

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica
2016-2017

Trabajo Fin de Grado

“Metodología para el diseño de envolventes de volantes de inercia”

Pablo Ángel Prieto Díaz

Tutor

D. Juan Carlos García Prada

Octubre 2017



Resumen

Actualmente, se está viviendo un auge de la tecnología de acumulación de energía. Durante las últimas décadas se está investigando y optimizando los diferentes sistemas de almacenamiento, por los beneficios que suponen. Entre estos sistemas se encuentran los volantes de inercia, usados en múltiples aplicaciones, desde el sector energético hasta la industria del transporte. Para optimizar su rendimiento, es conveniente diseñar los componentes adicionales del volante, y no solo el propio volante de inercia.

En este trabajo se propone una metodología para el diseño de envolventes de volantes de inercia, con el objetivo de minimizar las pérdidas aerodinámicas del volante. Para ello, se diseñan la carcasa protectora que lo envuelve y el fluido que queda entre ambos. Los diseños se hacen teniendo en cuenta los movimientos y deformaciones de la estructura en su funcionamiento, de tal manera que el volumen que ocupa el fluido se minimiza. Finalmente, se estudia el fluido para determinar el punto de funcionamiento óptimo y diseñar la presión a la que debe operar.

Abstract

Nowadays, there has been a rise of energy storage technology. For the last decades, different storages systems are being investigated and optimized, because of the benefits they have. Among these systems, there are the flywheels, which are used in numerous applications, from energy industry to transport industry. To optimize their efficiency, it's appropriate to design the additional components of the flywheels, and not just the flywheels themselves.

In this present work, a methodology for the design of flywheels is proposed, with the aim of minimizing the aerodynamic drag. This requires designing the containment that covers it and the fluid that is between them. The designs are made considering the movements and deformations of the working structure, so the volume which is occupied by the fluid is minimum. Finally, to determinate the optimum operating point and the pressure in which it must operate, the fluid is studied.

Índice

| | |
|--|------------|
| Resumen..... | iii |
| Abstract | v |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Objetivos. | 3 |
| 1.2. Organización y planificación..... | 3 |
| 2. Introducción a los volantes de inercia | 5 |
| 2.1. Evolución histórica. | 5 |
| 2.2. Descripción..... | 5 |
| 2.2.1. Partes de los volantes de inercia. | 6 |
| 2.2.2. Tipos de volantes de inercia. | 8 |
| 2.3. Últimas aplicaciones. | 9 |
| 3. Metodología propuesta | 11 |
| 4. Características de los volantes a calcular | 15 |
| 4.1. Materiales y sus propiedades..... | 16 |
| 4.2. Volante de inercia teórico. | 17 |
| 4.3. Acumulador de energía de alta capacidad..... | 18 |
| 4.4. Recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 20 |
| 5. Diseño de la superficie interior de la carcasa | 25 |
| 5.1. Estudio del movimiento de los volantes de inercia. | 25 |
| 5.1.1. Estudio de tracción de los volantes..... | 25 |
| 5.1.2. Estudio de deformación térmica. | 29 |
| 5.1.3. Perfil total de deformación. | 32 |
| 5.2. Estudio de vibraciones. | 35 |
| 5.2.1. Análisis modal. | 35 |
| 5.2.2. Deformación causada por vibraciones. | 37 |
| 5.2.3. Posibles soluciones. | 39 |
| 5.3. Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora..... | 39 |

| | |
|---|------------|
| 6. Análisis estructural de la carcasa protectora | 45 |
| 6.1. Determinación de las características de la carcasa protectora..... | 45 |
| 6.1.1. Espesor y material..... | 45 |
| 6.1.2. Corrección de la superficie interior. | 52 |
| 6.2. Estudio de vibraciones. | 56 |
| 7. Análisis de fluidos de la envolvente | 57 |
| 7.1. Estudio del fluido. Turbulencia. | 57 |
| 7.1.1. Número de Mach. | 59 |
| 7.1.2. Flujo turbulento. Reynolds. | 60 |
| 7.1.3. Flujo de Couette. Número de Taylor y vórtices de Taylor. | 63 |
| 7.1.4. Otros fenómenos que causan turbulencia..... | 66 |
| 7.1.5. Determinación de presión crítica. | 67 |
| 7.2. Resistencia aerodinámica. Fuerzas de arrastre. | 68 |
| 7.3. Determinación de la presión óptima. | 71 |
| 7.4. Estudio de transferencia de calor por radiación. | 74 |
| 8. Propuestas de mejora de diseño | 77 |
| 8.1. Sistema de seguridad adicional. | 77 |
| 8.2. Encerrar en el espacio fluido de baja densidad. | 78 |
| 8.3. Bomba de vacío mono-eje / eje libre. | 80 |
| 9. Marco regulador | 81 |
| 9.1. Normativa aplicable..... | 81 |
| 9.2. Herramientas utilizadas..... | 82 |
| 9.3. Trabajos similares..... | 83 |
| 10. Entorno socioeconómico | 85 |
| 10.1. Presupuesto de la elaboración del Trabajo de Fin de Grado..... | 85 |
| 10.2. Impacto socioeconómico..... | 86 |
| 11. Conclusiones y trabajos futuros | 87 |
| 11.1. Conclusiones. | 87 |
| 11.2. Trabajos futuros..... | 88 |
| Bibliografía | 89 |
| Anexo A. Código MATLAB | 95 |
| Anexo B. Planos de los volantes de inercia | 103 |
| Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia..... | 107 |
| Anexo D. Resultados de las simulaciones de las carcasas protectoras..... | 125 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Gráfico de la capacidad de suministro y producción de energía eólica y fotovoltaica. | 1 |
| Figura 2: Comparación de almacenadores de energía enfrentando la energía almacenada a la potencia de cada tecnología (2). “Low speed flywheels” son los volantes de inercia lentos y “High speed flywheels” son los volantes de inercia rápidos. | 2 |
| Figura 3: Volante de inercia (6). | 6 |
| Figura 4: Componentes básicos de un volante de inercia moderno (4). | 7 |
| Figura 5: Volante de inercia que acumula la masa en el exterior de su contorno (8). . | 8 |
| Figura 6: Esquema de la propuesta de solución. | 11 |
| Figura 7: Esquema de la propuesta de optimización de la bomba de vacío. | 11 |
| Figura 8: Gráfico esquemático de la determinación del punto de diseño. | 12 |
| Figura 9: Metodología propuesta esquematizada. | 13 |
| Figura 10: Volante de inercia teórico. | 17 |
| Figura 11: Esquema del volante de inercia de Lanzarote (19). | 19 |
| Figura 12: Acumulador de energía de alta capacidad. | 20 |
| Figura 13: Detalle de los componentes del volante de inercia Flywheel KERS de Volvo (26). | 21 |
| Figura 14: Recuperador de frenada en vehículos híbridos. | 22 |
| Figura 15: Volante de material compuesto sujetado por brazos (23). | 22 |
| Figura 16: Distribución de tensiones en un eje macizo rotando (28). | 26 |
| Figura 17: Deformación total del volante de inercia teórico por efecto de la tracción. | 27 |
| Figura 18: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico por efecto de la tracción. | 27 |
| Figura 19: Esquema del perfil de puntos para el volante de inercia teórico. | 29 |
| Figura 20: Deformación total del volante de inercia teórico por efecto de la temperatura. | 31 |
| Figura 21: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico por efecto de la temperatura. | 31 |
| Figura 22: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico rotando a temperatura de 40°C. | 34 |
| Figura 23: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico rotando a temperatura de 19,5°C. | 35 |
| Figura 24: Tres primeros modos de vibración del volante de inercia teórico. | 36 |
| Figura 25: Gráfica de la deformación en función de la frecuencia de giro. Rango de funcionamiento. | 38 |
| Figura 26: Esquema de la superficie interior del acumulador de energía de alta capacidad, multiplicado por un factor de 750. | 40 |

| | |
|--|-----|
| Figura 27: Esquema de la superficie interior del volante de inercia teórico, multiplicado por un factor de 750..... | 40 |
| Figura 28: Esquema de la superficie interior del recuperador de frenada en vehículos híbridos, multiplicado por un factor de 500. | 40 |
| Figura 29: Comparación de curvas de tensión-deformación de diferentes materiales (34). | 48 |
| Figura 30: Distancia d genérica para varios puntos del perfil de la carcasa protectora. | 53 |
| Figura 31: Carcasa protectora del de energía de alta capacidad. | 55 |
| Figura 32: Carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad. | 55 |
| Figura 33: Carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad. | 55 |
| Figura 34: Perfil de velocidades típico de un flujo de Couette (39). | 58 |
| Figura 35: Esquema de las zonas típicas de una envolvente donde se debe evaluar el número de Reynolds..... | 61 |
| Figura 36: Gráfica de la variación del Reynolds según el valor del radio para diferentes presiones. Calculado para la superficie superior de la envolvente del volante teórico..... | 63 |
| Figura 37: Regímenes de flujo observados dependiendo del Reynolds de la pared interna (Re_i) y externa (Re_o), para un ratio de radios de 0,883 (41). Adaptación de la ilustración de (42). | 64 |
| Figura 38: Esquema de los vórtices de Taylor (40). | 65 |
| Figura 39: Esquema de las zonas de cambio de sección brusca en la envolvente. | 66 |
| Figura 40: Esquema de las irregularidades en las superficies de la envolvente. | 67 |
| Figura 41: Gráfica de la potencia perdida en función de la presión para el volante de inercia teórico. | 70 |
| Figura 42: Gráfica de la potencia perdida en función de la presión para el volante de inercia teórico. | 71 |
| Figura 43: Gráfica del consumo de la bomba MBS-052 frente a la presión (47). | 72 |
| Figura 44: Esquema del sistema de seguridad. | 78 |
| Figura 45: Comparación de la potencia perdida por las fuerzas aerodinámicas en el aire y en la mezcla de gases SF ₆ 5%. | 79 |
| Figura 46: Comparación de la potencia perdida por las fuerzas aerodinámicas en el aire y en la mezcla de gases SF ₆ 5%. | 80 |
| Figura 47: Deformación total del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la tracción..... | 107 |
| Figura 48: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la tracción. | 108 |
| Figura 49: Perfil de puntos del acumulador de energía de alta capacidad..... | 108 |
| Figura 50: Deformación total del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la temperatura..... | 110 |
| Figura 51: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la temperatura. | 110 |
| Figura 52: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad rotando a temperatura de 35°C. | 113 |
| Figura 53: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad rotando a temperatura de 15°C. | 113 |
| Figura 54: Tres primeros modos de vibración del acumulador de energía de alta capacidad..... | 114 |
| Figura 55: Deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la tracción. | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 56: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la tracción..... | 116 |
| Figura 57: Perfil de puntos del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 116 |
| Figura 58: Deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la temperatura a 135°C..... | 118 |
| Figura 59: Deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la temperatura a 0°C..... | 118 |
| Figura 60: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la temperatura..... | 119 |
| Figura 61: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos rotando a temperatura de 135°C..... | 122 |
| Figura 62: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos rotando a temperatura de 135°C..... | 122 |
| Figura 63: Seis primeros modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 123 |
| Figura 64: Primeros modos de vibración de la carcasa protectora del volante de inercia teórico..... | 133 |
| Figura 65: Primer modo de vibración de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad..... | 134 |
| Figura 66: Primer modo de vibración de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 135 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Propiedades de los materiales considerados (11) (12) (13) (14)..... | 17 |
| Tabla 2: Características del volante de inercia teórico..... | 18 |
| Tabla 3: Características del volante de inercia de Lanzarote (20)..... | 19 |
| Tabla 4: Características del acumulador de energía de alta capacidad..... | 20 |
| Tabla 5: Características del volante de inercia Flywheel KERS de Volvo (25)..... | 21 |
| Tabla 6: Características del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 22 |
| Tabla 7: Perfil de deformación por tracción del volante de inercia teórico..... | 28 |
| Tabla 8: Perfil de deformación por dilatación térmica del volante de inercia teórico. | 32 |
| Tabla 9: Perfil de deformación total del volante de inercia teórico..... | 33 |
| Tabla 10: Modos de vibración del volante de inercia teórico según ANSYS..... | 36 |
| Tabla 11: Modos de vibración del volante de inercia teórico corregidos..... | 37 |
| Tabla 12: Velocidades críticas del volante de inercia teórico..... | 37 |
| Tabla 13: Modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos corregidos..... | 37 |
| Tabla 14: Velocidades críticas del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 38 |
| Tabla 15: Márgenes de seguridad y tolerancias de fabricación para los volantes de inercia..... | 40 |
| Tabla 16: Perfil de deformación final del volante de inercia teórico..... | 41 |
| Tabla 17: Perfil de deformación final del acumulador de energía de alta capacidad..... | 42 |
| Tabla 18: Perfil de deformación final del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 43 |
| Tabla 19: Volumen de la parte de la carcasa que recubre el volante, para cada volante de inercia en función del espesor..... | 47 |
| Tabla 20: Valores de K y n para diferentes materiales (35) (36)..... | 49 |
| Tabla 21: Deformación antes de la rotura para diferentes materiales (37) (32)..... | 50 |
| Tabla 22: Densidad y módulo de tenacidad para diferentes materiales (37) (32)..... | 51 |
| Tabla 23: Propiedades de los materiales considerados (32) (30)..... | 52 |
| Tabla 24: Espesor y material para las diferentes carcasas protectoras..... | 52 |
| Tabla 25: Resultados de las iteraciones del cálculo de la superficie interior corregida. Resultados de la carcasa protectora del volante de inercia teórico..... | 54 |
| Tabla 26: Correcciones de la superficie interior de cada zona de las distintas carcasas protectoras..... | 54 |
| Tabla 27: Carcasas protectoras y sus principales características..... | 55 |
| Tabla 28: Primeras frecuencias normales de las carcasas protectoras frente a las frecuencias de trabajo de sus volantes de inercia..... | 56 |
| Tabla 29: Números de Mach para los volantes de inercia..... | 60 |
| Tabla 30: Coeficientes de viscosidad del aire en función de la temperatura (38)..... | 61 |
| Tabla 31: Presiones críticas para las zonas cilíndricas según Reynolds..... | 62 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 32: Presiones críticas para las zonas del disco según Reynolds..... | 63 |
| Tabla 33: Presiones críticas según Reynolds..... | 63 |
| Tabla 34: Presiones críticas para las zonas cilíndricas según Taylor..... | 66 |
| Tabla 35: Presiones críticas de las envolventes..... | 68 |
| Tabla 36: Grados de vacío..... | 68 |
| Tabla 37: Pérdida de potencia en las superficies cilíndricas en función de la presión. | 70 |
| Tabla 38: Pérdida de potencia en las superficies planas en función de la presión..... | 70 |
| Tabla 39: Pérdida de potencia total en función de la presión..... | 70 |
| Tabla 40: Volumen del fluido en cada envolvente..... | 72 |
| Tabla 41: Presiones óptimas de funcionamiento para las envolventes del volante de inercia teórico y el acumulador de energía de alta capacidad..... | 73 |
| Tabla 42: Presión óptima de funcionamiento para la envolvente del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 73 |
| Tabla 43: Presupuesto de la elaboración del Trabajo de Fin de Grado..... | 85 |
| Tabla 44: Perfil de deformación por tracción del acumulador de energía de alta capacidad..... | 109 |
| Tabla 45: Perfil de deformación por dilatación térmica del acumulador de energía de alta capacidad..... | 111 |
| Tabla 46: Perfil de deformación total del acumulador de energía de alta capacidad. | 112 |
| Tabla 47: Velocidades críticas del acumulador de energía de alta capacidad..... | 115 |
| Tabla 48: Perfil de deformación por tracción del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 117 |
| Tabla 49: Perfil de deformación por dilatación térmica del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 120 |
| Tabla 50: Perfil de deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos..... | 121 |
| Tabla 51: Modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos según ANSYS..... | 124 |
| Tabla 52: Modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos corregidos..... | 124 |
| Tabla 53: Valores de d según la zona de la carcasa protectora..... | 125 |
| Tabla 54: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del volante de inercia teórico. Iteración 0. En gris aparecen los valores modificados..... | 126 |
| Tabla 55: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del volante de inercia teórico. Iteración 1. En gris aparecen los valores modificados..... | 127 |
| Tabla 56: Valores de d según la zona de la carcasa protectora..... | 128 |
| Tabla 57: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad. Iteración 0. En gris aparecen los valores modificados..... | 128 |
| Tabla 58: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad. Iteración 1. En gris aparecen los valores modificados..... | 129 |
| Tabla 59: Resultados de las iteraciones del cálculo de la superficie interior corregida. Resultados de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad..... | 130 |
| Tabla 60: Valores de d según la zona de la carcasa protectora..... | 130 |
| Tabla 61: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos. Iteración 0. En gris aparecen los valores modificados. | 131 |
| Tabla 62: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos. Iteración 1. En gris aparecen los valores modificados. | 132 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 63: Resultados de las iteraciones del cálculo de la superficie interior corregida. Resultados de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos. | 133 |
| Tabla 64: Modos de vibración de la carcasa protectora del volante de inercia teórico según ANSYS. | 133 |
| Tabla 65: Modo de vibración de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad. | 134 |
| Tabla 66: Modo de vibración de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos. | 135 |

Capítulo 1

Introducción

Uno de los grandes problemas energéticos que existe en la actualidad es el almacenamiento de energía. En los últimos años se ha producido un aumento de producción de energía basada en fuentes de energía variables e impredecibles, tales como la energía eólica o fotovoltaica. Estas tecnologías son necesarias para disminuir los daños ambientales producidos por las centrales de generación de energía basadas en recursos no renovables.

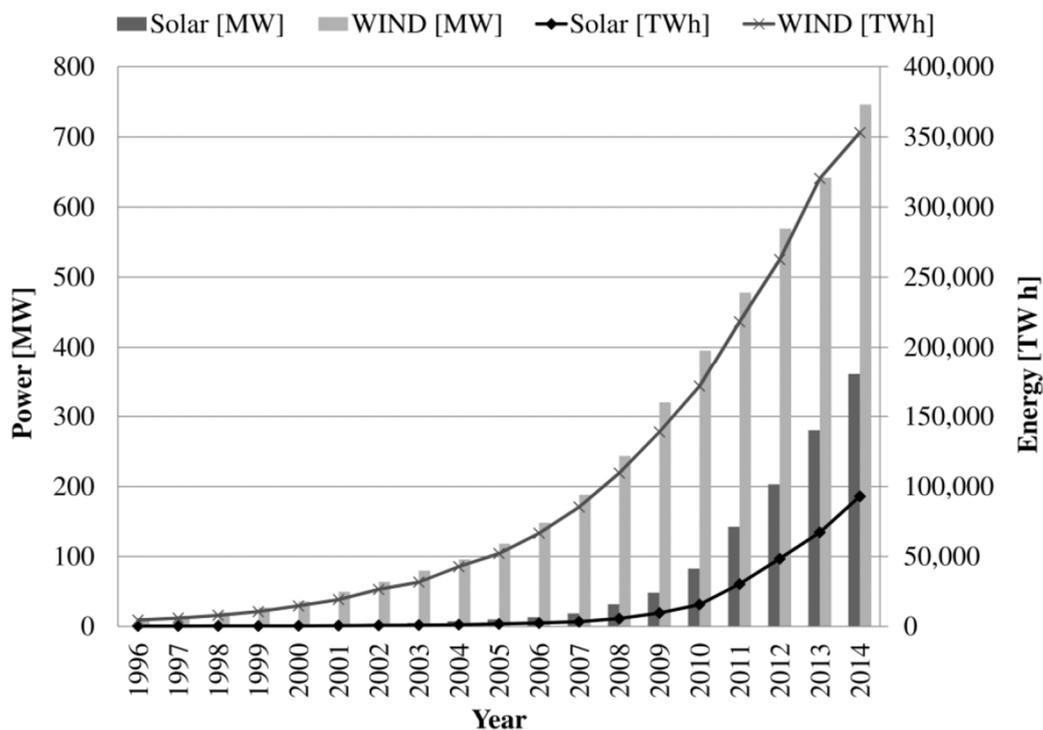


Figura 1: Gráfico de la capacidad de suministro y producción de energía eólica y fotovoltaica.

En la generación de energía a nivel de red eléctrica debe existir un equilibrio entre la demanda y producción estable. El auge de las tecnologías renovables hace más difícil mantener equilibrado el mercado, por lo que es interesante apostar por el almacenamiento de energía (1).

Existen múltiples formas de almacenar energía, tales como los sistemas de bombeo de agua (PHES), los sistemas de compresión de aire (CAES), los volantes de inercia (FWs), los supercondensadores, capacitadores o baterías. En este trabajo se opta por la

tecnología de los volantes de inercia, ya que en poco tiempo pueden suministrar una gran cantidad de potencia. Esta y otras propiedades los hace ideales para múltiples aplicaciones, como se comentará posteriormente.

