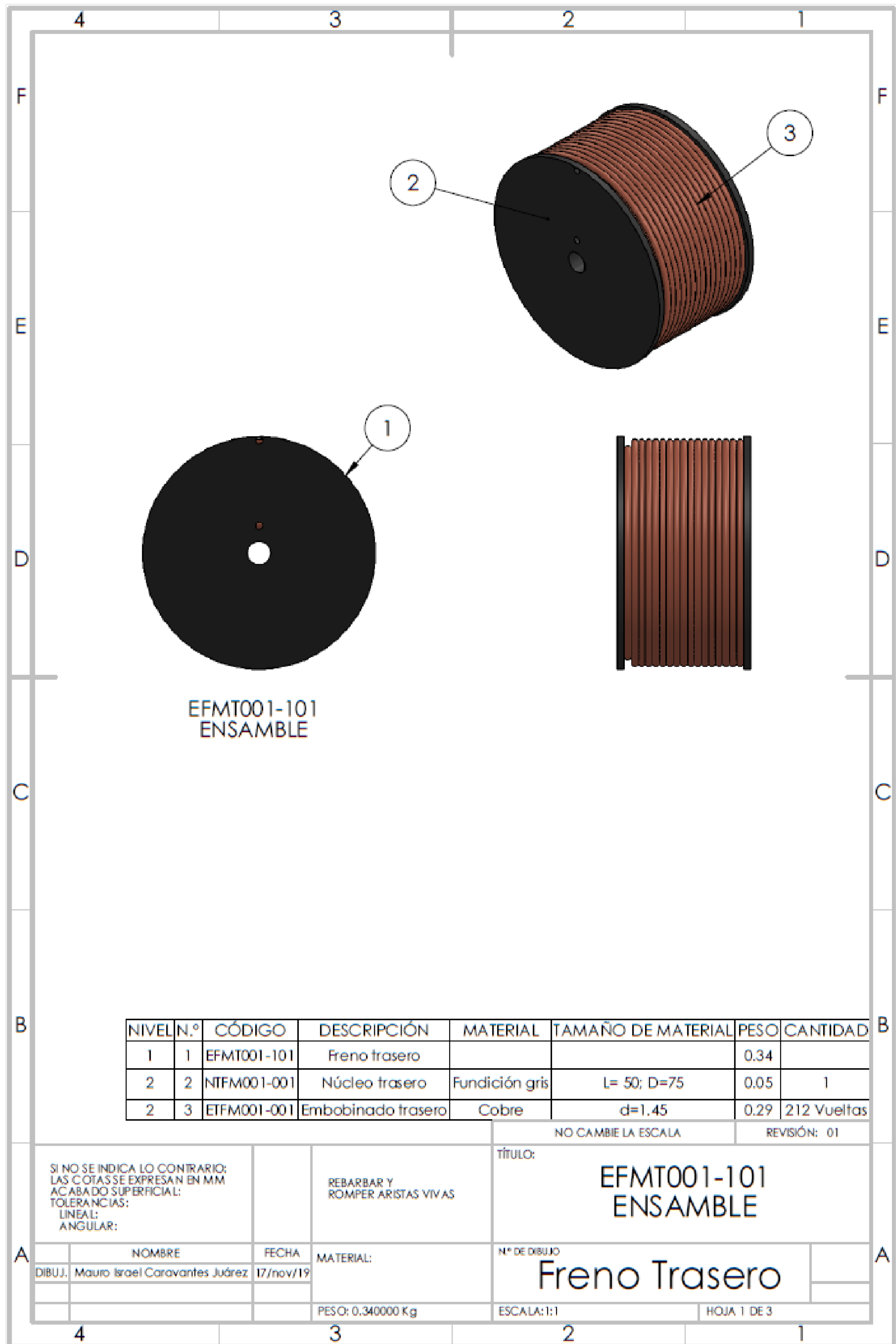
2

1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN: 01	
				TÍTULO: <h2 style="margin: 0;">NDFM001-002 Núcleo Delantero</h2>	
NOMBRE DBUJ. Mauro Israel Caravantes Juárez	FECHA 11/nov/19	MATERIAL: Hierro Fundición Gris L= 50; D=75	N° DE DIBUJO <h1 style="margin: 0;">Freno Delantero</h1>		A4
			ESCALA: 1:1 HOJA 2 DE 3		
PESO: 0.050000					