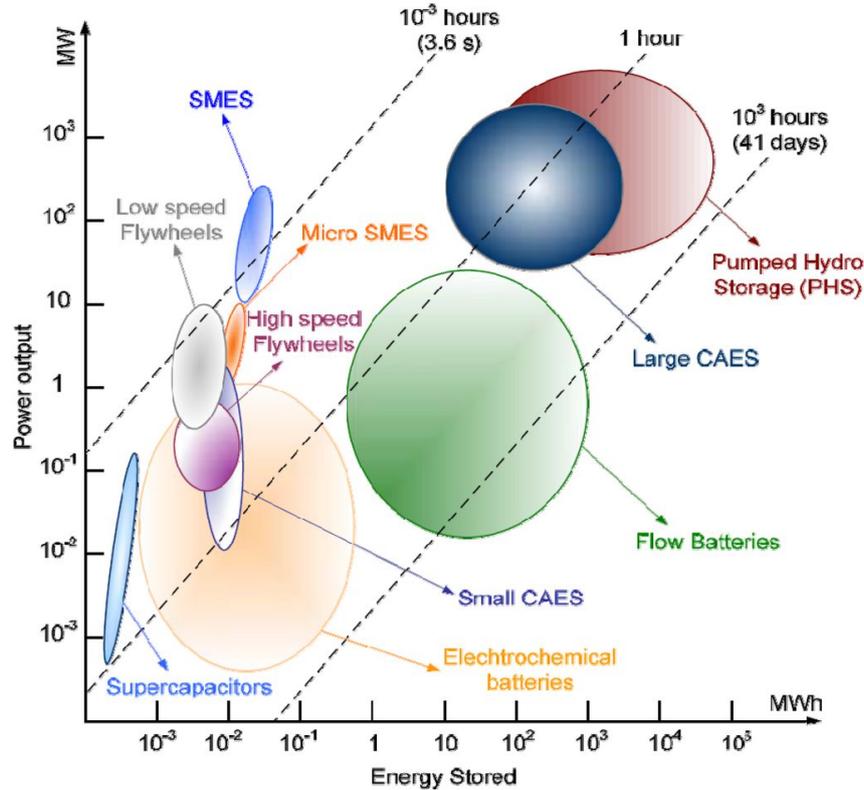


Figura 2: Comparación de almacenadores de energía enfrentando la energía almacenada a la potencia de cada tecnología (2). “Low speed flywheels” son los volantes de inercia lentos y “High speed flywheels” son los volantes de inercia rápidos.

Un volante de inercia (flywheel) consiste en una masa girando que almacena energía. La cantidad de energía que almacene depende de la masa y la velocidad de rotación. De esta manera, si se consigue rotar un material de considerable masa a altas velocidades, se almacenará gran cantidad de energía.

En la presente memoria se tratará el diseño sobre la envolvente de los volantes de inercia, con el objetivo de aumentar la eficiencia del mismo. Partiendo de un volante de inercia, se pretende generar una envolvente reduzca su frenado, analizando el rozamiento aerodinámico.

Se estudian las pérdidas aerodinámicas porque estas son la principal pérdida de energía (3). Además de estas pérdidas energéticas, también estarían las pérdidas por rozamiento producidas por el rozamiento en los rodamientos y las pérdidas por histéresis (4).

Se denominará envolvente al entorno que rodea al volante de inercia. Esto es la carcasa que lo recubre, y el medio (fluido) que se encierra entre ambos. En este trabajo se propondrá una metodología de diseño de la envolvente, con el fin de mejorar la capacidad de almacenamiento del volante de inercia que encierre.

1.1. Objetivos.

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Objetivo principal: desarrollar una metodología para el diseño de la envolvente de volantes de inercia para distintas aplicaciones, estudiando el comportamiento del volante en las distintas fases de funcionamiento, con el propósito de optimizar la tecnología de almacenamiento de energía cinética y reducir las pérdidas por resistencia aerodinámica.
- Objetivos secundarios:
 - Estudio de posibles mejoras de diseño en diferentes aspectos de la envolvente.
 - Revisión de la normativa a aplicar en cuanto a diseño y fabricación.
 - Estudio de viabilidad para futuras aplicaciones.

1.2. Organización y planificación.

El trabajo sigue la siguiente estructura:

Capítulos 1 y 2: se explican la temática y los objetivos del trabajo. Además, se introducen los conceptos básicos sobre volantes de inercia y se explica la evolución de sus aplicaciones.

Capítulo 3: se explica la metodología propuesta.

Capítulos 4 a 8: se diseña y calcula la envolvente. Queda dividido en los siguientes capítulos:

- En el capítulo 4, se presentan los volantes que se van a calcular. Estos se dividen en uno teórico, con el que se realizarán los cálculos, y otros dos correspondientes a dos aplicaciones en la industria.
- En el capítulo 5, se procede a calcular la superficie interior de la carcasa, basándose en los movimientos que realizará el volante de inercia durante su funcionamiento.
- En el capítulo 6, se diseña la geometría y material de la carcasa, realizando un análisis estructural.
- En el capítulo 7, se realiza un análisis de fluidos del aire encerrado entre el volante y la carcasa. Así, se determinan las características idóneas de funcionamiento.
- En el capítulo 8, se plantean alternativas de diseño y posibles mejoras a implementar, partiendo de los anteriores estudios.

Capítulo 9: se estudia la normativa vigente y se comentan trabajos similares.

Capítulo 10: se realiza un presupuesto del trabajo. Además, se presentan las futuras aplicaciones que puede tener la tecnología.

Capítulo 11: se presentan las conclusiones sacadas del proyecto. Finalmente, se definen las líneas a seguir para trabajos futuros.

El trabajo concluye con la bibliografía consultada.

Al final de la memoria, aparecen los anexos:

- Anexo A: se muestra el código MATLAB utilizado para el diseño de los volantes de inercia (Capítulo 4. *Características de los volantes a calcular*).

Capítulo 1. Introducción

- Anexo B: se documentan los volantes calculados. Mediante planos acotados se determinan las dimensiones de la estructura.
- Anexo C: se muestran los resultados de las simulaciones y los cálculos realizados para el resto de volantes de inercia.
- Anexo D: se muestran los cálculos para determinar la superficie interior corregida de las diferentes carcasas protectoras.

Capítulo 2

Introducción a los volantes de inercia

En el siguiente capítulo se explica el concepto de volante de inercia y sus características principales. Además, se incluye una breve evolución histórica y un resumen sobre las últimas aplicaciones.

2.1. Evolución histórica.

Los volantes de inercia se han usado en la industria de la alfarería desde principios del siglo VI a. C. En un principio los discos estaban hechos de madera, piedra o arcilla, aunque también se usó bambú incrustado en arcilla usando un primitivo material compuesto. Más tarde, sobre el año 1200, se empieza a usar volantes giratorios en la industria textil, más concretamente en los procesos de hilado.

No sería hasta la revolución industrial cuando los volantes dejarían de ser utensilios a pasar a ser mecanismos accionados por máquinas. Junto con el cigüeñal, sería la tecnología para conseguir movimientos rotatorios uniformes. Los volantes eran normalmente de hierro y acero y podían llegar a tener grandes dimensiones para acumular energía cinética (5).

A partir de ese momento, se usaría esta tecnología en la industria para multitud de aplicaciones. Según avanza la tecnología de materiales, se consiguen volantes que giren a mayor velocidad y puedan acumular mayor energía cinética en menor espacio.

2.2. Descripción.

Un volante de inercia, como ya se ha definido antes, consiste en una masa que almacena energía cinética al girar. Cuando se carga, el rotor se acelera incrementando la energía que almacena. Al descargar, se extrae energía decelerando el volante. La energía que almacena un volante de inercia depende principalmente de su masa y su velocidad de giro (5):

$$E_{cin} = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (2.1)$$

Donde E_{cin} es la energía cinética, ω la velocidad de rotación, e I el momento de inercia. Si se trata de un cilindro sólido, la inercia se define como:

$$I = \frac{1}{2}MR^2 \quad (2.2)$$

Donde M y R son la masa y radio del volante respectivamente. Si se trata de un cilindro hueco:

$$I = \frac{1}{2}M(R_{ext}^2 + R_{int}^2) \quad (2.3)$$

Donde R_{ext} es el radio exterior y R_{int} es el radio interior del volante respectivamente.



Figura 3: Volante de inercia (6).

En la mayoría de los casos, el volante de inercia va acoplado a un motor que controla la velocidad de giro. La estructura va apoyada en rodamientos y gira en un entorno de presión baja para disminuir las pérdidas de rozamiento. Su vida útil es variable dependiendo de aplicación, pero actualmente se diseñan volantes de inercia con una vida de en torno a 35 años, lo que supone la mejor opción de almacenamiento de energía si lo que se desea es un funcionamiento muy duradero.

2.2.1. Partes de los volantes de inercia.

Las principales partes de un volante de inercia moderno son (4) (7):

- Rotor: el propio volante de inercia. Es el encargado de almacenar energía y la principal parte del sistema. Gracias a sus propiedades mecánicas es capaz de girar a altas velocidades y, junto a su inercia diseñada para ser elevada, almacenar gran cantidad de energía.
- Motor/generador (motor/generator): el conjunto del rotor y el estator. Mediante este conjunto, se consigue una máquina eléctrica que actúe como motor cuando la energía se transfiere al volante de inercia, y como generador cuando la energía se toma del volante. Existen múltiples configuraciones de máquinas, como pueden ser máquinas síncronas de imanes permanentes, máquinas de inducción, máquinas de reluctancia conmutada u otras.
- Rodamientos (bearing): los rodamientos soportan el eje permitiéndole girar libremente. Deben estar diseñados para reducir al máximo las pérdidas por rozamiento. Dentro de los rodamientos se puede encontrar dos grandes grupos:
 - Rodamientos mecánicos: los utilizados en la mayoría de aplicaciones industriales y de más antigüedad. Los avances en lubricación han hecho que las pérdidas por rozamiento sean mínimas, pero presentan

algunos inconvenientes. Al existir contacto entre el volante y la estructura, transmite vibraciones del volante. Actualmente se usan como rodamientos auxiliares.

- Rodamientos magnéticos: los rodamientos más utilizados en almacenamiento de energía. Dado que no existe contacto entre el rotor y el resto de la estructura, no se producen pérdidas por rozamiento ni se transmiten vibraciones. Dentro de este grupo están los rodamientos magnéticos pasivos (usados normalmente como rodamiento auxiliar) y los rodamientos magnéticos activos. Estos últimos ofrecen un control sobre las vibraciones del rotor y la estabilidad del sistema. El principal problema es que requieren estar alimentados, lo que implica un consumo extra de energía.

La combinación de estos rodamientos hace a los volantes de inercia estables, controlables y más eficientes. Las pérdidas por rozamiento dejan de ser importantes.

- Envoltorio: el conjunto de la carcasa protectora y el fluido que envuelve el volante.
 - Carcasa protectora (containment): su principal función es proteger al resto del sistema de fallos o averías. Si el volante de inercia se desestabilizase, la carcasa debe absorber el impacto y disipar la energía que acumule.
 - Fluido (vacuum or very low pressure): el gas que esté encerrado en el sistema debe garantizar unas pérdidas aerodinámicas mínimas para aumentar el rendimiento del volante. Por ello, se utilizan bombas de vacío para expulsar el aire reduciendo considerablemente la presión o generando vacío. También se usan gases de baja densidad encapsulados en la carcasa protectora.

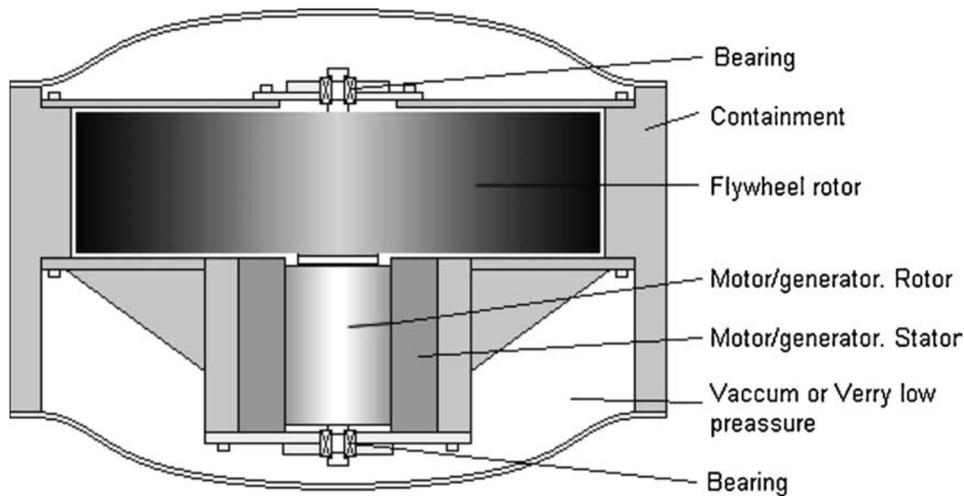


Figura 4: Componentes básicos de un volante de inercia moderno (4).

También es importante la orientación del volante de inercia. El propio peso del volante genera una fuerza inevitable en el eje z. Para que no influya considerablemente, se debe colocar la estructura verticalmente. Así, la fuerza actúa sobre el eje de giro sin provocar esfuerzos flectores.

En algunas aplicaciones, como en transporte, es inevitable tener que colocar el volante horizontal. En estos casos el peso provoca un esfuerzo flector que, al girar,

Capítulo 2. Introducción a los volantes de inercia

produce vibraciones en toda la estructura. Por el efecto giroscópico a mayor velocidad, menor influencia tendrán estas deformaciones.

2.2.2. Tipos de volantes de inercia.

Distinguiendo por la velocidad de rotación, se puede diferenciar dos grandes tipos de volantes de inercia.

- Volantes de inercia de baja velocidad (low speed flywheels): los volantes de inercia lentos han sido usados desde la revolución industrial hasta nuestros días. La acumulación de energía viene dada por grandes masas rotando, generando una inercia muy elevada. El principal inconveniente es que para acumular gran cantidad de energía se necesita un gran espacio.
- Volantes de inercia de alta velocidad (high speed flywheels): utilizando materiales compuestos se pueden conseguir volantes de inercia girando a velocidades de 100.000 rpm. Esto hace que se pueda reducir considerablemente el volumen del volante y ser usado en más aplicaciones que en las industriales. Actualmente se tiende a utilizar estos volantes de inercia.

Además, existen diferentes volantes de inercia según sea su forma. En la actualidad se tiende a usar diseños que acumulen la masa en el exterior del volante, aumentando la inercia y reduciendo el peso total del volante.

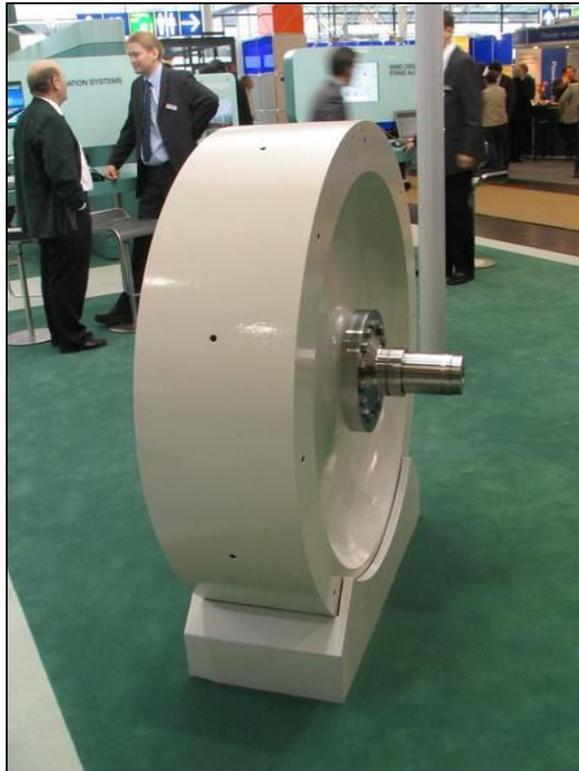


Figura 5: Volante de inercia que acumula la masa en el exterior de su contorno (8).

2.3. Últimas aplicaciones.

Los volantes de inercia son usados en múltiples aplicaciones, como son (7):

- Vehículos eléctricos e híbridos: utilizando los volantes de inercia para acumular en el frenado, y entregar energía en la aceleración. Esta tecnología se conoce como KERS (Kinetic Energy Recovery System), o sistema de recuperación de energía cinética. Este sistema de freno regenerativo fue usado por primera vez en la fórmula 1, pero ya se ha extendido al sector del automóvil comercial. Usando esta tecnología se evita disipar la energía que contiene el coche al frenar. En vez de convertirla en calor, se acumula en el volante de inercia y, cuando se requiere un extra de potencia (como en las aceleraciones), el volante se frena dando al motor un empuje rápidamente.
- Sector ferroviario: la idea de usar volantes de inercia para recuperar energía es aplicable al ferrocarril. En el momento que el tren quiera frenar, el sistema del freno regenerativo convierte la energía cinética en electricidad y así usarse para acelerar otro tren o cualquier otra aplicación.
- Generación de energía: como se ha dicho en la introducción de este trabajo, el uso de acumuladores de energía es muy útil en sistemas de generación de energía inestables. El uso de energías renovables implica picos de generación e inestabilidad por el hecho de estar sujetas a factores externos (sol, viento, etcétera). Los volantes de inercia, al igual que otros acumuladores de energía, mantienen estable el voltaje y la frecuencia, controlando la salida y entrada de energía.
- Red eléctrica: los beneficios de controlar la frecuencia y el voltaje en la generación de energía también es aplicable a nivel de red eléctrica. Además, en zonas aisladas con pocos recursos, como islas, es interesante tener un colchón energético.
- Marina: en los barcos de propulsión eléctrica, los equipos de alta potencia pueden producir caídas de voltaje. Para solucionar el problema, se usan acumuladores de energía.
- Espacio: para estabilizar los satélites, se pueden usar volantes de inercia. Al tener masas rotando, se produce el efecto giroscópico que orienta el satélite a la dirección deseada. Actualmente, se está empezando a sustituir las baterías químicas por volantes de inercia en el almacenamiento de energía (9).

Capítulo 3

Metodología propuesta

El objetivo del trabajo es optimizar la envolvente del volante de inercia reduciendo las pérdidas aerodinámicas. Para ello se parte de la idea de reducir la fuerza que ejerce el fluido sobre el volante reduciendo la presión. Para trabajar a presiones bajas, se puede optar por enclaustrar el fluido o, para asegurar presión constante, la colocación de una bomba de vacío.

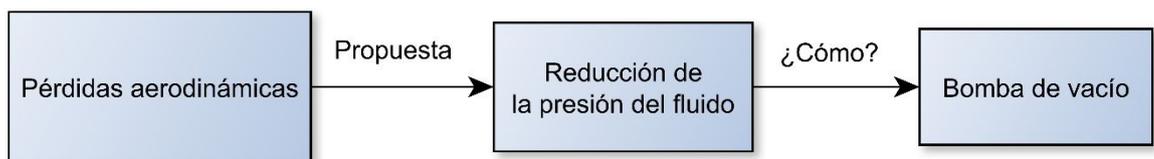


Figura 6: Esquema de la propuesta de solución.

Ahora bien, el funcionamiento de la bomba requiere una potencia dependiendo de cuanto volumen de fluido tenga que evacuar y en el tiempo que se requiera. Por ello, se debe diseñar una carcasa lo más ceñida posible al volante para disminuir el volumen.

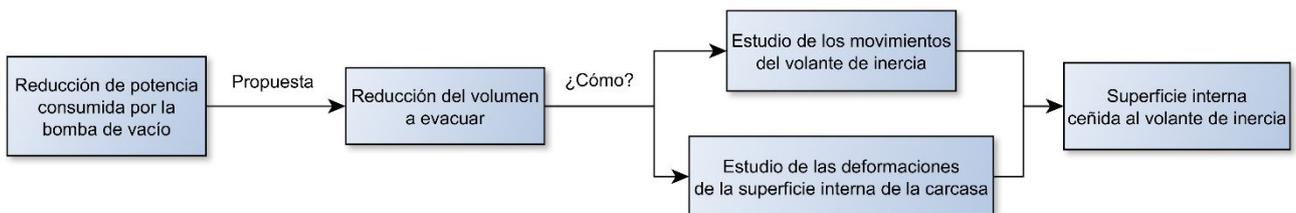


Figura 7: Esquema de la propuesta de optimización de la bomba de vacío.

Si se sabe la potencia perdida por fuerzas aerodinámicas, y la potencia gastada por la bomba de vacío, se puede diseñar un punto de diseño en el que las pérdidas sean mínimas.

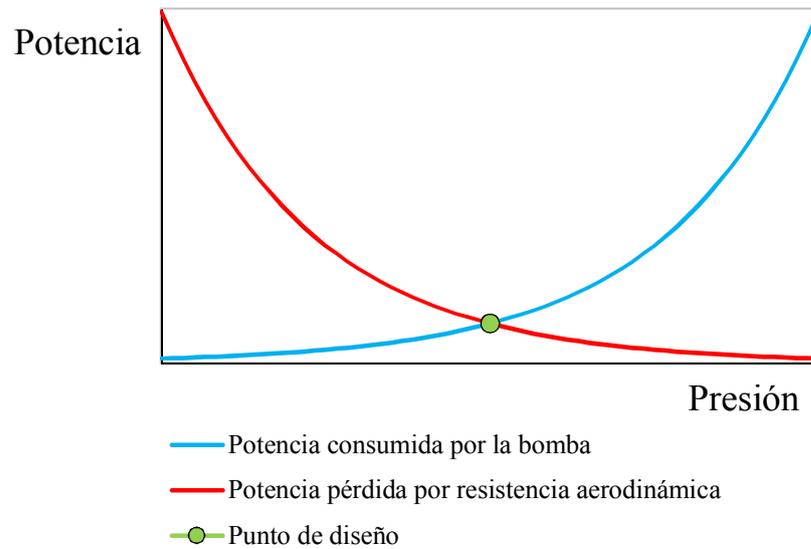


Figura 8: Gráfico esquemático de la determinación del punto de diseño.

Por otro lado, la carcasa tiene función protectora, por lo que hay que diseñarla en caso de fallo. Todas estas ideas dan lugar a la metodología que se propone en este trabajo.

A continuación, se presenta la metodología esquematizada en forma de flujo de trabajo. Los números entre paréntesis representan el capítulo donde viene desarrollado cada estudio.

Cabe destacar que el diseño del volante de inercia no es el ideal, sino el que se ha seguido para diseñar los volantes de inercia en este trabajo. Si se quisiera hacer una optimización de los volantes de inercia, habría que realizar análisis dinámicos. Dado que la optimización del volante no es el objetivo del trabajo, no se ha profundizado demasiado en su diseño. A pesar de eso, los criterios seguidos para su diseño son coherentes y están basados en análisis estáticos, modelos reales y optimización de sus dimensiones.

Además de la metodología, en el trabajo se incluyen unas propuestas de mejora de diseño (Capítulo 8: *Propuestas de mejora de diseño*). Estas propuestas están basadas en los resultados de la metodología, y se proponen para mejorar ciertos aspectos del diseño de la envolvente.

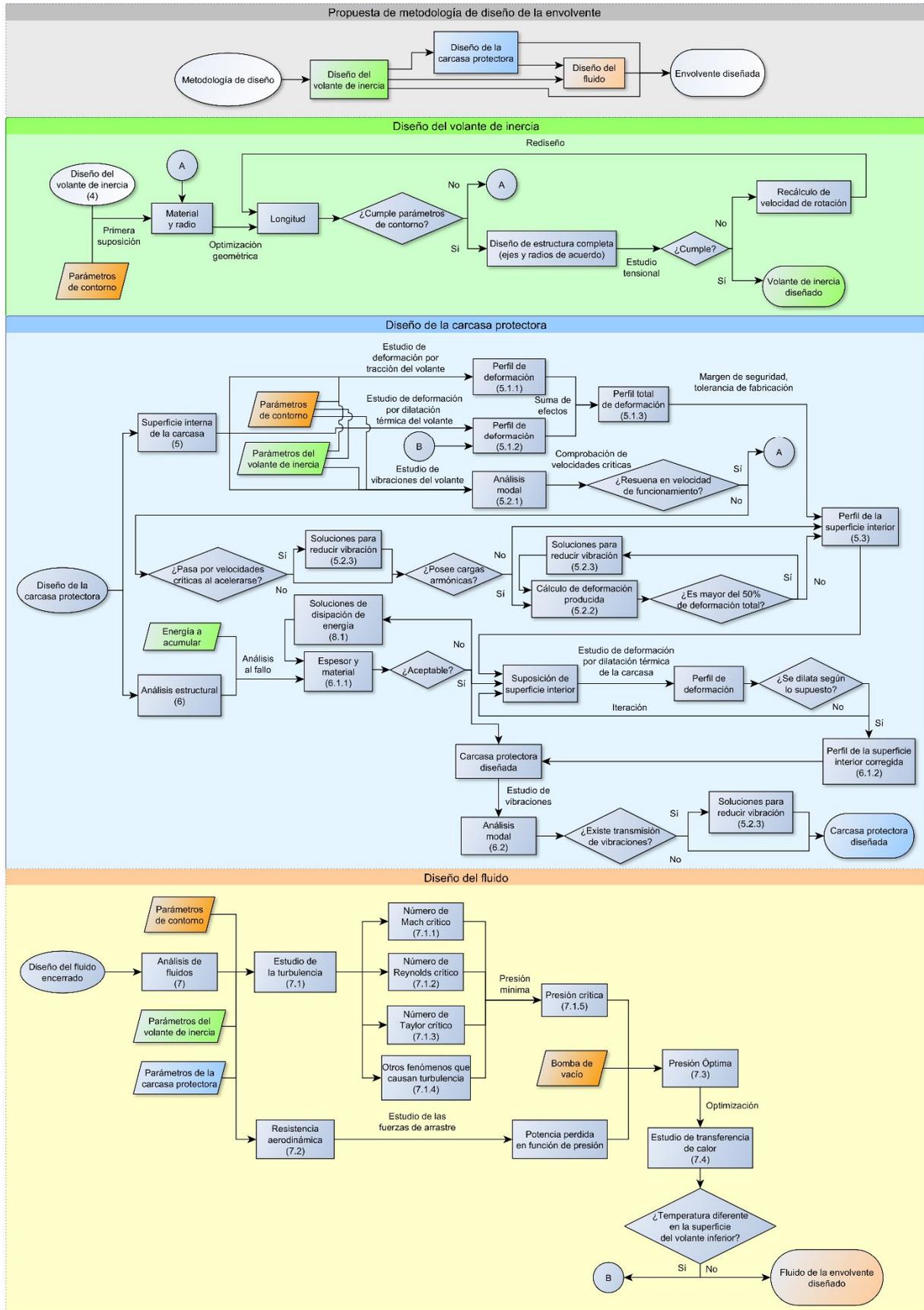


Figura 9: Metodología propuesta esquematizada.

Capítulo 4

Características de los volantes a calcular

Para diseñar las envolventes, primero hay que definir los volantes de inercia que cubrirán. En este capítulo se concretan los volantes que se van a calcular en la memoria. Salvo el primer volante de inercia, los modelos están basados en volantes de inercia reales y sus características están justificadas por la aplicación que tendrán.

Las medidas de los volantes están diseñadas a partir del código MATLAB: “Optimización de parámetros de volantes de inercia enteros”¹, el cual se encuentra en el Anexo A. El código está basado en calcular la longitud y velocidad de rotación del volante a partir de cada radio requerido. Para ello se necesita saber la tensión máxima que soporta el volante, siendo esta (5):

$$\sigma_{max} = \frac{1}{8} \rho \omega^2 R^2 (3 + \nu) \quad (4.1)$$

Donde ρ es la densidad y ν el coeficiente de Poisson del material. Despejando ω^2 y sustituyéndola en la ecuación (2.1):

$$E_{cin} = I \frac{4\sigma_{max}}{\rho R^2 (3 + \nu)} \quad (4.2)$$

Al ser un cilindro:

$$M = \rho L \pi R^2 \quad (4.3)$$

Donde L es la longitud del volante. Sustituyendo la ecuación (4.3) en (2.2), y ésta a su vez en (4.2):

$$E_{cin} = \frac{2\pi\sigma_{max}}{(3 + \nu)} L R^2 \quad (4.4)$$

Despejando L :

$$L = \frac{(3 + \nu) E_{cin}}{2\pi\sigma_{max} R^2} \quad (4.5)$$

Determinando así la longitud óptima para cada radio y energía acumulada (3).

A partir de la energía que se quiere almacenar, datos del material a usar y las medidas máximas y mínimas que se requiere se establecen las características de los volantes. Este estudio únicamente tiene en cuenta las tensiones a tracción, no las tensiones generadas por otros factores. De esta manera, si se desea seguir optimizando

¹ En el diseño del recuperador de frenada en vehículos híbridos no se utiliza el programa, ya que no es un volante entero.

Capítulo 4. Características de los volantes a calcular

los volantes, se deberán simular teniendo en cuenta los concentradores de tensiones de los ejes y la tensión debida al cambio de temperatura, establecer una velocidad de giro más baja, actualizar la energía cinética acumulada, y recalculando la longitud de los volantes.

Iterando estos cálculos, se conseguirá un volante más eficiente. Como el objeto de este trabajo no es la optimización del volante de inercia, sino la optimización de la envolvente, se dejan estos cálculos para futuros estudios. En las propiedades de los volantes aparecen la velocidad de rotación y energía almacenada corregidos, teniendo en cuenta la influencia de los concentradores de tensiones y la variación de temperatura.

Además, hay que tener en cuenta que el programa optimiza la longitud dependiendo de la energía y radios que se introduzcan. Se debe tener presente que si desea una energía muy alta para radios pequeños el programa subirá la longitud dado que la velocidad angular ya estará maximizada. Queda para el usuario introducir datos que guarden coherencia, de tal manera que se obtenga un momento de inercia aceptable.

A continuación, se presentan las propiedades de los materiales y los volantes de inercia. Los volantes de inercia están documentados en el Anexo B, donde se presentan los planos acotados de cada uno de los volantes.

4.1. Materiales y sus propiedades.

Dado que la energía acumulativa de los volantes depende principalmente de la masa y la velocidad de rotación, hay que considerar materiales que maximicen estos valores. De esta manera, se podrá optar por considerar materiales de alta densidad para aumentar la masa, o bien materiales de alta tensión límite para aumentar la velocidad rotativa. Dependiendo de la aplicación se deberá elegir la estrategia más conveniente. En la industria se suelen usar de la siguiente manera:

- Materiales de alta densidad: son los materiales usados antiguamente, los aceros. Este tipo de tecnología se usa para aplicaciones en las que se requiere una velocidad de rotación baja, y no es importante un elevado peso del rotor. Actualmente están quedando desbancados por los nuevos materiales más optimizados.
- Materiales de baja densidad y alto límite elástico: los materiales compuestos. En la industria se está apostando por ellos por su baja densidad y su alta capacidad de resistencia mecánica (10). Los materiales se fabrican de tal manera que las fibras quedan orientadas circularmente, por lo que pueden girar a altas revoluciones y almacenar gran cantidad de energía. Su aplicación más directa son los KERS, aunque se utiliza para todo tipo de aplicaciones.

A continuación, se muestran los materiales que se usarán en las simulaciones y las características principales.

| Material | Densidad (g/cm ³) | Módulo de elasticidad (GPa) | Coefficiente de Poisson | Límite elástico (MPa) | Tensión de rotura (MPa) | Coefficiente de dilatación térmica lineal ² (10 ⁻⁶ /°C) | Conductividad térmica (W/K·m) |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|---|-------------------------------|
| Material teórico | 7,85 | 200 | 0,30 | 250 | 400 | 12 | 60,5 |
| Acero estructural | 7,85 | 210 | 0,30 | 250 | 400 | 12 | 60,5 |
| Acero HSLA 950X | 7,83 | 200 | 0,28 | 345 | 450 | 14 | 16 |
| Fibra de carbono CFRP ³ | 1,76 | 110 (6,5) | 0,33 (0,30) | N/A | 1175 (18) 950 (165) | -0,7 (10) | 8,5 |

Tabla 1: Propiedades de los materiales considerados (11) (12) (13) (14).

Dado que no es el objetivo del trabajo, no se usarán valores precisos de materiales muy concretos para los volantes de inercia (sí se hará para la carcasa protectora). Tampoco se investigarán otros materiales o combinaciones de materiales compuestos. No obstante, en la actualidad se está trabajando con combinaciones de estos materiales, como pudiera ser fibra de vidrio y fibra de carbono, o kevlar y fibra de carbono (15).

4.2. Volante de inercia teórico.

El primer volante de inercia es un volante teórico con el que se realizarán los cálculos más exhaustivamente. Está compuesto por un material teórico, con propiedades de un acero típico.

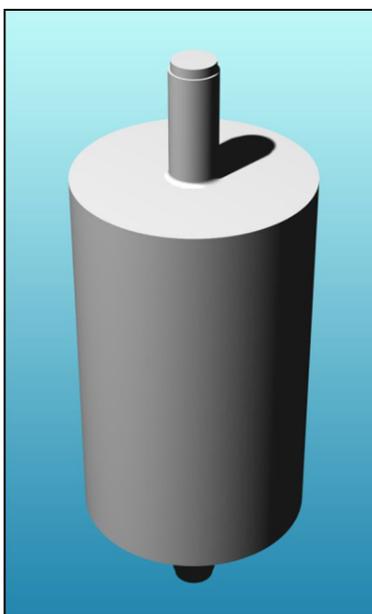


Figura 10: Volante de inercia teórico.

² El coeficiente de dilatación térmica se considera constante para temperaturas menores a 100°C (30).

³ Las propiedades que dependan de la orientación de las fibras tienen el valor en sentido perpendicular entre paréntesis. El valor principal es el valor en el sentido paralelo a las fibras. En el límite de rotura, los dos primeros valores corresponden al límite a tracción y los segundos a compresión.

Capítulo 4. Características de los volantes a calcular

Dado que es un volante de inercia teórico, no está basado en ninguno real ni está pensado para ninguna aplicación. Por lo tanto, sus características no son demasiado relevantes, sino que se usará para realizar los cálculos de la envolvente que le rodeará, la cual sí estará optimizada. Se ha diseñado un eje simétrico a ambos lados del volante, con un radio de acuerdo en el cambio de diámetro para disminuir la tensión, y se han diseñado dos radios más pequeños en los extremos del eje donde irán los rodamientos.

Las características de este volante son:

| | |
|------------------------------------|------------------|
| Material | Material teórico |
| Energía acumulada (MJ) | 103,72 |
| Velocidad de rotación (rpm) | 3820 |
| Masa (Kg) | 10.605,73 |
| Dimensiones totales (cm) | 100x100x268,07 |
| Orientación | Vertical |
| Temperatura de trabajo (°C) | 22 |
| Rango de temperatura (°C) | 19,5-40 |

Tabla 2: Características del volante de inercia teórico.

4.3. Acumulador de energía de alta capacidad.

Este modelo está pensado para poder acumular grandes cantidades de energía. Se aplicaría a la red eléctrica o redes aisladas, con el objetivo de estabilizar la frecuencia y la tensión, y ayudar a la integración de las energías renovables. Esta tecnología ya ha sido probada en proyectos como el Proyecto Store de Endesa en las Islas Canarias (16), o la planta de Stephentown, en Nueva York, la planta más grande de Estados Unidos (17).

En este caso el modelo está basado en la subestación de Mácher 66Kv, de la Red Eléctrica Española, en Lanzarote (18). Usa la tecnología de volante de inercia lento, con rodamientos magnéticos para reducir el rozamiento, posición del eje vertical para reducir las vibraciones producidas por el propio peso del volante, y creación de vacío en la envolvente para reducir pérdidas aerodinámicas.

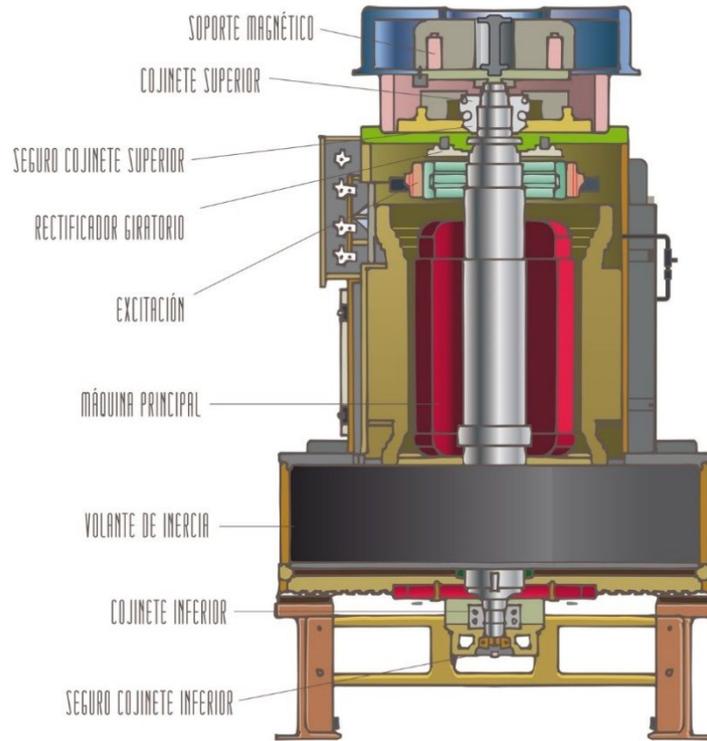


Figura 11: Esquema del volante de inercia de Lanzarote (19).

| | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Potencia máxima absorbida (MW) | 1,65 durante 12 segundos |
| Energía máxima aportada (MWs) | 18 |
| Velocidad de rotación (rpm) | 3.600 |
| Masa (Kg) | 2.900 (sin contar el eje) |
| Dimensiones totales (cm) | 120 de alto |
| Orientación | Vertical |

Tabla 3: Características del volante de inercia de Lanzarote (20).

Al tratarse de un volante de inercia lento, se usará un material de alta densidad. Se sitúa en la parte baja del eje, cercano al rodamiento inferior, para asegurar estabilidad. Además, el estator se sitúa sobre el eje superior, por lo que la carcasa no se calculará en esa zona. A partir del estator, la carcasa se debe situar por encima de él.

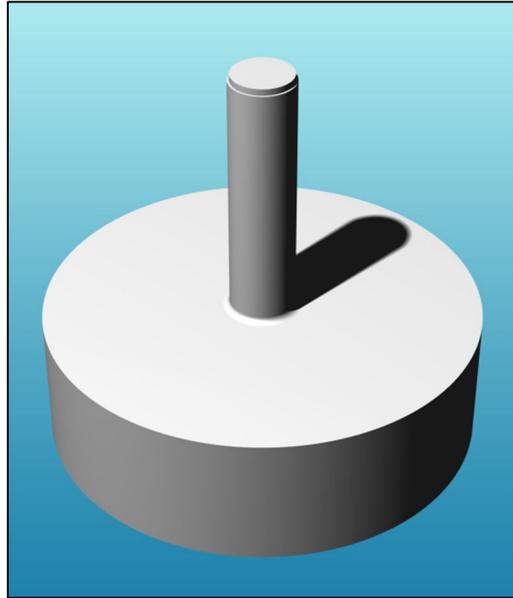


Figura 12: Acumulador de energía de alta capacidad.

Las características de este volante son:

| | |
|------------------------------------|---------------------------|
| Material | Acero de alta resistencia |
| Energía acumulada (MJ) | 214,27 |
| Velocidad de rotación (rpm) | 2244 |
| Masa (Kg) | 16.247,11 |
| Dimensiones totales (cm) | 200x200x198 |
| Orientación | Vertical |
| Temperatura de trabajo (°C) | 22 |
| Rango de temperatura (°C) | 15-35 |

Tabla 4. Características del acumulador de energía de alta capacidad.

4.4. Recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Durante los últimos años, en el sector automovilístico se ha apostado por la tecnología híbrida (21) (22). Esta tecnología tiene múltiples variantes, pero en todos los casos implica usar energía eléctrica combinada con un motor de combustión interna.

El funcionamiento del recuperador de frenada está basado en la tecnología KERS vista anteriormente. En este ámbito existen dos grandes grupos de KERS: los que proporcionan transmisión mecánica, como los que fabrica Torotrask (23), y los que transforman la energía en electricidad mediante un generador eléctrico, como el producto de GKN (24). En este ámbito, Volvo ha implementado su propio sistema KERS en sus vehículos híbridos (25). En este trabajo, se usará de modelo su volante de inercia:

FLYWHEEL KERS COMPONENT DETAILS

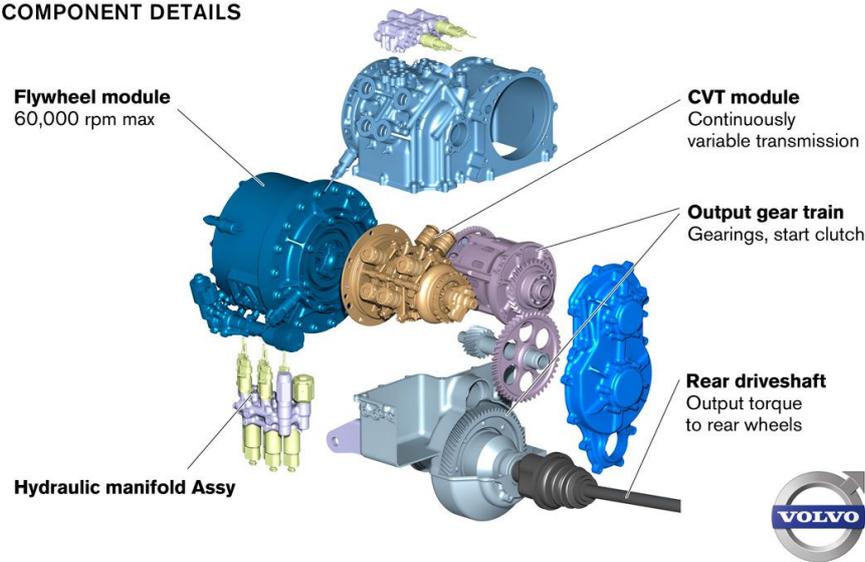


Figura 13: Detalle de los componentes del volante de inercia Flywheel KERS de Volvo (26).

| | |
|---------------------------------------|------------------|
| Material | Fibra de carbono |
| Potencia máxima dada (CV) (KW) | 80 (58,84 KW) |
| Velocidad de rotación (rpm) | 60.000 |
| Masa (Lbs) (Kg) | 13 (5,9 Kg) |
| Diámetro (in) (cm) | 7,84 (20 cm) |
| Orientación | Horizontal |

Tabla 5: Características del volante de inercia Flywheel KERS de Volvo (25).

Como puede verse, se trata de un volante de inercia de masa relativamente pequeña que gira a altas velocidades. De esta manera, puede acumular una cantidad considerable de energía para acelerar el vehículo sin aumentar su peso. La configuración del volante es obliga a colocarlo horizontalmente, conectándolo al resto del sistema. Con las características del volante de Volvo se diseña el recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Puesto que el diseño de volantes de inercia de materiales compuestos no es el objeto del trabajo, se van a utilizar diseños simples. Se utilizarán láminas de 0,1 milímetros de espesor dispuestas como aparece en el plano acotado del recuperador de frenada, Anexo B.

Para este volante de inercia no se ha usado el programa MATLAB “Optimización de parámetros de volantes de inercia enteros”. La razón es que ese programa está diseñado para volantes de inercia sin hueco interno y de materiales isotrópicos. Como este volante no cumple ninguna de esas dos consideraciones, se ha basado el modelo únicamente en la referencia, el KERS de Volvo.

Capítulo 4. Características de los volantes a calcular

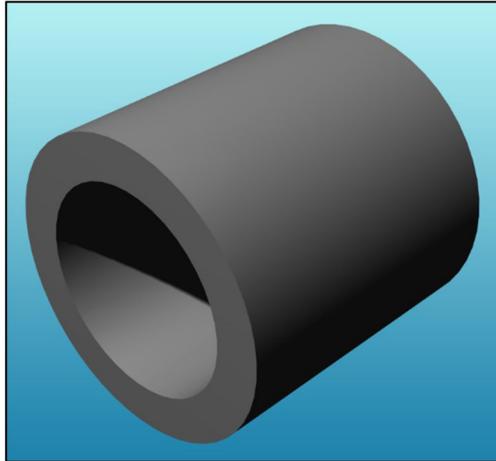


Figura 14: Recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Las características de este volante son:

| | |
|------------------------------------|------------------|
| Material | Fibra de carbono |
| Energía acumulada (MJ) | 4,58 |
| Velocidad de rotación (rpm) | 114.590 |
| Masa (Kg) | 8,53 |
| Dimensiones totales (cm) | 20x20x14 |
| Orientación | Horizontal |
| Temperatura de trabajo (°C) | 90 |
| Rango de temperatura (°C) | 0-130 |

Tabla 6: Características del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Dado que está fabricado de un material compuesto, no se puede mecanizar. Es por ello por lo que se no se calcula el eje que lo sujeta (que será de algún metal como el acero) y se limita su desplazamiento donde iría la estructura que lo sujeta.