EFMT001-101
ENSAMBLE

NIVEL	N.º	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	TAMAÑO DE MATERIAL	PESO	CANTIDAD
1	1	EFMT001-101	Freno trasero			0.34	
2	2	NTFM001-001	Núcleo trasero	Fundición gris	L= 50; D=75	0.05	1
2	3	ETFM001-001	Embobinado trasero	Cobre	d=1.45	0.29	212 Vueltas

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN: 01

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO;
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABA DO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS VIVAS

TÍTULO:

EFMT001-101
ENSAMBLE

A

NOMBRE

FECHA

MATERIAL:

Nº DE DIBUJO

DIBUJ. Mauro Israel Caravantes Juárez

17/nov/19

Freno Trasero

A

PESO: 0.340000 Kg

ESCALA: 1:1

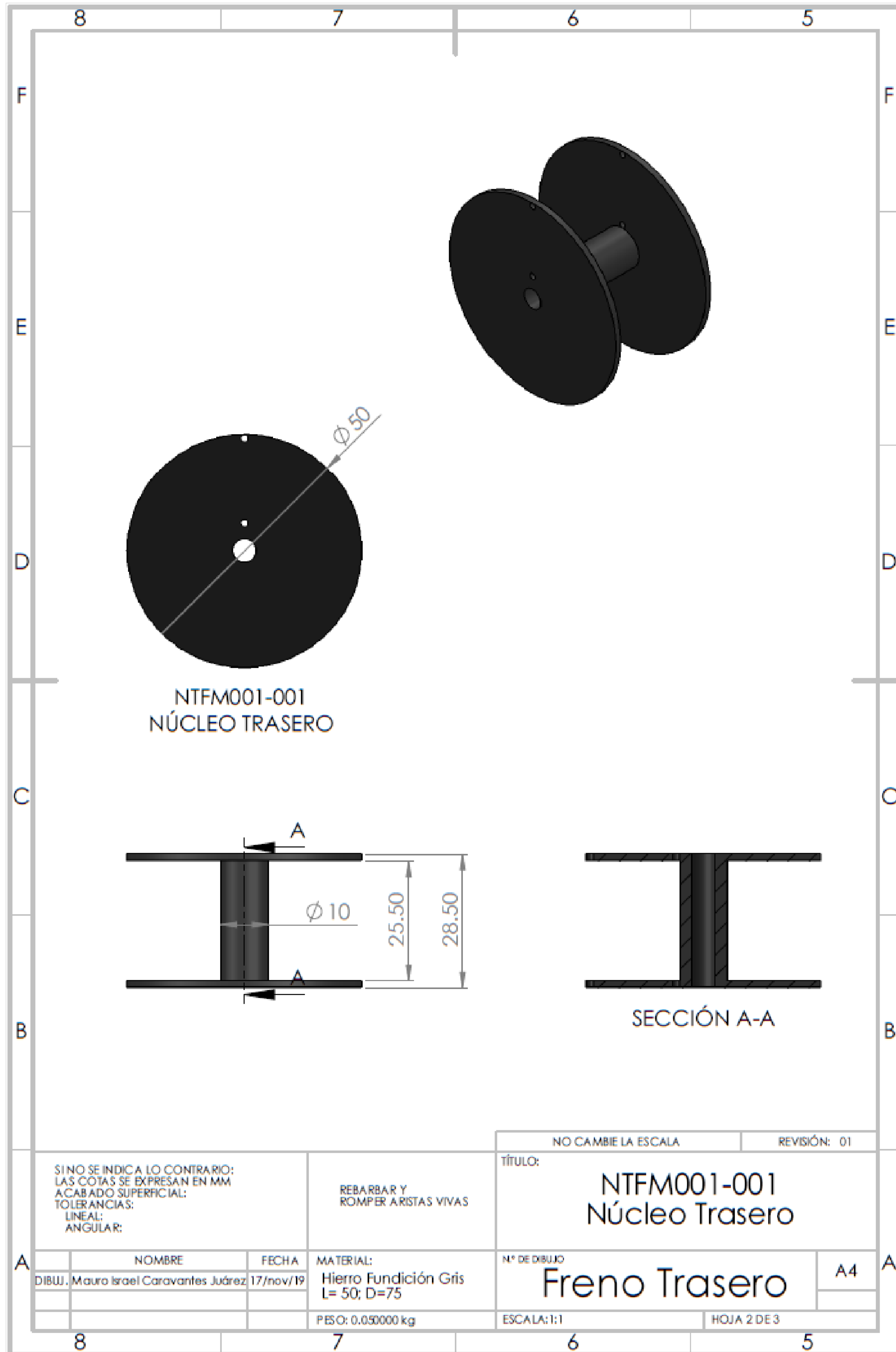
HOJA 1 DE 3