Figura 15: Volante de material compuesto sujetado por brazos (23).

Capítulo 4. Características de los volantes a calcular

En este volante de inercia se va a suponer que el volumen encerrado en el hueco del cilindro está tapado por el resto de la estructura del eje. De esta manera, los brazos que los sujeta, como se puede ver en la figura 15, estarían cubiertos sin que hubiera aire entre ellos. Además, por los brazos que tendrá desde el eje hasta el material compuesto, se supone una deformación axial nula en los extremos. El eje se supone de 4 centímetros de diámetro.

Capítulo 5

Diseño de la superficie interior de la carcasa

La primera parte del diseño de la carcasa se va a dedicar a calcular la superficie interior. Se estudiará la deformación de los volantes de inercia teniendo en cuenta su peso, su velocidad de giro y en el rango de temperaturas que trabajarán. Posteriormente, se realizará un estudio de vibraciones para determinar velocidades críticas y deformaciones según la frecuencia de giro.

A partir de todas las deformaciones calculadas, se diseñará la superficie. El objetivo de este capítulo es conseguir una superficie muy cercana al volante para disminuir el hueco entre el volante y la carcasa, pero sin llegar a que se rocen o choquen.

Estos estudios son únicamente para estudiar la deformación del volante, no para optimizarlo ni realizar un estudio de tensiones internas. A pesar de eso, para guardar coherencia se comprobará en cada caso la tensión máxima que soporta. Si se quisiera calcular las tensiones del volante, además de estos cálculos habría que realizar un análisis de las fuerzas de aceleración y posiblemente, el momento giroscópico (27). También sería interesante tener en cuenta el factor de la fluencia, pero para ello es necesario conocer las cargas a las que va a estar sometido el volante y el número de ciclos que se requiere.

Para que este estudio tenga utilidad, debe fabricarse con una tolerancia aceptable. Al estar pensado para aplicaciones donde la producción del volante de inercia requiere precisión, se entiende que para la fabricación de la carcasa se utilizará la maquinaria correspondiente, con la tolerancia suficiente. En este caso la maquinaria debería ser un torno de control numérico con tolerancias del orden de decena o unidad de micra.

Por último, cabe indicar que ésta superficie no será la superficie interior definitiva. Dado que existe una deformación interna de la carcasa, se deberá corregir posteriormente (Apartado 6.1.2. *Corrección de la superficie interior*).

5.1. Estudio del movimiento de los volantes de inercia.

5.1.1. Estudio de tracción de los volantes.

Un eje, al girar, experimenta una fuerza centrífuga que lo empuja hacia fuera:

$$F_c = ma_c = m \frac{v^2}{R} = m\omega^2 R \quad (5.1)$$

Donde F_c y a_c son la fuerza y aceleración centrífuga respectivamente.

Capítulo 5. Diseño de la superficie interior de la carcasa

Esta fuerza provoca unas tensiones radial y circunferencial en el eje, ambas de tracción. En el capítulo anterior se ha indicado la tensión máxima para diseñar los volantes de inercia (ecuación (4.1)). La demostración de esta fórmula puede verse en (3), página 29.

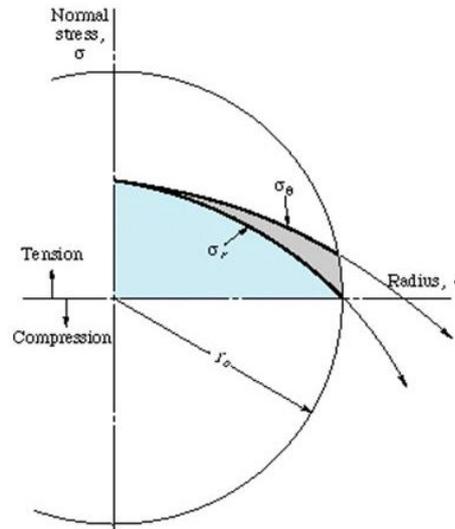


Figura 16: Distribución de tensiones en un eje macizo rotando (28).

Como ya se ha adelantado anteriormente, la tensión máxima se da en el centro del eje del cilindro, alcanzando valores iguales la tensión circunferencial y la tensión radial.

Además, al ser un eje que varía en diámetro, hay que tener en cuenta los concentradores de tensiones. Un concentrador de tensión es una región del sistema que experimenta una tensión muy alta. Esta acumulación de tensión viene dada por agujeros, muescas, cambios de sección, taladros y otras modificaciones de la geometría (29).

Actualmente existen métodos para determinar teóricamente la influencia de la concentración de tensiones. En el libro referenciado anteriormente, *Stress Concentration Factors*, se especifican valores para el coeficiente de concentración de tensiones según el caso. En este trabajo, se determinará la deformación y la tensión máxima soportable mediante el método de los elementos finitos (MEF).

Así, se simula mediante ANSYS el volante de inercia teórico. Se calcula rotando a su velocidad de funcionamiento y teniendo en cuenta el peso propio del volante.

Para esta simulación y la del almacenador de energía de alta capacidad, se impondrá la condición de que en las superficies superior e inferior del eje (donde irían los rodamientos) sólo se permite el movimiento rotatorio. Así, se permite que el volante de inercia pueda deformarse a tracción correctamente en la zona de los rodamientos, sin que se desalinee. Para la simulación del recuperador de frenada en vehículos híbridos, se limitará el desplazamiento en la superficie interior. Estas condiciones de contorno se aplican a todas las simulaciones de los volantes de inercia.

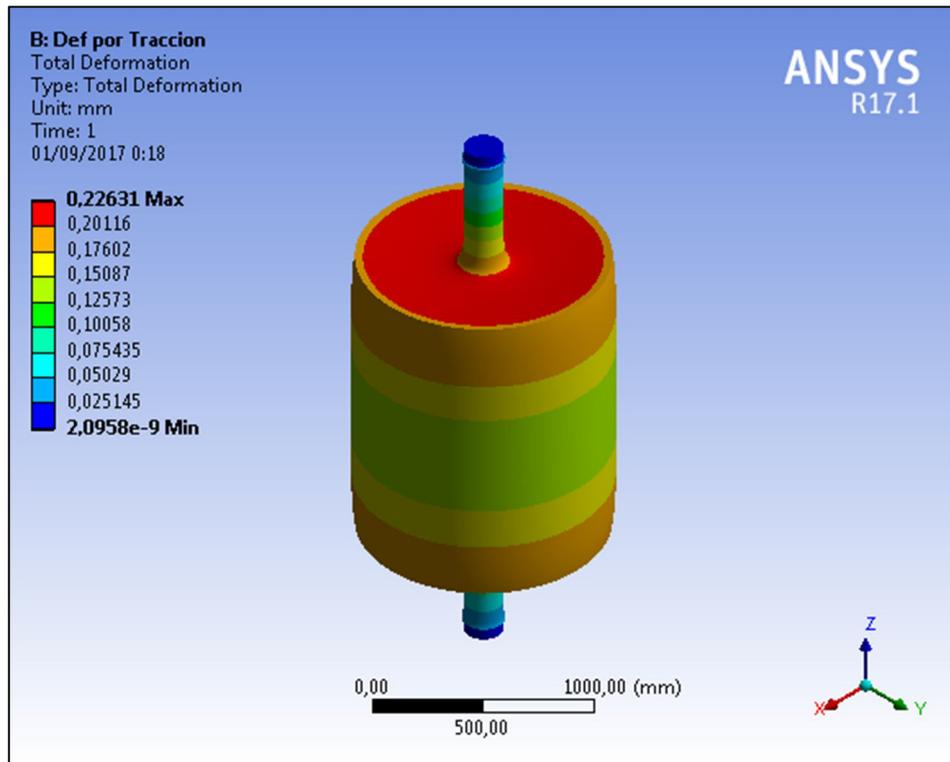


Figura 17: Deformación total del volante de inercia teórico por efecto de la tracción.

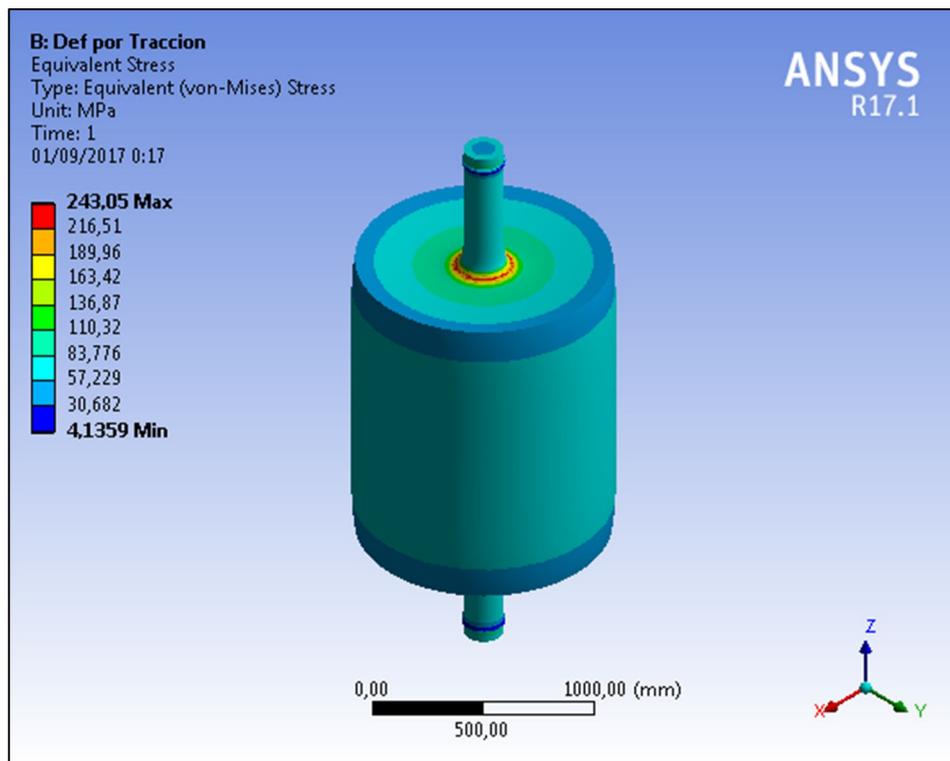


Figura 18: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico por efecto de la tracción.

Como puede verse, la tensión es máxima en los puntos más cercanos al eje, más concretamente en el cambio de diámetro, por ser un concentrador de tensiones.

Capítulo 5. Diseño de la superficie interior de la carcasa

Estudiando la deformación en todos los puntos del volante, se obtiene el siguiente perfil:

| Volante de inercia teórico | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,1 | 1,3003 | -0,00134 | -0,03180 | 0,03183 |
| 2 | 0,1 | 1,1903 | -0,01203 | -0,06299 | 0,06413 |
| 3 | 0,1 | 1,0803 | -0,01166 | -0,10835 | 0,10898 |
| 4 | 0,1 | 0,97032 | -0,01188 | -0,15338 | 0,15384 |
| 5 | 0,1 | 0,86034 | 0,00515 | -0,19163 | 0,19170 |
| 6 | 0,12 | 0,84034 | 0,03703 | -0,20833 | 0,21159 |
| 7 | 0,215 | 0,84034 | 0,01725 | -0,21406 | 0,21475 |
| 8 | 0,31 | 0,84034 | 0,06177 | -0,19895 | 0,20832 |
| 9 | 0,405 | 0,84034 | -0,06279 | -0,17760 | 0,18837 |
| 10 | 0,5 | 0,84034 | 0,11494 | -0,15597 | 0,19375 |
| 11 | 0,5 | 0,63026 | 0,13620 | -0,13337 | 0,19063 |
| 12 | 0,5 | 0,42017 | 0,13724 | -0,09509 | 0,16697 |
| 13 | 0,5 | 0,21009 | 0,13606 | -0,05081 | 0,14524 |
| 14 | 0,5 | 0 | 0,13560 | -0,00494 | 0,13569 |
| 15 | 0,5 | -0,21009 | 0,13610 | 0,04094 | 0,14212 |
| 16 | 0,5 | -0,42017 | 0,13733 | 0,08524 | 0,16164 |
| 17 | 0,5 | -0,63026 | 0,13628 | 0,12350 | 0,18391 |
| 18 | 0,5 | -0,84034 | 0,11491 | 0,14608 | 0,18586 |
| 19 | 0,405 | -0,84034 | -0,06277 | 0,16777 | 0,17913 |
| 20 | 0,31 | -0,84034 | 0,06173 | 0,18923 | 0,19904 |
| 21 | 0,215 | -0,84034 | 0,01723 | 0,20454 | 0,20526 |
| 22 | 0,12 | -0,84034 | 0,03691 | 0,19956 | 0,20294 |
| 23 | 0,1 | -0,86034 | 0,00534 | 0,18384 | 0,18392 |
| 24 | 0,1 | -0,97032 | -0,01139 | 0,14730 | 0,14774 |
| 25 | 0,1 | -1,0803 | -0,01116 | 0,10406 | 0,10466 |
| 26 | 0,1 | -1,1903 | -0,01152 | 0,06049 | 0,06158 |
| 27 | 0,1 | -1,3003 | -0,00132 | 0,03049 | 0,03052 |

Tabla 7: Perfil de deformación por tracción del volante de inercia teórico.

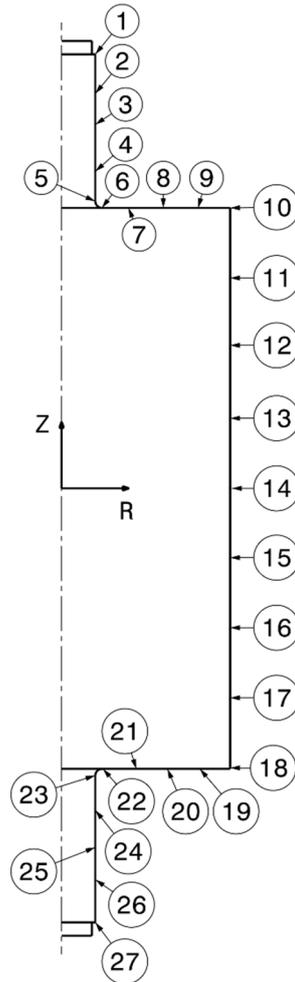


Figura 19: Esquema del perfil de puntos para el volante de inercia teórico.

Aplicando el estudio a los distintos volantes, con sus velocidades de funcionamiento correspondientes, se calculan los distintos perfiles.

Idealmente, se debe estudiar la deformación del volante en todos los nodos de la malla. Dada la complejidad de esa operación y la falta de medios para la realización de este trabajo, no va a ser posible. Así, se colocan puntos de estudio asegurando un mínimo de precisión. Por supuesto que, a mayor número de puntos calculados, mayor precisión tendrá el perfil.

Los estudios de deformación por tracción y los perfiles de los demás volantes se encuentran en el Anexo C.

5.1.2. Estudio de deformación térmica.

El siguiente parámetro a tener en cuenta en los volantes es el de la expansión térmica. La dilatación térmica es el efecto que se produce en un medio al cambiar la temperatura, variando una o varias de sus dimensiones. En este caso, se va a tratar la variación volumétrica.

La deformación térmica viene dada por la siguiente relación (30):

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_V \Delta T \quad (5.2)$$

Capítulo 5. Diseño de la superficie interior de la carcasa

Donde α_V es el coeficiente de dilatación volumétrico, $\Delta V/V$ el cambio de volumen respecto al volumen inicial, y ΔT la variación de temperatura.

De (30) se extrae que, para materiales isótropos, el coeficiente lineal es igual en todas las direcciones, por lo que:

$$\alpha_V = 3\alpha_L \quad (5.3)$$

Donde α_L es el coeficiente de dilatación lineal. De esta manera se puede calcular la deformación volumétrica utilizando el coeficiente de dilatación lineal y la diferencia de temperaturas que sufrirá el sólido.

Dado que se busca la deformación en sentido hacia la carcasa, se procederá a calcular la deformación al variar la temperatura desde la temperatura de trabajo hasta la temperatura máxima. Este análisis se realizará en todos los materiales salvo en el caso de la fibra de carbono, ya que este material es anisótropo y requiere consideraciones concretas.

En un principio se supone que la temperatura en la superficie del volante de la temperatura máxima de funcionamiento. Esta suposición se puede comprobar en el Apartado 7.4. *Estudio de transferencia de calor por radiación* y, si es una temperatura diferente, se deberá repetir el proceso de diseño e iterar la metodología hasta que converja la solución.

La fibra de carbono, al igual que varios materiales compuestos similares (como el kevlar), posee diferentes coeficientes de dilatación según la dirección de las fibras. Los coeficientes son negativos paralelos a las fibras, y positivos perpendicularmente a su longitud (31). El hecho de que la fibra de carbono tenga el coeficiente de dilatación térmica negativo implica que al aumentar la temperatura se contrae en esa dirección. Las deformaciones se ven más en detalle en el estudio del recuperador de frenada en vehículos híbridos, Anexo C.

A continuación, se presentan las deformaciones para el volante de inercia teórico y las tensiones que genera el cambio de temperaturas.

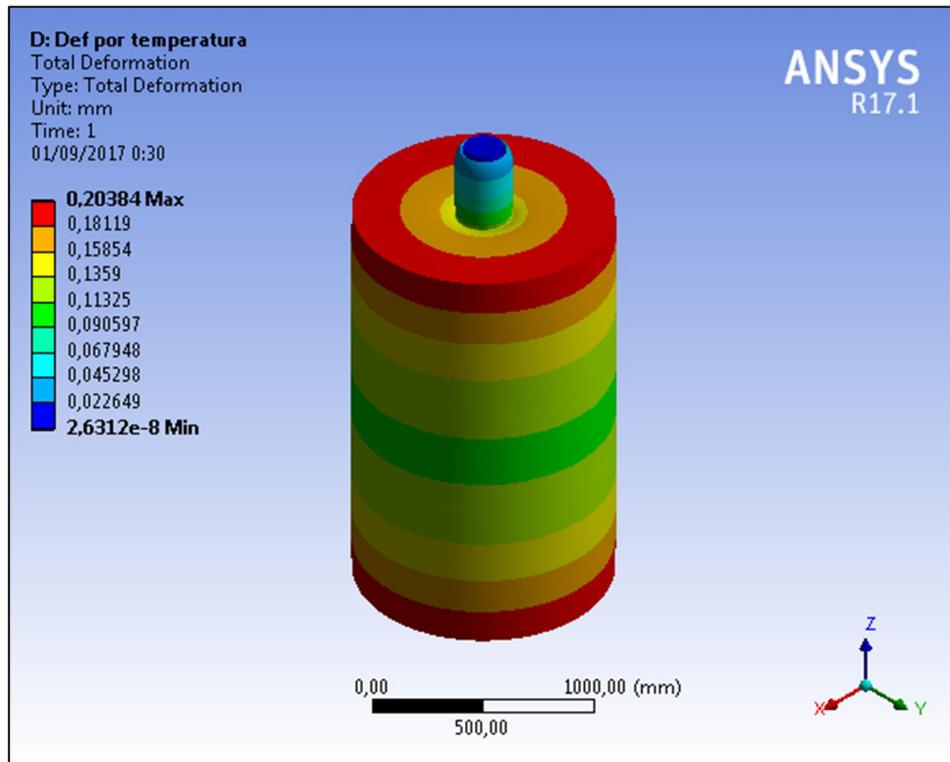


Figura 20: Deformación total del volante de inercia teórico por efecto de la temperatura.

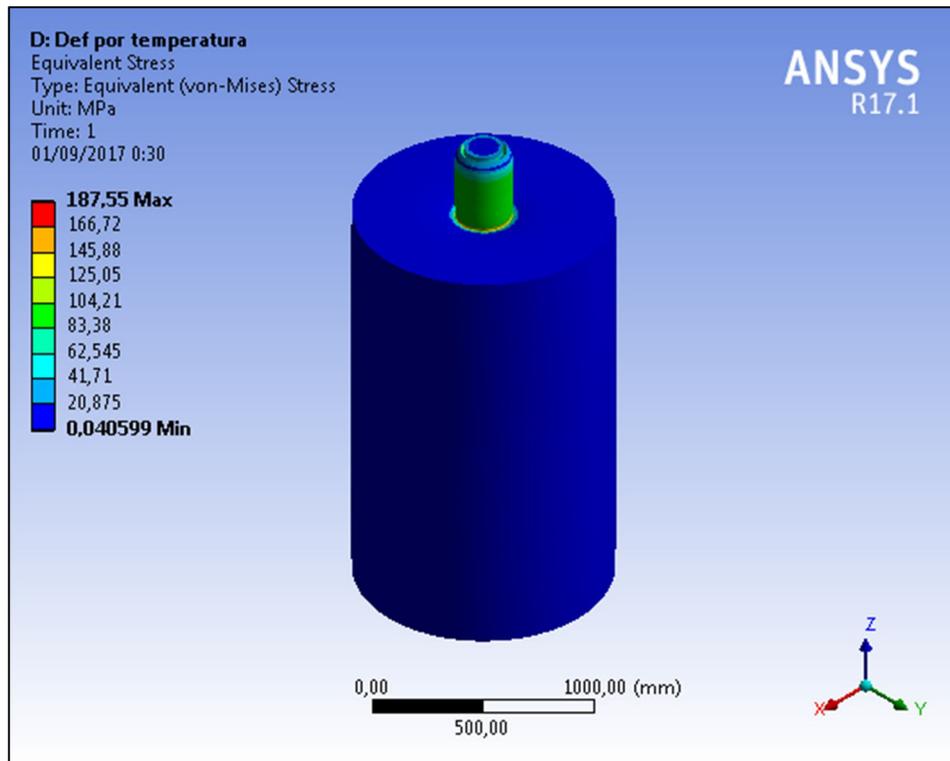


Figura 21: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico por efecto de la temperatura.

Estudiando la deformación en todos los puntos del volante, se obtiene el siguiente perfil:

| Volante de inercia teórico | | | | | |
|----------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,1 | 1,3003 | 0,00707 | 0,02978 | 0,03061 |
| 2 | 0,1 | 1,1903 | 0,03678 | 0,03181 | 0,04863 |
| 3 | 0,1 | 1,0803 | 0,03598 | 0,05997 | 0,06993 |
| 4 | 0,1 | 0,97032 | 0,03584 | 0,08852 | 0,09550 |
| 5 | 0,1 | 0,86034 | 0,02721 | 0,11831 | 0,12140 |
| 6 | 0,12 | 0,84034 | 0,02329 | 0,13993 | 0,14185 |
| 7 | 0,215 | 0,84034 | 0,02519 | 0,16180 | 0,16375 |
| 8 | 0,31 | 0,84034 | 0,04192 | 0,16817 | 0,17332 |
| 9 | 0,405 | 0,84034 | 0,01307 | 0,17130 | 0,17180 |
| 10 | 0,5 | 0,84034 | 0,10692 | 0,17351 | 0,20381 |
| 11 | 0,5 | 0,63026 | 0,11105 | 0,12790 | 0,16938 |
| 12 | 0,5 | 0,42017 | 0,11185 | 0,08370 | 0,13970 |
| 13 | 0,5 | 0,21009 | 0,11143 | 0,04147 | 0,11890 |
| 14 | 0,5 | 0 | 0,11122 | 0,00000 | 0,11122 |
| 15 | 0,5 | -0,21009 | 0,11143 | -0,04147 | 0,11890 |
| 16 | 0,5 | -0,42017 | 0,11185 | -0,08370 | 0,13970 |
| 17 | 0,5 | -0,63026 | 0,11105 | -0,12790 | 0,16938 |
| 18 | 0,5 | -0,84034 | 0,10692 | -0,17351 | 0,20381 |
| 19 | 0,405 | -0,84034 | 0,01307 | -0,17130 | 0,17180 |
| 20 | 0,31 | -0,84034 | 0,04192 | -0,16817 | 0,17332 |
| 21 | 0,215 | -0,84034 | 0,02519 | -0,16180 | 0,16375 |
| 22 | 0,12 | -0,84034 | 0,02329 | -0,13993 | 0,14185 |
| 23 | 0,1 | -0,86034 | 0,02721 | -0,11831 | 0,12140 |
| 24 | 0,1 | -0,97032 | 0,03584 | -0,08852 | 0,09550 |
| 25 | 0,1 | -1,0803 | 0,03598 | -0,05997 | 0,06993 |
| 26 | 0,1 | -1,1903 | 0,03678 | -0,03181 | 0,04863 |
| 27 | 0,1 | -1,3003 | 0,00707 | -0,02978 | 0,03061 |

Tabla 8: Perfil de deformación por dilatación térmica del volante de inercia teórico.

Habiendo utilizado el perfil de puntos de la figura 19. Los estudios de deformación por dilatación térmica y los perfiles de los demás volantes se encuentran en el Anexo C.

5.1.3. Perfil total de deformación.

Una vez calculada la deformación de los distintos fenómenos, se deben superponer para establecer la deformación total de los volantes. Además, se debe ver si la tensión máxima de los efectos combinados no supera el límite elástico. Para las temperaturas que se manejan, menores siempre a 200°C, la variación del límite elástico con la temperatura puede considerarse despreciable (32) (11).

De esta manera, se superponen los efectos. Para cada punto se deberá considerar la deformación máxima de cada efecto por separado o combinados. Dado que el efecto de tracción provoca deformaciones negativas en el eje X, en esos casos se deberá

considerar sólo la dilatación térmica. En el caso del eje Z, primarán los valores máximos en la parte positiva del eje. En la zona contraria tendrá más influencia las deformaciones negativas. Así, el perfil de deformaciones queda de la siguiente manera:

| Volante de inercia teórico | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,1 | 1,3003 | 0,00707 | 0,02978 | 0,03061 |
| 2 | 0,1 | 1,1903 | 0,03678 | 0,03181 | 0,04863 |
| 3 | 0,1 | 1,0803 | 0,03598 | 0,05997 | 0,06993 |
| 4 | 0,1 | 0,97032 | 0,03584 | 0,08852 | 0,09550 |
| 5 | 0,1 | 0,86034 | 0,03235 | 0,11831 | 0,12265 |
| 6 | 0,12 | 0,84034 | 0,06031 | 0,13993 | 0,15238 |
| 7 | 0,215 | 0,84034 | 0,04244 | 0,16180 | 0,16727 |
| 8 | 0,31 | 0,84034 | 0,10368 | 0,16817 | 0,19756 |
| 9 | 0,405 | 0,84034 | 0,01307 | 0,17130 | 0,17180 |
| 10 | 0,5 | 0,84034 | 0,22186 | 0,17351 | 0,28165 |
| 11 | 0,5 | 0,63026 | 0,24725 | 0,12790 | 0,27837 |
| 12 | 0,5 | 0,42017 | 0,24909 | 0,08370 | 0,26278 |
| 13 | 0,5 | 0,21009 | 0,24749 | 0,04147 | 0,25094 |
| 14 | 0,5 | 0 | 0,24682 | 0,00000 | 0,24682 |
| 15 | 0,5 | -0,21009 | 0,24753 | -0,04147 | 0,25098 |
| 16 | 0,5 | -0,42017 | 0,24918 | -0,08370 | 0,26286 |
| 17 | 0,5 | -0,63026 | 0,24733 | -0,12790 | 0,27844 |
| 18 | 0,5 | -0,84034 | 0,22183 | -0,17351 | 0,28163 |
| 19 | 0,405 | -0,84034 | 0,01307 | -0,17130 | 0,17180 |
| 20 | 0,31 | -0,84034 | 0,10365 | -0,16817 | 0,19754 |
| 21 | 0,215 | -0,84034 | 0,04242 | -0,16180 | 0,16727 |
| 22 | 0,12 | -0,84034 | 0,06019 | -0,13993 | 0,15233 |
| 23 | 0,1 | -0,86034 | 0,03254 | -0,11831 | 0,12270 |
| 24 | 0,1 | -0,97032 | 0,03584 | -0,08852 | 0,09550 |
| 25 | 0,1 | -1,0803 | 0,03598 | -0,05997 | 0,06993 |
| 26 | 0,1 | -1,1903 | 0,03678 | -0,03181 | 0,04863 |
| 27 | 0,1 | -1,3003 | 0,00707 | -0,02978 | 0,03061 |

Tabla 9: Perfil de deformación total del volante de inercia teórico.

Habiendo utilizado el perfil de puntos de la figura 19. Simulando los efectos combinados queda esta tensión máxima:

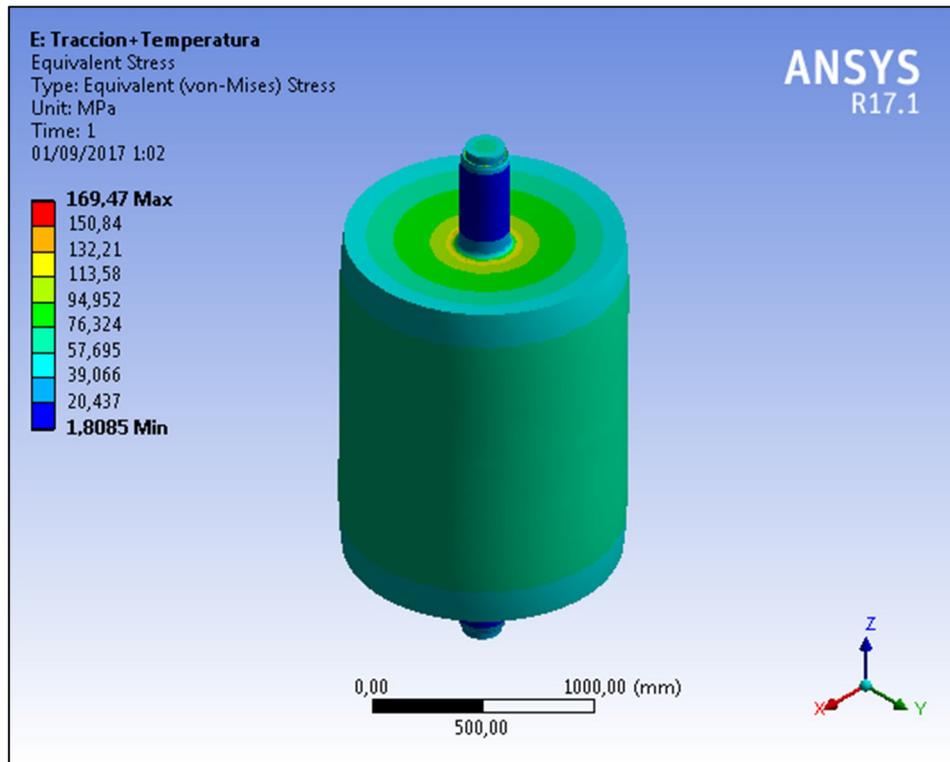


Figura 22: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico rotando a temperatura de 40°C.

La razón por la que la tensión combinada es inferior a la tensión de los efectos por separado, es porque las deformaciones en varios puntos del volante son contrarias. Así, si el volante de inercia está girando a su velocidad de funcionamiento y además se encuentra en su temperatura máxima, tendrá menos tensión que a temperatura ambiente⁴. Para la tensión máxima, se simula rotando a temperatura mínima.

⁴ Este efecto es válido para todos los volantes salvo en el recuperador de frenada. En ese caso el coeficiente de dilatación térmica en la dirección de las fibras es negativo y debe evaluarse las tensiones en las dos temperaturas máximas. También se ha estudiado para comprobar que no sobrepase el límite elástico.

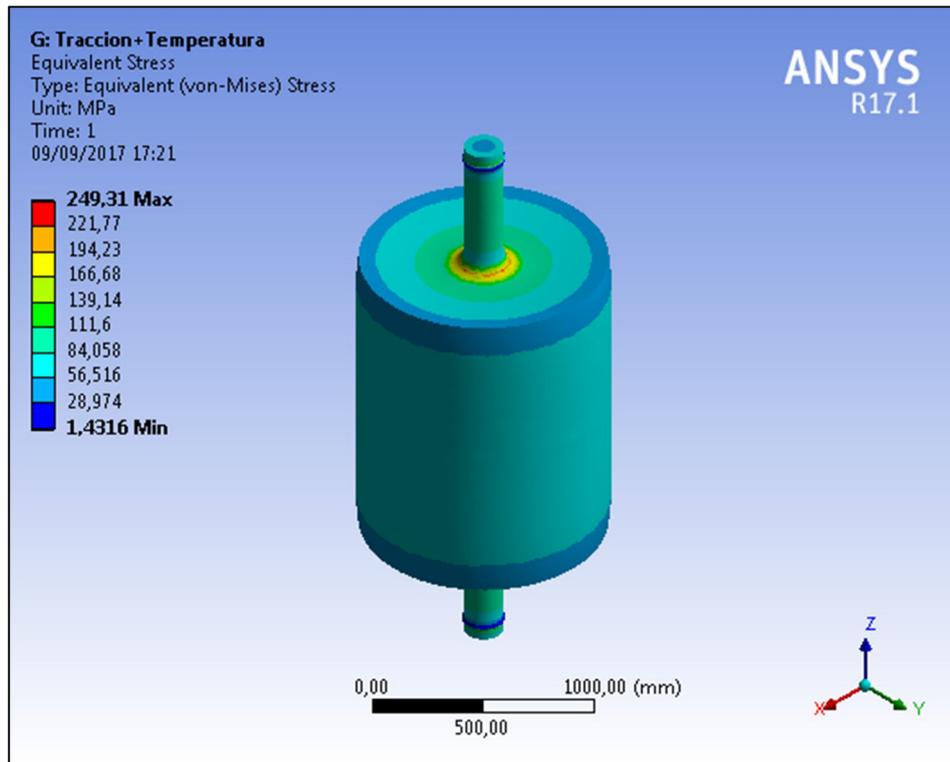


Figura 23: Distribución de tensiones del volante de inercia teórico rotando a temperatura de 19,5°C.

Como puede verse, no supera el límite elástico por lo que los valores se dan por buenos.

5.2. Estudio de vibraciones.

Las vibraciones son un estudio fundamental en toda estructura mecánica. Cualquier sistema mecánico sujeto a esfuerzos externos, como es el caso de los volantes de inercia, están sujetos a vibraciones y oscilaciones periódicas. Así, en este apartado se comprobará la deformación de los volantes por vibraciones, si comprometen o no a la carcasa protectora, y se asegurará la integridad de los volantes calculados para guardar coherencia.

En un principio se estudiarán los volantes de inercia sin amortiguamiento. Esta hipótesis no es real, y cambiará para comprobar la utilidad del uso de amortiguadores para disipar vibraciones (Apartado 5.2.3. *Posibles soluciones*).

5.2.1. Análisis modal.

Primero, se va a realizar un análisis modal de la estructura, determinando los primeros modos de vibración. Todas las estructuras tienen n modos de vibración, siendo estos los modos que tiene dicha estructura de vibrar a frecuencias que produzcan resonancia. La vibración de cualquier sistema se puede definir como un conjunto de modos de vibración (33).

La particularidad de los modos de vibración es que son característicos de cada sistema, sin depender de excitaciones externas. Además, si se determinan las frecuencias de los modos de vibración, las frecuencias normales, se especifica las frecuencias a las que la estructura resuena. Estas frecuencias son las que se deben evitar para asegurar la integridad del sistema.

Capítulo 5. Diseño de la superficie interior de la carcasa

El cálculo de los modos de vibración es muy interesante, ya que de esta manera se conoce las velocidades críticas del volante de inercia. Si coincide la frecuencia de giro con una frecuencia normal, el volante empezará a vibrar con una amplitud que teóricamente tiende a infinito (a no ser que se imponga amortiguamiento).

Aunque existen métodos matemáticos para calcularlos, se va a usar el programa ANSYS para determinar los modos de vibración. Se encontrarán todos los modos de vibración que estén en el rango de frecuencias de giro de cada volante, dando un margen de 40 Hz más para asegurarse de que no se está cerca del siguiente modo.

Así, los modos de vibración del volante de inercia teórico según ANSYS son:

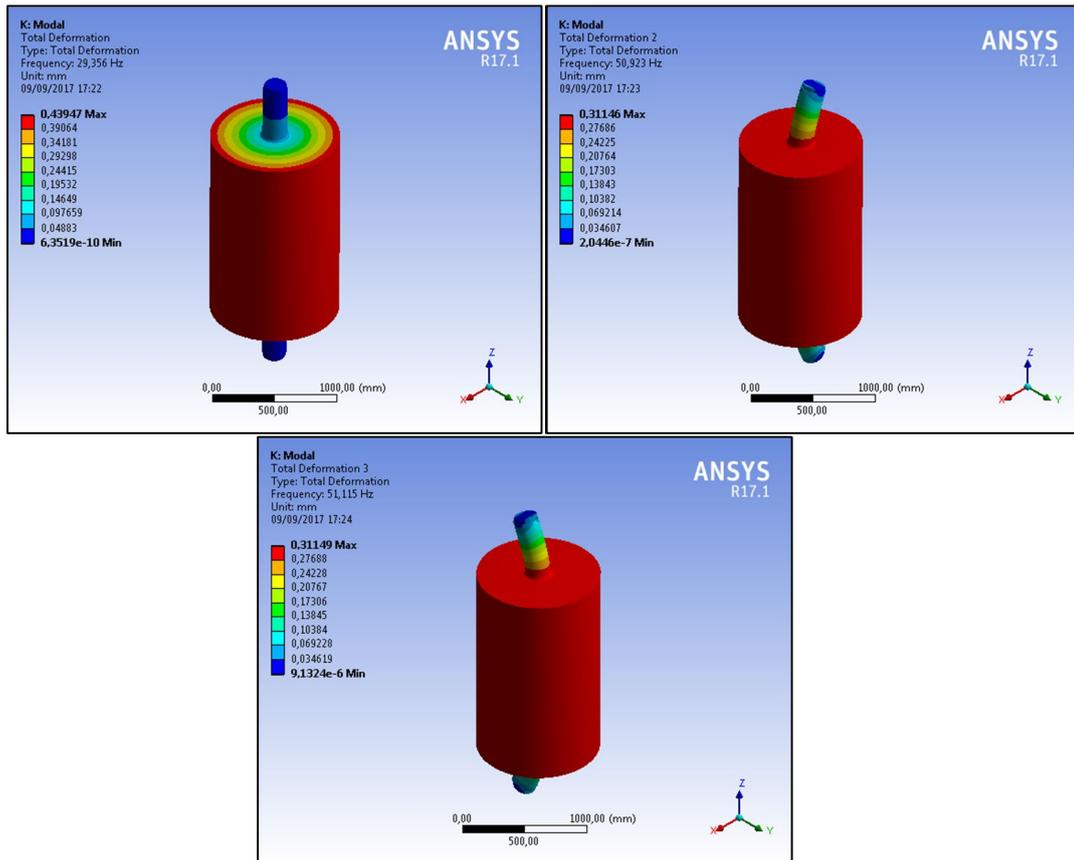


Figura 24: Tres primeros modos de vibración del volante de inercia teórico.

| Volante de inercia teórico | |
|----------------------------|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 29,356 |
| 2 | 50,923 |
| 3 | 51,115 |

Tabla 10: Modos de vibración del volante de inercia teórico según ANSYS.

Aunque el programa de estos modos de vibración por buenos, se debe considerar el error de cálculo del software. Como puede verse, existen modos de frecuencia casi idéntica, que el programa da por modos diferentes y buenos. Esto es un error, el programa no puede converger la solución y da dos modos de vibración cuando sólo existe uno. Además, si se estudian los resultados de esos modos, se puede ver que da el mismo modo de vibración en diferentes direcciones.

Así, los modos de vibración reales son los siguientes:

| Volante de inercia teórico | |
|-----------------------------------|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 29,356 |
| 2 | 51,019 |

Tabla 11: Modos de vibración del volante de inercia teórico corregidos.

Dando las siguientes velocidades críticas:

| Volante de inercia teórico | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Velocidad crítica | Velocidad de giro (rad/s) | Velocidad de giro (rpm) |
| 1 | 184,45 | 1761,36 |
| 2 | 320,56 | 3061,14 |

Tabla 12: Velocidades críticas del volante de inercia teórico.

Dado que la velocidad de giro del volante (3600 rpm) no coincide con ninguna frecuencia normal, el volante de inercia no entrará en resonancia en su velocidad de funcionamiento. No obstante, existen dos velocidades críticas por la que el volante pasará acelerándose. Por lo tanto, se deberá estudiar la manera de que el paso por esas frecuencias de resonancia no influya en el volante y, sobretodo, no provoque deformaciones superiores al hueco existente entre el volante y la carcasa.

Los análisis modales del resto de volantes de inercia se encuentran en el Anexo C.

5.2.2. Deformación causada por vibraciones.

Para este apartado, se va a estudiar únicamente el volante de inercia posicionado horizontalmente, el recuperador de frenada. Precisamente, el resto de volantes de inercia están colocados verticalmente para que el peso no provoque un esfuerzo flector. Además, al tener rodamientos magnéticos, se disminuye considerablemente y los errores de alineamiento enormemente. Por lo tanto, en esos casos únicamente se darán las soluciones para disminuir la vibración en las frecuencias normales, las cuales están en el apartado siguiente.

Para el recuperador de frenada ya se han estudiado los modos de vibración, siendo estos:

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | |
|---|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 9852,4 |
| 2 | 9913,6 |
| 3 | 10461 |
| 4 | 10644 |

Tabla 13: Modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos corregidos.

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | | |
|--|---------------------------|-------------------------|
| Velocidad crítica | Velocidad de giro (rad/s) | Velocidad de giro (rpm) |
| 1 | 61904,45 | 591.144,00 |
| 2 | 62288,99 | 594.816,00 |
| 3 | 65728,40 | 627.660,00 |
| 4 | 66878,22 | 638.640,00 |

Tabla 14: Velocidades críticas del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

En este caso particular, las frecuencias normales son tan altas que el volante de inercia no pasa por ninguna al acelerarse. La velocidad de funcionamiento (114.590 rpm) es muy inferior a las primeras velocidades críticas, por lo que se puede asegurar que nunca entrará en resonancia.

Mediante ANSYS, se simula la rotación del volante de inercia, variando de manera armónica el peso propio. La máxima deformación está en el centro del volante, por ser el punto más alejado de los apoyos y existir simetría. Así, se estudia la deformación de la superficie exterior del volante, dando estos resultados.

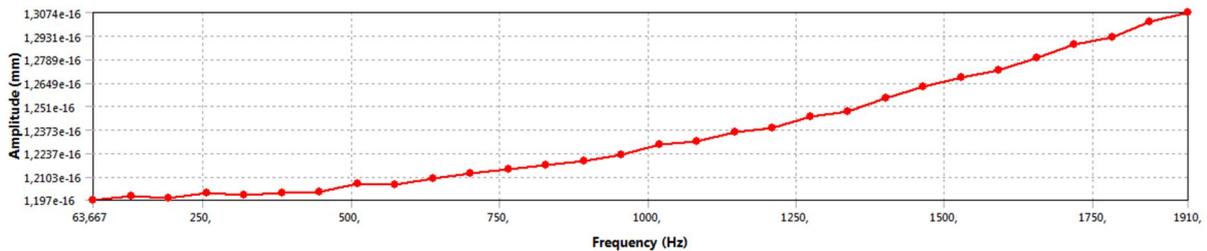


Figura 25: Gráfica de la deformación en función de la frecuencia de giro. Rango de funcionamiento.