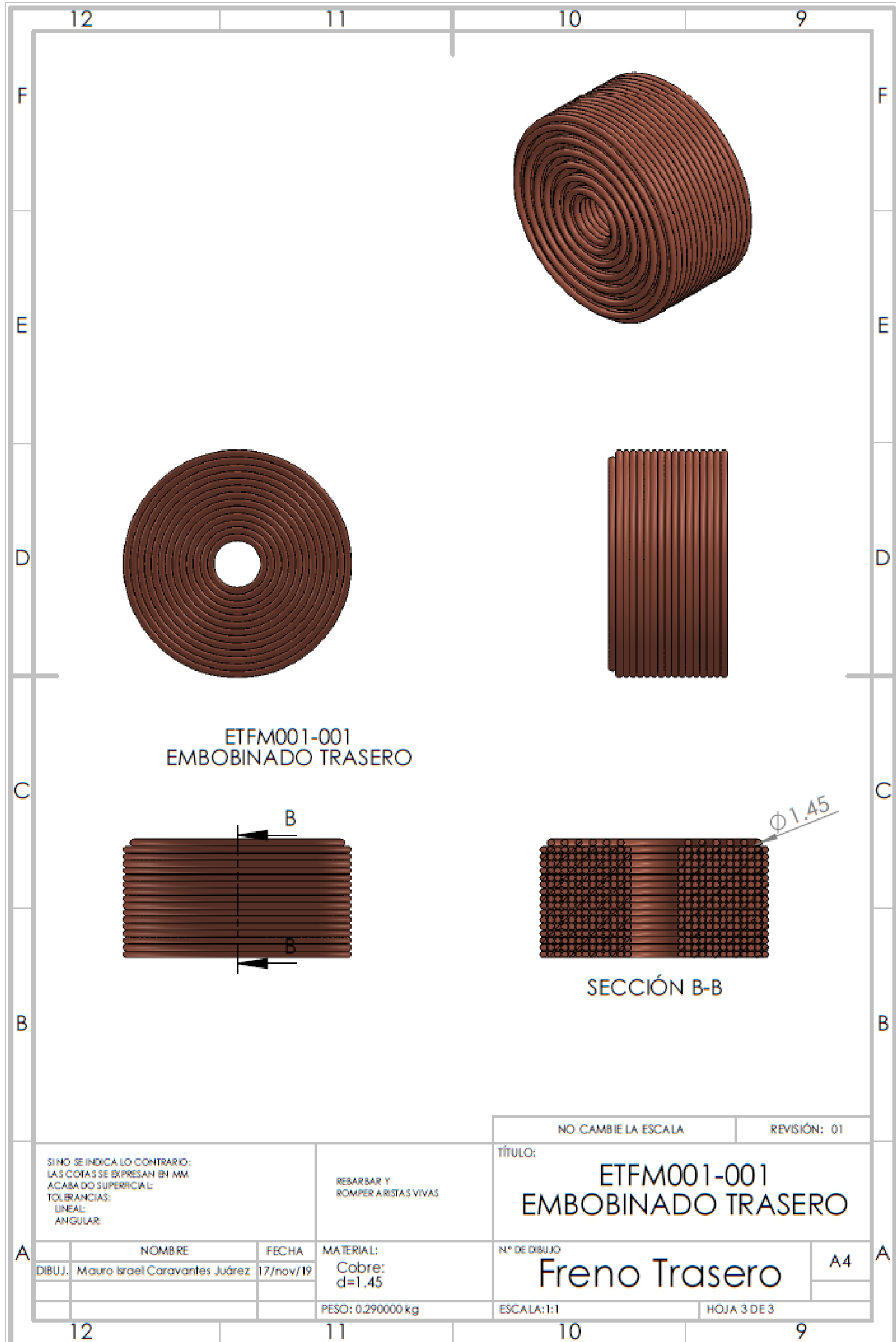
4

3

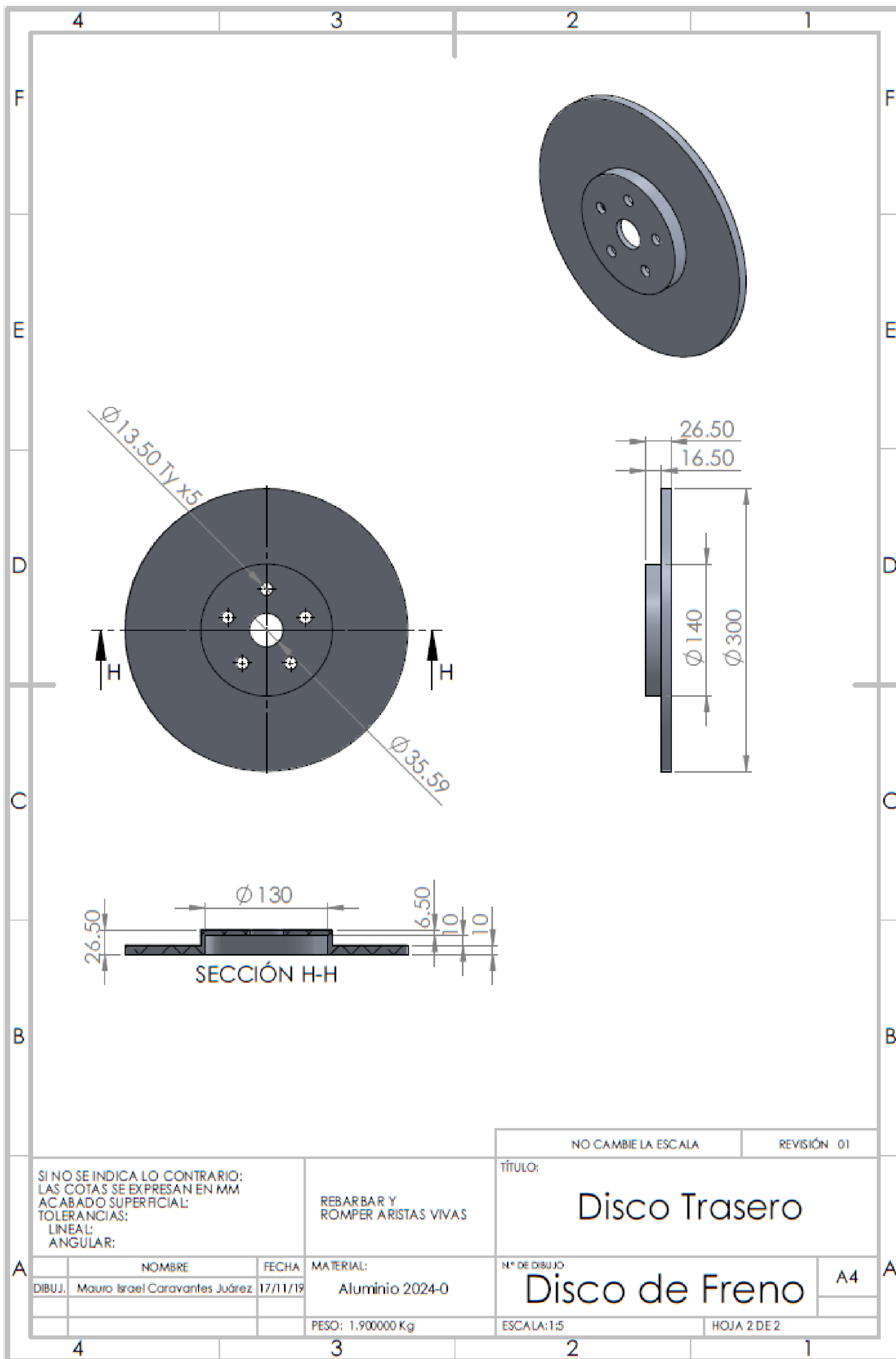
2

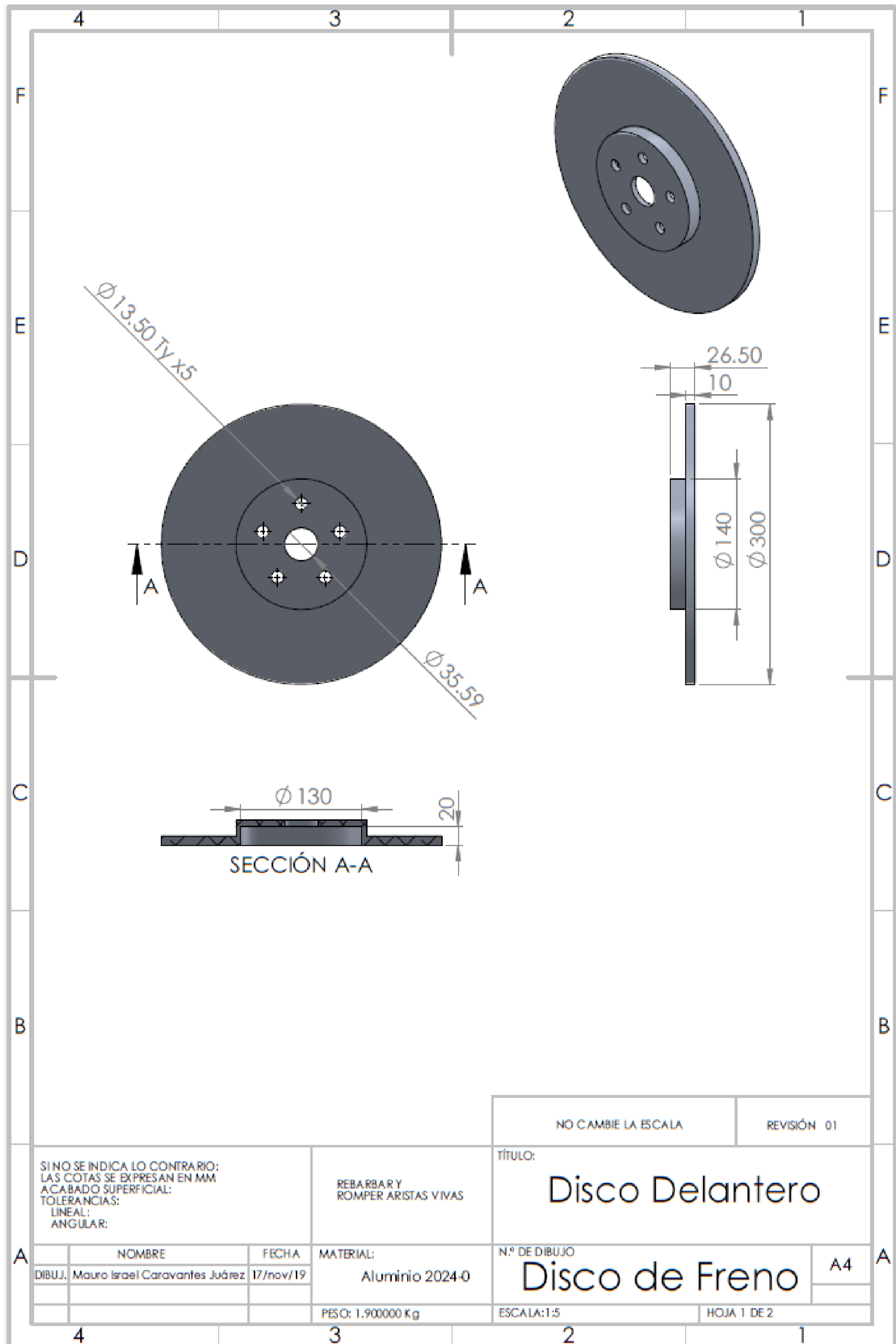
1





SINÓ SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN: 01
TÍTULO: ETFM001-001 EMBOBINADO TRASERO		N° DE DIBUJO Freno Trasero		
DIBUJ. Mauro Israel Caravantes Juárez	NOMBRE Mauro Israel Caravantes Juárez	FECHA 17/nov/19	MATERIAL: Cobre: d=1.45	A4
		PESO: 0.290000 kg	ESCALA: 1:1	HOJA 3 DE 3





NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN 01

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

TÍTULO:
Disco Delantero

NOMBRE	FECHA	MATERIAL:
DIBUJ. Mauro Israel Caravantes Juárez	17/nov/19	Aluminio 2024-0

PESO: 1.90000 Kg

N.º DE DIBUJO
Disco de Freno A4
 ESCALA: 1:5 HOJA 1 DE 2