Como se ha comentado, las frecuencias críticas son muy altas y, por ello, la deformación por vibración en el rango de funcionamiento es despreciable (del orden de 10^{-16} milímetros. Además, el hecho de que el peso de este volante sea muy pequeño provoca deformaciones pequeñas.

En el caso del recuperador de frenada, los rodamientos no son magnéticos, por lo que existe contacto entre el volante de inercia y el resto del sistema. Por ello, si las deformaciones fueran relevantes, se deberían encontrar soluciones para disminuir la deformación del eje y la transmisión de vibraciones al resto del sistema.

Este caso es el ideal y el que se debe buscar. Si se tiene un volante con frecuencias críticas más bajas que pasan por la frecuencia de funcionamiento (como en el caso del volante de inercia teórico) y tiene cargas armónicas (su propio peso), se debe evaluar la deformación de la misma manera.

El objetivo conseguir una deformación que sea inferior al 50% de la distancia entre el volante de inercia y la carcasa protectora. De esta manera se asegura la integridad de la estructura, ya que la carcasa también puede verse influenciada por vibraciones (Apartado 6.2. Estudio de vibraciones). Si se calcula una deformación superior, se deben optar por las siguientes soluciones propuestas.

5.2.3. Posibles soluciones.

Ya que el objetivo del trabajo no es el diseño del volante de inercia sino de su envolvente, no se van a estudiar exhaustivamente las soluciones para el problema. Sin embargo, sí se van a indicar dos propuestas de diseño que se deberán estudiar más a fondo:

- Introducir amortiguamiento: el amortiguamiento es un sistema que absorbe parte de las vibraciones, minimizando la deformación de la estructura. Colocando amortiguación en los rodamientos y variando la constante de amortiguamiento disminuye el movimiento del volante y, sobretodo, la propagación de las vibraciones al resto de la instalación.
- Variar la aceleración en las frecuencias críticas: pasar por las frecuencias de resonancia es inevitable si se tiene una frecuencia de funcionamiento mayor a estas. Para disminuir la vibración, se puede optar por acelerar en los puntos críticos minimizando el tiempo en el que el volante opera en ese régimen.

En cualquier caso, se debe establecer un protocolo de encendido y apagado del volante de inercia. Así, las vibraciones del volante de inercia no influyen de una manera determinante en la deformación del mismo, pudiendo determinar la deformación total que tendrá en su funcionamiento.

5.3. Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora.

A la hora de determinar la superficie interior, hay que sumar la tolerancia de la máquina de fabricación a la distancia entre el volante y la carcasa. Además, es conveniente establecer un margen de seguridad, aunque no demasiado grande como para aumentar demasiado el volumen de aire entre el volante y la carcasa.

Así, las superficies interiores de las carcasas quedan de la siguiente manera:

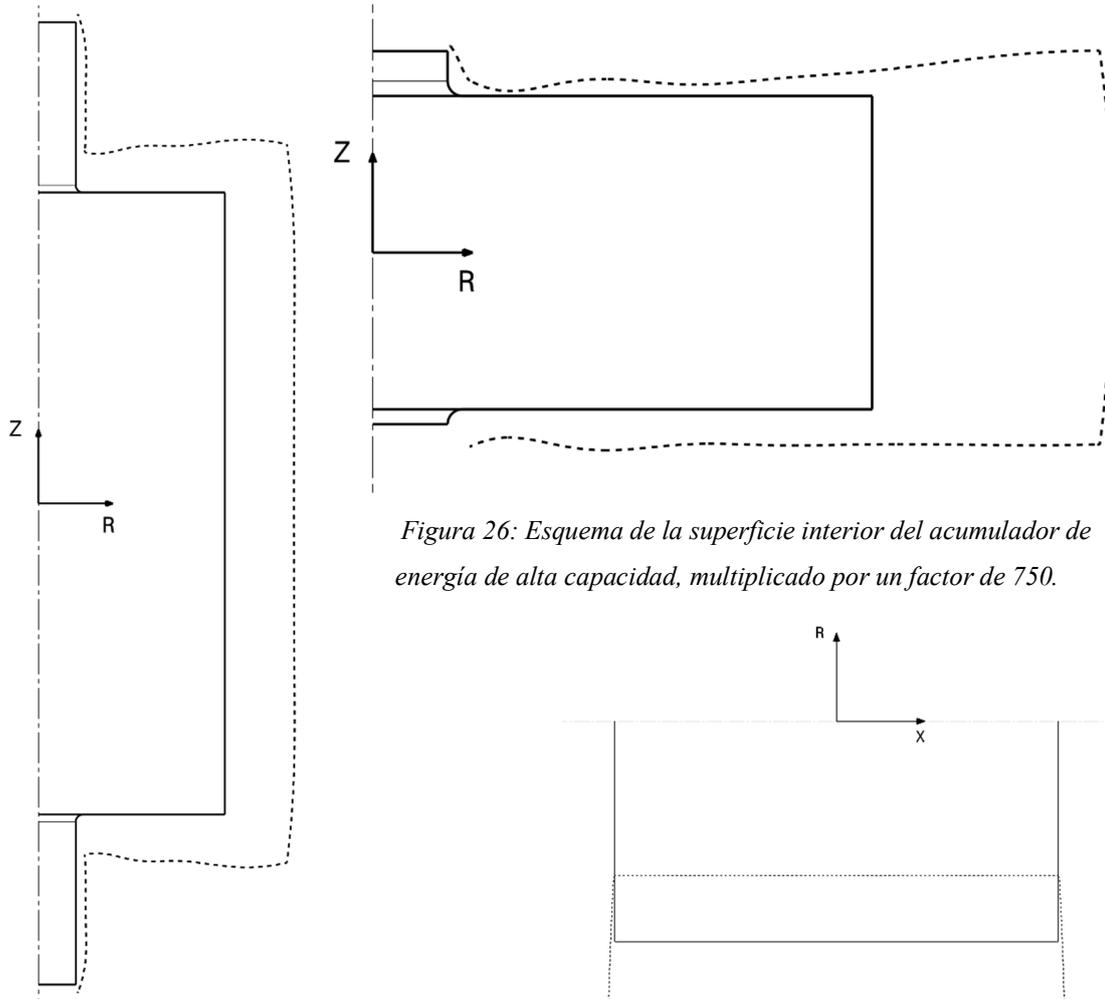


Figura 26: Esquema de la superficie interior del acumulador de energía de alta capacidad, multiplicado por un factor de 750.

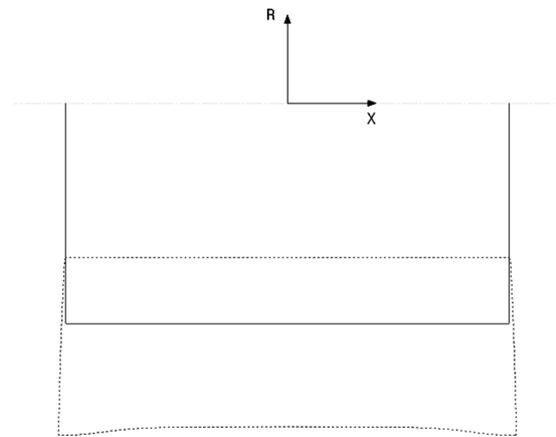


Figura 28: Esquema de la superficie interior del recuperador de frenada en vehículos híbridos, multiplicado por un factor de 500.

Figura 27: Esquema de la superficie interior del volante de inercia teórico, multiplicado por un factor de 750.

Las figuras mostradas son esquemáticas, multiplicando la deformación por un factor para exagerarlas y que se aprecie bien el perfil. Además, la deformación está corregida con los siguientes márgenes de seguridad y tolerancias de fabricación:

| Volante de inercia | Deformación máxima (mm) | Margen de Seguridad | Tolerancia de fabricación (micras) |
|--|--------------------------------|----------------------------|---|
| Volante de inercia teórico | 0,3397 | 1,2 | 1 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 0,7044 | 1,2 | 1 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | 1,0111 | 1,1 | 10 |

Tabla 15: Márgenes de seguridad y tolerancias de fabricación para los volantes de inercia.

Capítulo 5. Diseño de la superficie interior de la carcasa

Se da un margen de seguridad tan grande porque el perfil está calculado con pocos puntos. Como ya se comentó anteriormente, idealmente se debe calcular con cada nodo de la malla, obteniendo una gran precisión y pudiendo bajar el margen de seguridad hasta valores de 0-5%. Cuanto más ajustado sea el cálculo, menor margen de seguridad se necesitará. El margen de seguridad también se puede establecer por otros factores, por si el alineamiento de los rodamientos no es perfecto (generando vibraciones como en el caso del recuperador de frenada).

Los valores del perfil definitivo son los siguientes:

| Volante de inercia teórico | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,1 | 1,3003 | 0,00969 | 0,03694 | 0,03819 |
| 2 | 0,1 | 1,1903 | 0,04534 | 0,03937 | 0,06005 |
| 3 | 0,1 | 1,0803 | 0,04438 | 0,07316 | 0,08557 |
| 4 | 0,1 | 0,97032 | 0,04421 | 0,10742 | 0,11616 |
| 5 | 0,1 | 0,86034 | 0,04002 | 0,14317 | 0,14866 |
| 6 | 0,12 | 0,84034 | 0,07358 | 0,16912 | 0,18443 |
| 7 | 0,215 | 0,84034 | 0,05213 | 0,19536 | 0,20220 |
| 8 | 0,31 | 0,84034 | 0,12562 | 0,20300 | 0,23873 |
| 9 | 0,405 | 0,84034 | 0,01689 | 0,20676 | 0,20745 |
| 10 | 0,5 | 0,84034 | 0,26743 | 0,20941 | 0,33967 |
| 11 | 0,5 | 0,63026 | 0,29790 | 0,15468 | 0,33566 |
| 12 | 0,5 | 0,42017 | 0,30011 | 0,10164 | 0,31685 |
| 13 | 0,5 | 0,21009 | 0,29819 | 0,05097 | 0,30251 |
| 14 | 0,5 | 0 | 0,29738 | 0,00000 | 0,29739 |
| 15 | 0,5 | -0,21009 | 0,29824 | -0,05097 | 0,30256 |
| 16 | 0,5 | -0,42017 | 0,30022 | -0,10164 | 0,31696 |
| 17 | 0,5 | -0,63026 | 0,29800 | -0,15468 | 0,33575 |
| 18 | 0,5 | -0,84034 | 0,26740 | -0,20941 | 0,33964 |
| 19 | 0,405 | -0,84034 | 0,01689 | -0,20676 | 0,20745 |
| 20 | 0,31 | -0,84034 | 0,12557 | -0,20300 | 0,23870 |
| 21 | 0,215 | -0,84034 | 0,05210 | -0,19536 | 0,20219 |
| 22 | 0,12 | -0,84034 | 0,07343 | -0,16912 | 0,18437 |
| 23 | 0,1 | -0,86034 | 0,04025 | -0,14317 | 0,14872 |
| 24 | 0,1 | -0,97032 | 0,04421 | -0,10742 | 0,11616 |
| 25 | 0,1 | -1,0803 | 0,04438 | -0,07316 | 0,08557 |
| 26 | 0,1 | -1,1903 | 0,04534 | -0,03937 | 0,06005 |
| 27 | 0,1 | -1,3003 | 0,00969 | -0,03694 | 0,03819 |

Tabla 16: Perfil de deformación final del volante de inercia teórico.

| Acumulador de energía de alta capacidad | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,15 | 0,34513 | 0,06516 | 0,06749 | 0,09381 |
| 2 | 0,18 | 0,31513 | 0,14830 | 0,08424 | 0,17056 |
| 3 | 0,317 | 0,31513 | 0,05368 | 0,10074 | 0,11415 |
| 4 | 0,453 | 0,31513 | 0,25907 | 0,10385 | 0,27911 |
| 5 | 0,59 | 0,31513 | 0,23359 | 0,10450 | 0,25590 |
| 6 | 0,727 | 0,31513 | 0,35509 | 0,10456 | 0,37017 |
| 7 | 0,863 | 0,31513 | 0,42527 | 0,10453 | 0,43793 |
| 8 | 1 | 0,31513 | 0,66367 | 0,10455 | 0,67186 |
| 9 | 1 | 0,21009 | 0,68264 | 0,08166 | 0,68751 |
| 10 | 1 | 0,10504 | 0,69272 | 0,05876 | 0,69521 |
| 11 | 1 | 0 | 0,69577 | 0,00000 | 0,69669 |
| 12 | 1 | -0,10504 | 0,69251 | -0,12889 | 0,70440 |
| 13 | 1 | -0,21009 | 0,68222 | -0,12463 | 0,69351 |
| 14 | 1 | -0,31513 | 0,66301 | -0,13387 | 0,67639 |
| 15 | 0,863 | -0,31513 | 0,42460 | -0,10135 | 0,43652 |
| 16 | 0,727 | -0,31513 | 0,35446 | -0,07045 | 0,36139 |
| 17 | 0,59 | -0,31513 | 0,23310 | -0,04376 | 0,23717 |
| 18 | 0,453 | -0,31513 | 0,25838 | -0,03467 | 0,26070 |
| 19 | 0,317 | -0,31513 | 0,05361 | -0,03161 | 0,06224 |
| 20 | 0,18 | -0,31513 | 0,14776 | -0,01588 | 0,14861 |
| 21 | 0,15 | -0,34513 | 0,06248 | -0,00429 | 0,06263 |
| 22 | 0,15 | -0,36513 | 0,04480 | -0,00613 | 0,04521 |
| 23 | 0,15 | -0,38513 | 0,02973 | -0,01123 | 0,03178 |
| 24 | 0,15 | -0,40513 | 0,00702 | -0,01935 | 0,02058 |

Tabla 17: Perfil de deformación final del acumulador de energía de alta capacidad.

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje X (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje X (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | -0,07 | -0,1 | -0,01100 | -0,01100 | 0,01556 |
| 2 | -0,0775 | -0,1 | -0,51466 | -0,04011 | 0,51622 |
| 3 | -0,085 | -0,1 | -0,79706 | -0,05366 | 0,79886 |
| 4 | -0,0925 | -0,1 | -0,95585 | -0,06117 | 0,95780 |
| 5 | -0,1 | -0,1 | -1,00894 | -0,06628 | 1,01112 |
| 6 | -0,1 | -0,0875 | -1,00130 | -0,05118 | 1,00261 |
| 7 | -0,1 | -0,075 | -0,96792 | -0,03774 | 0,96865 |
| 8 | -0,1 | -0,0625 | -0,94806 | -0,02801 | 0,94848 |
| 9 | -0,1 | -0,05 | -0,94069 | -0,02171 | 0,94094 |
| 10 | -0,1 | -0,0375 | -0,93823 | -0,01765 | 0,93840 |
| 11 | -0,1 | -0,025 | -0,93706 | -0,01487 | 0,93718 |
| 12 | -0,1 | -0,0125 | -0,93635 | -0,01278 | 0,93644 |
| 13 | -0,1 | 0 | -0,93611 | 0,00000 | 0,93611 |
| 14 | -0,1 | 0,0125 | -0,93635 | 0,01278 | 0,93644 |
| 15 | -0,1 | 0,025 | -0,93706 | 0,01487 | 0,93718 |
| 16 | -0,1 | 0,0375 | -0,93823 | 0,01765 | 0,93840 |
| 17 | -0,1 | 0,05 | -0,94069 | 0,02171 | 0,94094 |
| 18 | -0,1 | 0,0625 | -0,94807 | 0,02802 | 0,94848 |
| 19 | -0,1 | 0,075 | -0,96792 | 0,03775 | 0,96866 |
| 20 | -0,1 | 0,0875 | -1,00130 | 0,05120 | 1,00261 |
| 21 | -0,1 | 0,1 | -1,00894 | 0,06628 | 1,01111 |
| 22 | -0,0925 | 0,1 | -0,95585 | 0,06117 | 0,95780 |
| 23 | -0,085 | 0,1 | -0,79706 | 0,05366 | 0,79886 |
| 24 | -0,0775 | 0,1 | -0,51466 | 0,04011 | 0,51622 |
| 25 | -0,07 | 0,1 | -0,01100 | 0,01100 | 0,01556 |

Tabla 18: Perfil de deformación final del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Los perfiles de puntos del acumulador de energía de alta capacidad y el recuperador de frenada en vehículos híbridos pueden verse en el Anexo C, figuras 47 y 55 respectivamente.

Capítulo 6

Análisis estructural de la carcasa protectora

Además de conseguir una presión baja en la envolvente del volante de inercia, la carcasa tiene otra función importante: la de carcasa protectora. Si por fallos o averías el volante se desestabilizase o fracturase, la carcasa ha de contener en lo posible el volante de inercia. De esta manera, se evitan averías de mayor grado y se protege el resto de la instalación.

Así, en este capítulo se determinarán las características y propiedades de la carcasa protectora. En el almacenador de energía de alta capacidad y el recuperador de frenada hay zonas en las que no se calcula la carcasa. En el caso del almacenador de energía de alta capacidad, el estator ocupa el eje superior y la carcasa debería envolverlo. En el caso del recuperador de frenada, la zona del eje junto a los brazos que soportan al volante no se calcula, por lo que en esa zona se supone una superficie recta.

6.1. Determinación de las características de la carcasa protectora.

6.1.1. Espesor y material.

Los primeros parámetros que se van a fijar son los del espesor y material de la carcasa. Para ello se va a tener en cuenta dos aspectos clave: los esfuerzos que deberá soportar y la aplicación que tendrá el volante de inercia.

La carcasa protectora está continuamente sujeta a tensiones que ejerce el gas que contiene (ecuación 7.6). Las propiedades del fluido se determinarán en Capítulo 7. *Análisis de fluidos de la envolvente*, pero se puede suponer que para el cálculo del espesor de la carcasa son irrelevantes para este estudio. La principal razón es que la carcasa debe estar diseñada para contener al volante de inercia en caso de accidente, y las tensiones que generaría el volante son muy superiores a las que genera el fluido en funcionamiento.

Para calcular las características de la carcasa se va a usar el concepto de tenacidad. El módulo de tenacidad de un material es la cantidad de energía que puede absorber antes de que se fracture (34). Este punto de deformación implica que el material ya ha plastificado, por lo que no volvería a recuperar sus propiedades. Se va a usar el módulo de tenacidad y no el módulo de resiliencia (cantidad de energía que puede absorber antes de que empiece a plastificar) porque implica absorber mucha más cantidad de energía y, dado que es en caso de accidente, se puede diseñar al fallo.

Capítulo 6. Análisis estructural de la carcasa protectora

El módulo de tenacidad se puede definir como el área que encierra la curva de tensión-deformación de cualquier material:

$$\text{Módulo de Tenacidad} = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon = \frac{\text{Energía}}{\text{Volumen}} \quad (6.1)$$

Donde ε es la deformación, σ la tensión y ε_f es la deformación última.

Experimentalmente, se mide mediante el test de impacto de Charpy (35). Este ensayo consiste en golpear mediante un péndulo una probeta normalizada (Norma UNE-EN ISO 148-1:2017). Restando las energías potenciales antes y después del impacto se puede calcular la energía que acumula la probeta.

Para realizar este apartado se van a realizar una serie de suposiciones, con tal de dar un valor seguro.

Si se desestabilizase el volante, dado que el hueco entre el volante y la carcasa es muy pequeño, rozaría y empezaría a perder energía en forma de calor. Después, iría chocando contra las paredes interiores de la carcasa en diferentes puntos perdiendo poco a poco energía en cada una de ellas. Se va a suponer que toda la energía que almacena el volante es absorbida por la carcasa protectora, deformándose por igual en todos los puntos. Como es una suposición arriesgada (en la realidad comenzará a chocar en puntos concretos) se aplica un coeficiente de seguridad y se propone una solución para disipar la energía restante (Apartado 8.1. *Sistema de seguridad adicional*). Además, el hueco es muy pequeño en comparación con las dimensiones del volante, por lo que suponer que el choque es en zonas y no en puntos no es demasiado desacertado.

De esta manera, si se tiene el módulo de tenacidad y la energía que debe absorber (la energía cinética del volante de inercia), se puede obtener el volumen de la carcasa. El volumen de la carcasa se va a calcular a partir de la superficie del volante, ya que se diferencia de la superficie de la carcasa en décimas de milímetro y simplifica los cálculos. Aunque después el espesor sea muy ligeramente inferior en la realidad, este cálculo se compensa sobradamente con la suposición anterior de que no existe pérdida de energía en forma de calor.

Dado que la mayor parte de la energía está contenida en el volante de inercia, se va a estudiar el espesor en la parte de la carcasa que la recubre. El espesor necesario para contener el eje será bastante menor, pero se dejará constante para ganar estabilidad. Así, de manera típica el volumen de la zona de la carcasa que recubre el volante es:

$$V = \pi e(R^2 - R_{eje,s}^2) + \pi e(R^2 - R_{eje,i}^2) + L\{\pi(R + e)^2 - \pi R^2\} \quad (6.2)$$

Donde e es el espesor de la carcasa, R el radio del volante de inercia, $R_{eje,s}$ el radio del eje superior, $R_{eje,i}$ el radio del eje inferior y L la longitud del volante de inercia. Los dos primeros sumandos corresponden a las zonas superior e inferior del volante, y el tercero a la superficie cilíndrica exterior. Simplificando la ecuación:

$$V = \pi e\{2R^2 - R_{eje,s}^2 - R_{eje,i}^2 + L(e + 2R)\} \quad (6.3)$$

Caracterizando la ecuación para los valores de las carcasas:

| Carcasa protectora | Volumen (m³) |
|--|--------------------------------|
| Volante de inercia teórico | $5,280e^2 + 6,599e$ |
| Acumulador de energía de alta capacidad | $1,980e^2 + 9,678e$ |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | $0,628e^2 + 0,178e$ |

Tabla 19: Volumen de la parte de la carcasa que recubre el volante, para cada volante de inercia en función del espesor.

Sustituyendo el valor del volumen y el valor de la energía cinética acumulada (sin tener en cuenta el eje) en la ecuación (6.1) quedarían las siguientes relaciones, expresando el módulo de Tenacidad en MJ/m³ y el espesor en metros:

- Volante de inercia teórico:

$$\text{Módulo de Tenacidad} = \frac{103,62}{5,280e^2 + 6,599e} \quad (6.4)$$

- Acumulador de inercia de alta capacidad:

$$\text{Módulo de Tenacidad} = \frac{214,03}{1,980e^2 + 9,678e} \quad (6.5)$$

- Recuperador de frenada en vehículos híbridos:

$$\text{Módulo de Tenacidad} = \frac{4,58}{0,505e^2 + 0,161e} \quad (6.6)$$

Para elegir el material se van a comparar diferentes opciones dependiendo de la aplicación. En general deben ser materiales con elevado módulo de tenacidad, lo que significa que además de resistentes sean dúctiles. Además, dado que va a ser mecanizada por torno (para contornear la superficie interior) y debe tener propiedades estructurales buenas, los materiales que se van a evaluar son todos metálicos.

Capítulo 6. Análisis estructural de la carcasa protectora

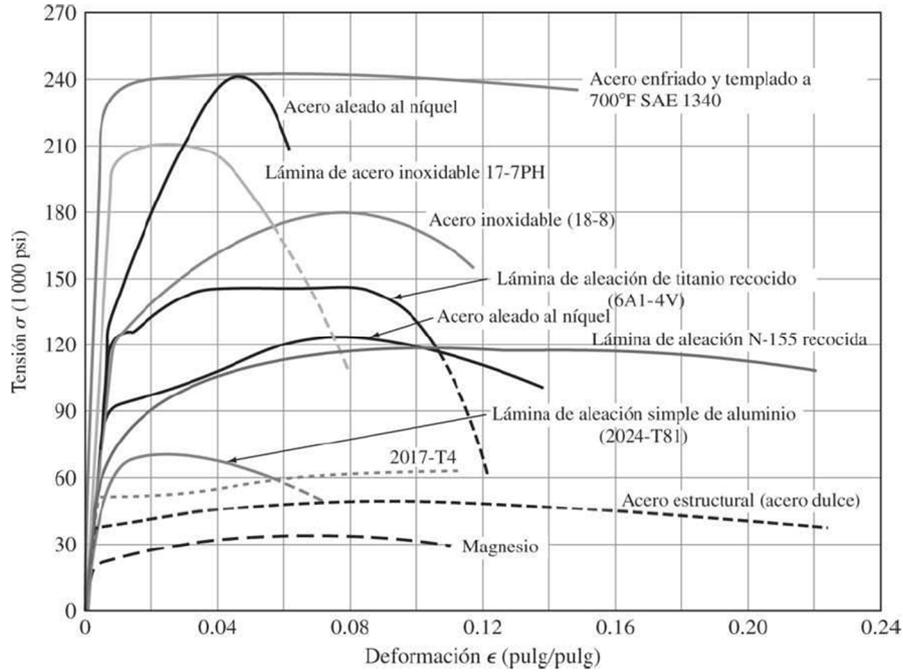


Figura 29: Comparación de curvas de tensión-deformación de diferentes materiales (34).

Después, dependiendo de la aplicación se requerirá algún otro factor, como que sea ligero en caso de utilizarlo para el transporte. Para calcular los módulos de tenacidad se va a integrar la curva de tensión-deformación para hallar. La ecuación de Holloman aproxima con precisión la curva para cada material (35), siendo esta:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (6.7)$$

Donde K es el coeficiente de resistencia y n el exponente de endurecimiento por deformación. Los valores característicos de los materiales que se van a evaluar son:

| Material | K (MPa) | n |
|---|---------|------|
| Aluminio 1100-O | 180 | 0,20 |
| Aluminio 2024-T3 | 780 | 0,17 |
| Aluminio 2024-T4 | 690 | 0,16 |
| Aluminio 6061-T6 | 410 | 0,05 |
| Aluminio 7075-O | 400 | 0,17 |
| Cobre recocido | 315 | 0,54 |
| Latón 70-30 recocido | 900 | 0,49 |
| Latón 85-15, laminado en frío | 580 | 0,34 |
| Acero bajo carbono recocido | 600 | 0,21 |
| Acero 4135 recocido | 1015 | 0,17 |
| Acero 4135 laminado en frío | 1100 | 0,14 |
| Acero 4340 templado | 2650 | 0,12 |
| Acero inoxidable 304 recocido | 1275 | 0,45 |
| Acero inoxidable 410 recocido | 960 | 0,10 |
| Aleación con base cobalto, tratado térmicamente | 2070 | 0,50 |
| Aleación de titanio 8Al-1Mo-1V | 1575 | 0,08 |

Tabla 20: Valores de K y n para diferentes materiales (35) (36).

Integrando la ecuación (6.1) utilizando como curva la ecuación de Holloman:

$$\text{Módulo de Tenacidad} = \int_0^{\varepsilon_f} K \varepsilon^n d\varepsilon = \frac{K \varepsilon_f^{n+1}}{n+1} \quad (6.8)$$

Donde la deformación última para cada material es:

Capítulo 6. Análisis estructural de la carcasa protectora

| Material | Ductilidad (%) |
|---|-----------------------|
| Aluminio 1100-O | 30,00 |
| Aluminio 2024-T3 | 18,00 |
| Aluminio 2024-T4 | 20,00 |
| Aluminio 6061-T6 | 17,00 |
| Aluminio 7075-O | 16,00 |
| Cobre recocido | 55,00 |
| Latón 70-30 recocido | 64,00 |
| Latón 85-15, laminado en frío | 55,00 |
| Acero bajo carbono recocido | 25,00 |
| Acero 4135 recocido | 30,00 |
| Acero 4135 laminado en frío | 28,00 |
| Acero 4340 templado | 44,00 |
| Acero inoxidable 304 recocido | 45,00 |
| Acero inoxidable 410 recocido | 29,50 |
| Aleación con base cobalto, tratado térmicamente | 53,00 |
| Aleación de titanio 8Al-1Mo-1V | 15,00 |

Tabla 21: Deformación antes de la rotura para diferentes materiales (37) (32).

Con lo que quedan los siguientes materiales:

| Material | Densidad (g/cm³) | Módulo de tenacidad (MJ/m³) |
|---|------------------------------------|---|
| Aluminio 1100-O | 2,705 | 35,37 |
| Aluminio 2024-T3 | 2,77 | 89,66 |
| Aluminio 2024-T4 | 2,77 | 91,96 |
| Aluminio 6061-T6 | 2,70 | 60,75 |
| Aluminio 7075-O | 2,80 | 40,06 |
| Cobre recocido | 8,89 | 81,46 |
| Latón 70-30 recocido | 8,53 | 310,65 |
| Latón 85-15, laminado en frío | 8,83 | 194,27 |
| Acero bajo carbono recocido | 8,90 | 92,66 |
| Acero 4135 recocido | 7,85 | 212,09 |
| Acero 4135 laminado en frío | 7,85 | 226,07 |
| Acero 4340 templado | 7,85 | 943,40 |
| Acero inoxidable 304 recocido | 8,03 | 276,25 |
| Acero inoxidable 410 recocido | 7,80 | 227,87 |
| Aleación con base cobalto, tratado térmicamente | 8,80 | 532,47 |
| Aleación de titanio 8Al-1Mo-1V | 4,37 | 189,01 |

Tabla 22: Densidad y módulo de tenacidad para diferentes materiales (37) (32).

Así, se va a elegir los materiales con el módulo de tenacidad más alto, para disminuir el espesor de la carcasa. En este paso se puede tener en cuenta también el factor del coste de material por volumen, pero para este trabajo no se va a tener en cuenta. Las aplicaciones de estos materiales son muy diversas por sus otras características (alta resistencia o baja densidad). Para esta aplicación, únicamente deben tener alta ductilidad por lo que no se valorarán más factores⁵. Dado que todos los materiales son metales utilizados en construcción o industria, se suponen perfectamente capaces de soportar las tensiones que van a sufrir en el funcionamiento, las cuales son mínimas.

Así, los materiales elegidos con sus principales características son:

⁵ Se puede tener en cuenta el factor de dilatación térmica. Como se verá a continuación, a menor coeficiente de dilatación, menor deformación de la carcasa. Como los aceros tienen el coeficiente muy similar no se considera importante en este apartado.

| Material | Densidad (g/cm ³) | Módulo de elasticidad (GPa) | Coefficiente de Poisson | Límite elástico (MPa) | Tensión de rotura (MPa) | Coefficiente de dilatación térmica lineal ⁶ (10 ⁻⁶ /°C) | Conductividad térmica (W/K·m) |
|---|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|---|-------------------------------|
| Acero 4340 templado | 7,85 | 200 | 0,30 | 1005 | 1095 | 12,30 | 44,50 |
| Aleación con base cobalto, tratado térmicamente | 8,80 | 210 | 0,33 | 464 | 740 | 11,90 | 10,80 |

Tabla 23: Propiedades de los materiales considerados (32) (30).

Las carcasas protectoras de los volantes de inercia tienen las siguientes características:

| Carcasa protectora | Material | Espesor ⁷ (cm) |
|--|---|---------------------------|
| Volante de inercia teórico | Aleación con base cobalto, tratado térmicamente | 3,5 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | Acero 4340 templado | 2,8 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | Acero 4340 templado | 3,0 |

Tabla 24: Espesor y material para las diferentes carcasas protectoras.

Idealmente, la carcasa protectora del recuperador de frenada debería ser de un material de baja densidad y alta resistencia, como el titanio. El principal problema es que el espesor de la carcasa para los materiales considerados sería demasiado grande (10 centímetros para el titanio) y no es compatible con su aplicación.

Para añadir seguridad y contrarrestar el problema de acumulación de tensión en puntos concretos se propone el siguiente sistema de seguridad: frenar el volante de inercia mediante un fluido viscoso. Este sistema se puede ver en el Apartado 8.1. *Sistema de seguridad adicional.*

6.1.2. Corrección de la superficie interior.

Como se indicó anteriormente, aún no está calculada la superficie interior de la carcasa definitiva. A los cálculos del capítulo anterior deben añadirse un factor importante: la deformación por dilatación térmica de la carcasa.

Al igual que el volante de inercia, la carcasa protectora sufrirá deformaciones en sentido hacia fuera. Por ello, al trabajar a temperatura máxima, la carcasa se dilataría y no cumpliría el perfil diseñado en el apartado anterior. El inconveniente de este estudio es que se necesita la estructura original a partir de la superficie máxima. La deformación volumétrica viene dada por la ecuación (5.2) pero, dado la irregularidad de los volúmenes de la carcasa, no se puede establecer con precisión cuanto se deforma cada

⁶ El coeficiente de dilatación térmica se considera constante para temperaturas menores a 100°C (30).

⁷ Al espesor se le ha aplicado un margen de seguridad del 20%.

longitud (en las tres coordenadas). Es por ello por lo que se va solucionar el problema de manera iterativa, partiendo de una deformación térmica inicial dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta e}{d + e} = \alpha_L \Delta T \quad (6.9)$$

Donde Δe es la variación de espesor de la carcasa y d la distancia desde el punto en el que se está evaluando la ecuación hasta el eje de coordenadas más próximo, de forma perpendicular a la superficie. Dado que es una primera solución, no hace falta escoger la distancia muy detallada, con escoger en el orden de milímetros es suficiente. En la figura 30 hay varios ejemplos de esta distancia:

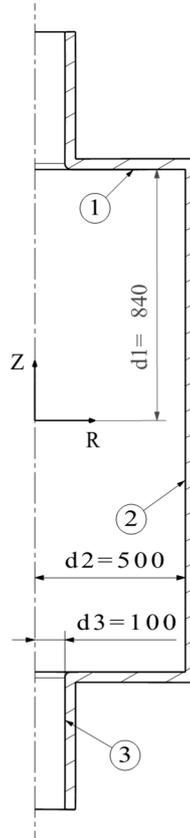


Figura 30: Distancia d genérica para varios puntos del perfil de la carcasa protectora.

De esta manera, se supone que la dilatación es lineal y perpendicular a la normal de la superficie en la que se evalúa. Se van a utilizar los perfiles de deformación finales del capítulo anterior, sumando en cada punto su correspondiente Δe . Así, se diseñan las carcasas protectoras iniciales y se simulan imponiendo su temperatura máxima. Después se compara el valor de deformación máxima supuesto con el real. Si la diferencia entre ambas es mayor que el error requerido, se diseña otra carcasa utilizando la deformación que dé el programa ANSYS y se vuelve a iterar. El objetivo es que, mediante sucesivas iteraciones, el problema vaya convergiendo. El error en este caso será la tolerancia de la máquina que fabrique la carcasa, mostrada en la tabla 15.

| Carcasa protectora del volante de inercia teórico | | | | |
|--|---------------------------------|--------------------------|------------|--------------------------|
| Iteración 0 | | | | |
| Zona | Deformación supuesta (mm) | Deformación real (mm) | Error (mm) | Validez (Error<0,001) |
| Eje superior | 0,02916 | 0,02306 | 0,00610 | No válido |
| Disco superior | 0,18900 | 0,17496 | 0,01404 | No válido |
| Radio exterior | 0,11556 | 0,11706 | -0,00150 | No válido |
| Disco inferior | 0,18900 | 0,09825 | 0,09075 | No válido |
| Eje inferior | 0,02916 | 0,02302 | 0,00614 | No válido |
| Iteración 1 | | | | |
| Zona | Deformación supuesta (mm) | Deformación real (mm) | Error (mm) | Validez (Error<0,001) |
| Eje superior | 0,02306 | 0,02308 | -0,00001 | Válido |
| Disco superior | 0,17496 | 0,17510 | -0,00014 | Válido |
| Radio exterior | 0,11706 | 0,11717 | -0,00011 | Válido |
| Disco inferior | 0,09825 | 0,09828 | -0,00003 | Válido |
| Eje inferior | 0,02302 | 0,02311 | -0,00009 | Válido |

Tabla 25: Resultados de las iteraciones del cálculo de la superficie interior corregida. Resultados de la carcasa protectora del volante de inercia teórico.

Para la carcasa del volante de inercia, la deformación supuesta va convergiendo con respecto a la real en cada iteración. Las coordenadas de los puntos que conforman superficie de la carcasa definitiva se encuentran en el Anexo E.

El resto de estudios iterativos para los demás volantes se encuentran en el Anexo E. Con este apartado, queda corregida la superficie interna de la carcasa protectora, determinándose así todas las características dimensionales y propiedades mecánicas de la misma.

| Carcasa protectora | Zona | Corrección (mm) |
|--|----------------|----------------------------|
| Volante de inercia teórico | Eje superior | 0,023 |
| | Disco superior | 0,175 |
| | Radio exterior | 0,117 |
| | Disco inferior | 0,098 |
| | Eje inferior | 0,023 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | Disco superior | 0,122 |
| | Radio exterior | 0,216 |
| | Disco inferior | 0,021 |
| | Eje inferior | 0,018 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | Disco superior | 0,078 |
| | Radio exterior | 0,156 |
| | Disco inferior | 0,090 |

Tabla 26: Correcciones de la superficie interior de cada zona de las distintas carcasas protectoras.

Así, las carcasas protectoras quedarían definidas totalmente.

| Carcasa protectora | Material | Espesor (cm) | Masa (Kg) |
|--|---|--------------|-----------|
| Volante de inercia teórico | Aleación con base cobalto, tratado térmicamente | 3,5 | 2412,77 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | Acero 4340 templado | 2,8 | 2161,98 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | Acero 4340 templado | 3,0 | 57,50 |

Tabla 27: Carcasas protectoras y sus principales características.

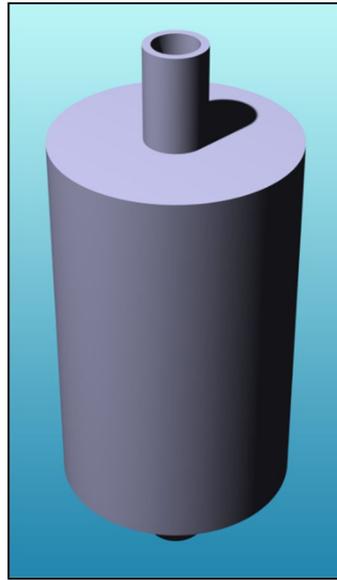


Figura 31: Carcasa protectora del de energía de alta capacidad.

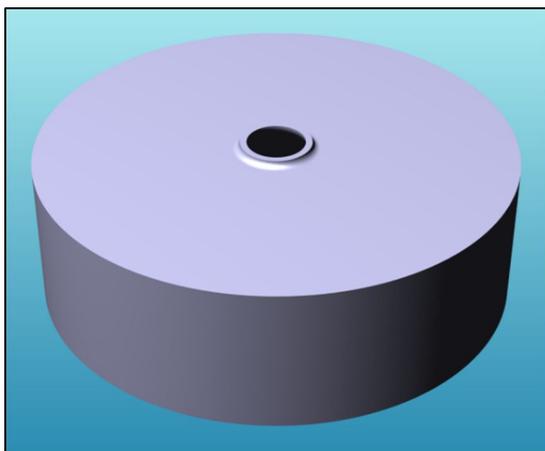


Figura 33: Carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad.

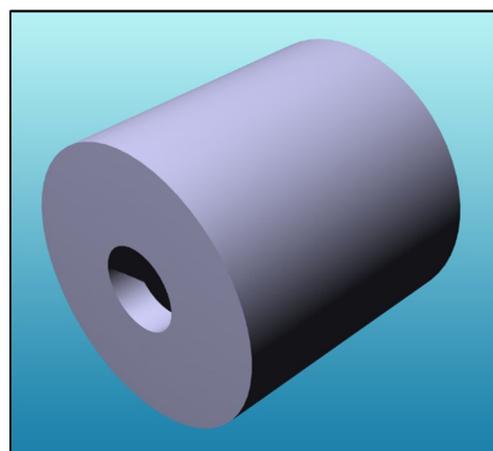


Figura 32: Carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad.

6.2. Estudio de vibraciones.

Una vez diseñada la carcasa protectora, se va a realizar un estudio de vibraciones de la misma. Al igual que en los volantes de inercia, es importante calcular los modos de vibración de la carcasa y encontrar las frecuencias normales. Una vez obtenidas se comparan con los modos de vibración de sus respectivos volantes para asegurar que no coincidan.

En el caso de usar rodamientos magnéticos se elimina la propagación de vibraciones a la carcasa desde el volante, por lo que en los casos estudiados sólo es crítico el caso del recuperador de frenada. A pesar de eso, se van a calcular los principales modos de vibración de todos los volantes para ver todos los casos.

Así, realizando un análisis modal de las carcasas, quedan las siguientes frecuencias normales:

| Carcasa protectora | Frecuencia de trabajo (Hz) | Frecuencias normales (Hz) |
|--|-----------------------------------|----------------------------------|
| Volante de inercia teórico | 64 | 75,29 |
| | | 79,2 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 37,4 | 29,892 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | 1910 | 2966,6 |

Tabla 28: Primeras frecuencias normales de las carcasas protectoras frente a las frecuencias de trabajo de sus volantes de inercia.

El cálculo de los modos está más detallado en el Anexo D.

Como puede verse, hay pocos modos de vibración del orden de la frecuencia de trabajo de los volantes. Tan solo la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad posee un modo de vibración en el rango de frecuencias de trabajo.

Dado que el caso crítico es el recuperador de frenada y posee frecuencias de resonancia muy elevadas, la propagación de vibraciones tendrá poca importancia. Además, en ese volante existe una deformación por vibraciones mínima (por su poca masa), por lo que puede suponer que la carcasa protectora no chocará por transmisión de vibraciones.

Capítulo 7

Análisis de fluidos de la envolvente

Para aumentar la eficiencia del volante de inercia, hay que reducir las pérdidas de energía todo lo posible. Al ser las pérdidas aerodinámicas las principales fuentes de rozamiento, hay que realizar un estudio sobre las mismas.

7.1. Estudio del fluido. Turbulencia.

Primeramente, se va a concretar el fluido de trabajo que va a ocupar el espacio entre el volante de inercia y la carcasa protectora. El gas que se va a suponer en este apartado es el aire, y éste se va a suponer como un gas ideal caloríficamente perfecto. La ecuación de estado para los gases ideales se define como:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{R_u}{M} T \quad (7.1)$$

Donde P es la presión del gas, ρ la densidad, M la masa molecular, T la temperatura y R_u la constante universal de los gases, que es:

$$R_u = 8,314 \frac{J}{Kmol} \quad (7.2)$$

Dado que se va a trabajar con un gas en concreto, el aire, se puede trabajar con la constante de los gases R . Sabiendo que la masa molecular del aire es 29 g/mol, se define R como:

$$R = \frac{R_u}{M} = 0,287 \cdot 10^3 \frac{m^2}{Ks^2} \quad (7.3)$$

Quedando la ecuación de estado:

$$\frac{P}{\rho} = 287T \quad (7.4)$$

Donde las variables están expresadas en el Sistema Internacional.

Otra variable de estudio es la relación de calores específicos, siendo esta:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (7.5)$$

Donde C_p es el calor específico a presión constante y C_v es el calor específico a volumen constante. La relación de calores específicos tiene valor de 7/5 en gases biatómicos y de 5/3 en gases monoatómicos. Al ser el aire un gas biatómico, se tomará el valor de 1,4 (38).

El gas está comprendido entre las paredes del volante de inercia y la pared de la carcasa protectora. Por el efecto de la viscosidad el fluido que está en contacto con las paredes adquiere la velocidad de estas (39), por lo que existe una zona del fluido a altas velocidades mientras que la zona pegada a la carcasa se mantiene estática.

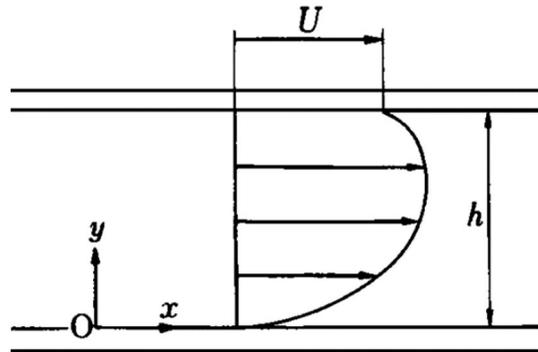


Figura 34: Perfil de velocidades típico de un flujo de Couette⁸ (39).

Este movimiento a altas velocidades del gas provoca multitud de posibles fenómenos adversos, tales como:

- **Fricción con la pared de la carcasa protectora:** esta fricción es provocada por la viscosidad y la rugosidad de la pared. Típicamente, se puede definir la fricción en la pared:

$$\sigma_p = -r_h \frac{\partial P}{\partial x} \quad (7.6)$$

Donde $\partial P/\partial x$ es el gradiente de presión reducida y r_h es el radio hidráulico, que se define como:

$$r_h = r_h \frac{A}{L_p} \quad (7.7)$$

Donde A es el área de la sección que recorre el fluido, y L_p es la longitud del perímetro de la misma.

- **Flujo turbulento:** el flujo turbulento se caracteriza por alteraciones bruscas en las condiciones del fluido. Está provocado por múltiples factores, tales como el cambio de sección, impacto del fluido contra una superficie o el despegue de la capa límite. El problema del estudio del flujo turbulento es que no se conoce ninguna ley que relacione las propiedades del fluido con los fenómenos del movimiento turbulento (transporte turbulento de calor y masa).

Para determinar el tipo de flujo se establece un número de Reynolds crítico, que varía según el problema que se esté considerando. Este estudio se realizará en el Apartado 7.1.2. *Flujo turbulento. Reynolds.*

En estructuras compuestas por dos cilindros concéntricos rotando a diferentes velocidades es necesario estudiar los fenómenos adversos que ocurren a valores de Reynolds elevados. Estas perturbaciones se estudiarán en el Apartado 7.1.3. *Flujo de Couette. Número de Taylor y vórtices de Taylor.*

⁸ El flujo de Couette es tratado con detalle en el Apartado 7.1.3. *Flujo de Couette. Número de Taylor y vórtices de Taylor.*

- **Acercamiento a velocidades supersónicas:** dado que las velocidades de rotación son elevadas, es posible que el gas alcance velocidades muy altas. Este fenómeno se estudiará en el Apartado 7.1.1. *Número de Mach*.

Cabe destacar que no se estudiará la transmisión de calor por conducción, ni los efectos que esto conlleva. Dado que la estructura no produce calor por sí misma, sino que está condicionada por los cambios de temperatura externos, se supone una temperatura uniforme en el volante, el fluido y la carcasa. Más adelante, cuando esté diseñada la envolvente por completo, se comprobará si esta suposición es acertada o es necesario reconsiderarla.

Para optimizar la envolvente, es necesario reducir todo lo posible las fuerzas aerodinámicas que frenen al volante de inercia. Además, la turbulencia genera inestabilidades por los cambios de presión, que puede desestabilizar el volante de inercia. Por ello, se debe estudiar los fenómenos descritos anteriormente, reducir al máximo la turbulencia y conseguir que las fuerzas de arrastre del fluido sobre el volante sean lo más mínimas posible.

7.1.1. Número de Mach.

Puesto que los volantes giran a velocidades muy altas, se debe tener en cuenta que no sobrepasen la velocidad del sonido. Al llegar a la velocidad del sonido se produce el bloqueo sónico, por el cual el fluido no puede aumentar su flujo másico. Para estudiar este fenómeno se utiliza el número de Mach, definiéndose como:

$$M = \frac{V}{c} \quad (7.8)$$

Donde V es la velocidad del medio y c la velocidad del sonido. Dado que se ha supuesto que el fluido es ideal, la velocidad del sonido se puede escribir como:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (7.9)$$

Dado que la velocidad del fluido máxima coincide con la del volante, se puede escribir como:

$$V = \omega R_v \quad (7.10)$$

Donde ω es la velocidad de rotación máxima del volante y R_v del volante de inercia. Se estudia este radio por ser el mayor de toda la estructura y donde se maximiza la velocidad. Aplicando a la ecuación (7.8) las ecuaciones (7.9) y (7.10) se obtiene:

$$M = \frac{\omega R_v}{\sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}} \quad (7.11)$$

Si se quiere definir el fluido como aire, aplicando la ecuación (7.4) se obtiene:

$$M = \frac{\omega R_v}{\sqrt{287\gamma T}} \quad (7.12)$$

Obteniéndose así el número de Mach en función de las propiedades del aire y el régimen de funcionamiento del volante de inercia.

Capítulo 7. Análisis de fluidos de la envolvente

El número de Mach indica lo cerca que se está de la velocidad del sonido. Si $M=1$, se ha igualado la velocidad del sonido. Además, el número de Mach expresado como M^2 representa las variaciones de presión respecto a la presión misma.

$$M^2 = \frac{V^2}{c^2} \sim \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (7.13)$$

Donde ρ_0 es la densidad inicial.

Así, cuanto menor sea el cuadrado del número de Mach, menor serán las variaciones de densidad. Por otro lado, si $M^2 \ll 1$, se puede suponer que el aire se comporta como incompresible (38).

De la ecuación (7.12) y suponiendo que la temperatura del fluido es la más desfavorable de las condiciones de funcionamiento de cada volante quedan los siguientes números de Mach:

| Envolvente | Número de Mach |
|--|----------------|
| Volante de inercia teórico | 0,583 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 0,691 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | 3,622 |

Tabla 29: Números de Mach para los volantes de inercia.

Como puede verse, el recuperador de frenada excede de 1, por lo que en ese caso habrá que realizar el vacío o cambiar el tipo de fluido. Dado que su aplicación es un vehículo, es poco práctico cambiar el tipo de fluido, ya que existen cambios de régimen rápidos y las posibilidades de fugas se incrementan. Por ello, para este volante de inercia se debe realizar el vacío, por lo que no se estudiarán otras opciones, ni más análisis de fluidos.

Para el resto de flujos, los valores son inferiores a 0,7, por lo que se puede asumir que siempre se está en velocidades subsónicas. Para los valores de M^2 no se cumple que $M^2 \ll 1$, por lo que los flujos son compresibles en todos los casos.

7.1.2. Flujo turbulento. Reynolds.

Como se ha comentado anteriormente, es necesario calcular el número de Reynolds para asegurar que se está trabajando en el flujo laminar. El flujo laminar se particulariza por un fluido ordenado, que fluye siguiendo líneas de corriente. Si se alcanzan velocidades o distancias grandes, o las propiedades del fluido son desfavorables se provoca el flujo turbulento. Este cambio de flujo laminar a turbulento puede conocerse mediante el número de Reynolds, definiéndose típicamente como (38):

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (7.14)$$

Donde V es la velocidad del medio, D el diámetro o una longitud típica y μ la viscosidad del medio. La viscosidad es un factor que depende de la presión y temperatura del fluido, pero mucho más de esta última. Dado que se está trabajando con aire, se utilizarán los siguientes datos en función de la temperatura:

| Temperatura (°C) | Viscosidad (g/cm·s) |
|------------------|----------------------|
| -100 | $1,16 \cdot 10^{-4}$ |
| -50 | $1,45 \cdot 10^{-4}$ |
| 0 | $1,71 \cdot 10^{-4}$ |
| 15 | $1,78 \cdot 10^{-4}$ |
| 20 | $1,81 \cdot 10^{-4}$ |
| 40 | $1,9 \cdot 10^{-4}$ |
| 100 | $2,18 \cdot 10^{-4}$ |
| 500 | $3,58 \cdot 10^{-4}$ |
| 1000 | $4,82 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 30: Coeficientes de viscosidad del aire en función de la temperatura (38).

Para asegurar que no se desarrolle el flujo en todo el hueco de la envolvente, se deberán calcular los números de Reynolds en cada región.

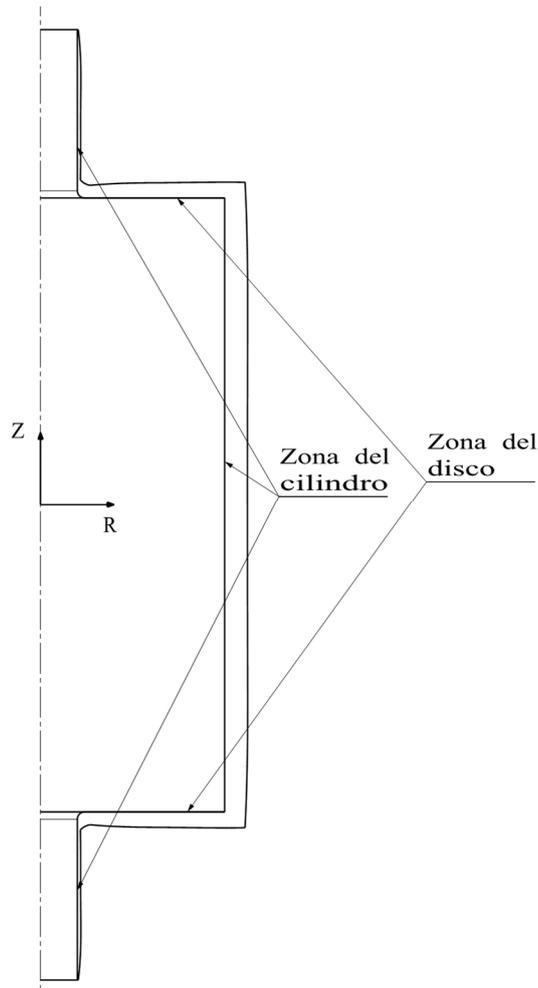


Figura 35: Esquema de las zonas típicas de una envolvente donde se debe evaluar el número de Reynolds.

Capítulo 7. Análisis de fluidos de la envolvente

En las **zonas cilíndricas**, se caracteriza el número de Reynolds para el movimiento rotacional, donde la longitud característica es el hueco entre los cilindros (40):

$$Re_{\phi c} = \frac{\rho \omega R_i (R_o - R_i)}{\mu} \quad (7.15)$$

Donde ω es la velocidad del cilindro interno, R_i el radio del cilindro interno y R_o el radio del cilindro externo. Para facilitar los cálculos, se escoge el radio mayor de cada zona en cada cilindro y se asegura un valor de Reynolds conservador.

Para este tipo de flujo, el valor crítico de Reynolds está entre valores de 40 y 60 (40). Escribiendo el número de Reynolds en función de la presión:

$$Re_{\phi c} = \frac{P \omega R_v (R_c - R_v)}{287 \mu T} \quad (7.16)$$

Donde R_v y R_c toman los valores del radio del volante y el radio interno de la carcasa respectivamente. Despejando la presión y sustituyendo el número de Reynolds por el Reynolds crítico:

$$P_{cr} = \frac{287 \mu T \cdot Re_{\phi c, cr}}{\omega R_v (R_c - R_v)} \quad (7.17)$$

Donde P_{cr} es la presión crítica a la cual el flujo se vuelve turbulento. Aplicándolo en las condiciones más desfavorables, las presiones críticas para cada envolvente son:

| Envolvente | Zona | Presión crítica (Pa) |
|---|--------------|----------------------|
| Volante de inercia teórico | Eje superior | 21521,098 |
| | Volante | 705,508 |
| | Eje inferior | 21521,098 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | Volante | 274,918 |
| | Eje inferior | 20827,974 |

Tabla 31: Presiones críticas para las zonas cilíndricas según Reynolds.

Como puede verse, la presión crítica aparece siempre en la zona del volante, principalmente condicionado por el hecho de que existe más hueco entre el volante y la carcasa que entre en eje y la carcasa.

Para las **zonas superior e inferior** del cilindro, el número de Reynolds queda de la siguiente manera:

$$Re_{\phi d} = \frac{\rho \omega r^2}{\mu} ; \quad R_{eje} < r < R_v \quad (7.18)$$

Variando el valor según la coordenada r .

Para este tipo de flujo, el valor crítico de Reynolds se sitúa en torno a $2 \cdot 10^5$, por lo que se prevé presiones críticas de mayor valor que en el caso anterior. No obstante, se puede apreciar el cambio de flujo según la coordenada r . Por ejemplo, en el caso del volante de inercia teórico quedan los siguientes flujos según la presión del fluido a temperatura mínima.

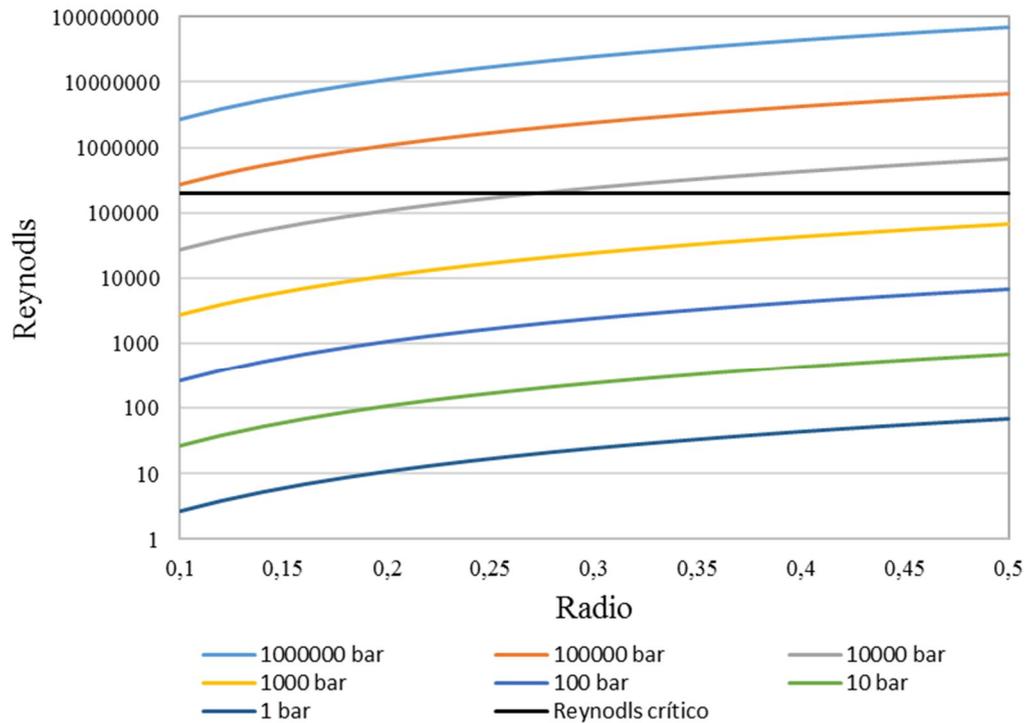


Figura 36: Gráfica de la variación del Reynolds según el valor del radio para diferentes presiones. Calculado para la superficie superior de la envolvente del volante teórico.

Calculando la presión crítica igual que en el caso anterior, para el radio máximo, quedan los siguientes resultados:

| Envolvente | Presión crítica (Pa) |
|---|----------------------|
| Volante de inercia teórico | 2944,086 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 1252,803 |

Tabla 32: Presiones críticas para las zonas del disco según Reynolds.

Por lo tanto, las presiones críticas según el número de Reynolds teniendo en cuenta todas las zonas son:

| Envolvente | Presión crítica (Pa) |
|---|----------------------|
| Volante de inercia teórico | 705,508 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 274,918 |

Tabla 33: Presiones críticas según Reynolds.

7.1.3. Flujo de Couette. Número de Taylor y vórtices de Taylor.

El flujo de Couette describe el flujo que circula entre dos superficies muy próximas entre sí, como es el caso que nos ocupa. En este caso, el fluido está fuertemente

influenciado por los efectos de la viscosidad. En sistemas de dos cilindros concéntricos rotando a diferentes velocidades, aparecen multitud de fenómenos que dependen fundamentalmente del número de Reynolds de las superficies.

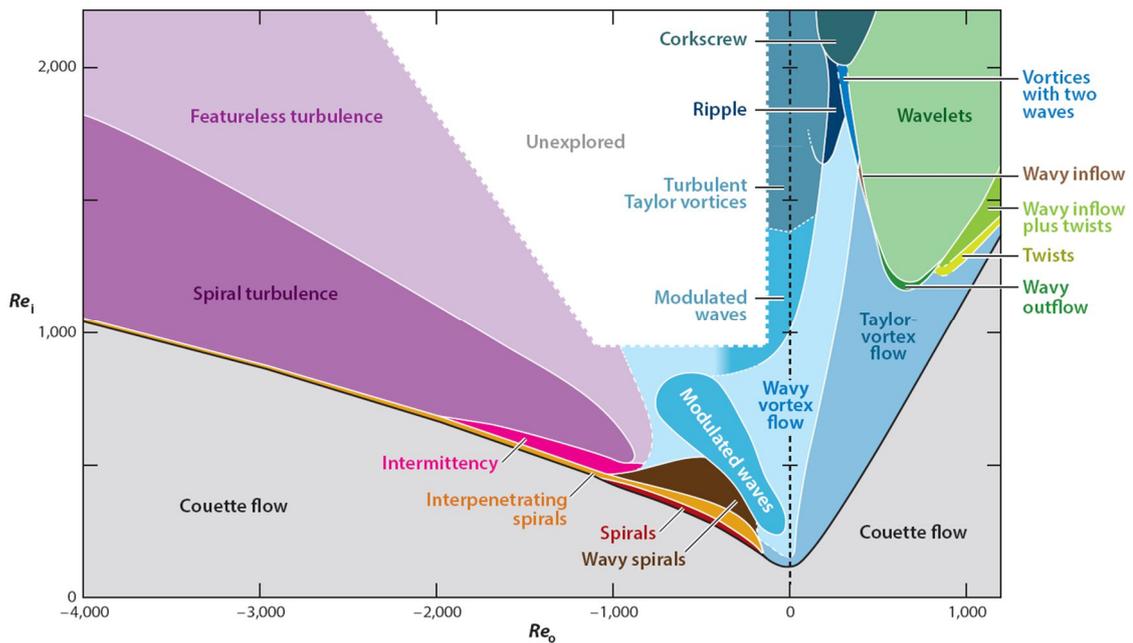


Figura 37: Regímenes de flujo observados dependiendo del Reynolds de la pared interna (Re_i) y externa (Re_o), para un ratio de radios de 0,883 (41). Adaptación de la ilustración de (42).

Como puede verse en la figura 37, es importante estudiar el flujo para conseguir estar en el régimen de flujo de Couette y evitar así todas las turbulencias derivadas del resto de flujos. Aunque la figura es válida para un ratio de radios que no es el nuestro, es muy interesante estudiarla para observar los posibles fenómenos y cómo se distribuyen en función del número de Reynolds. En el caso de este trabajo, el cilindro externo no rota, por lo que la zona de funcionamiento es la línea en la que Re_o se iguala a 0.

Los fenómenos a estudiar en este caso son los vórtices de Taylor, ya que son los primeros que aparecen al ir aumentando el número de Reynolds (ya sea la velocidad angular, la distancia entre cilindros o la densidad del medio). Los vórtices de Taylor son inestabilidades que se generan en el hueco de dos cilindros concéntricos que giran a diferentes velocidades. En el caso de que sólo gire el cilindro interior, se generan vórtices como los mostrados en la figura 38.

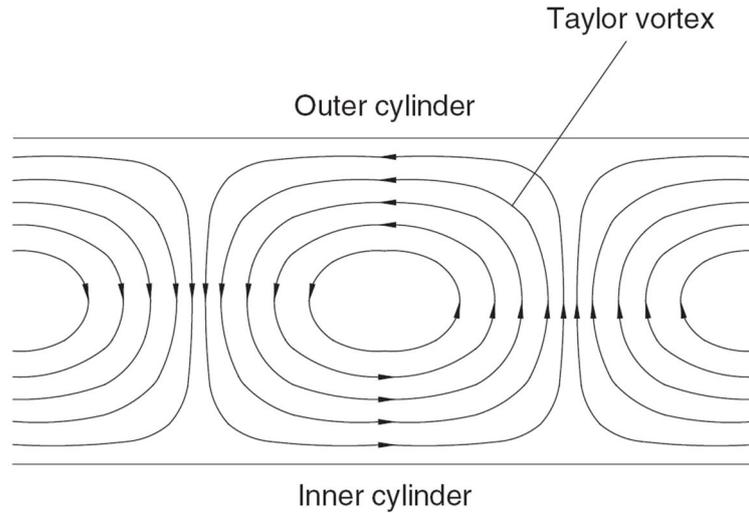


Figura 38: Esquema de los vórtices de Taylor (40).

La generación de estos vórtices se puede predecir mediante un parámetro adimensional, el número de Taylor, que típicamente se define como:

$$Ta = \frac{4\omega^2 R^4}{\nu^2} \quad (7.19)$$

Caracterizándolo para el caso del flujo de Couette, en el que el cilindro exterior no rota (43):

$$Ta = \frac{\rho\omega R_i(R_o - R_i)}{\mu} \sqrt{\frac{R_o - R_i}{R_i}} \quad (7.20)$$

Aplicando la ley de estado del aire, ecuación (7.4), se obtiene:

$$Ta = \frac{P\omega R_i(R_o - R_i)}{287T\mu} \sqrt{\frac{R_o - R_i}{R_i}} \quad (7.21)$$

Quedando el número de Taylor en función de la presión existente en el hueco. Experimentalmente, se saben los valores críticos del número de Taylor en los que empiezan a formarse las inestabilidades. Para huecos pequeños y con el cilindro exterior estático, toma un valor de $Ta_{cr}=41,18$ (40). Despejando de la ecuación (7.21) la densidad y sustituyendo el número de Taylor por el valor crítico:

$$P = \frac{1,1818 \cdot 10^4 T \mu}{\omega R_i (R_o - R_i)} \sqrt{\frac{R_i}{R_o - R_i}} \quad (7.22)$$

Esta fórmula es la que se usará para determinar los valores máximos de presión que puede admitir el hueco en cada volante de inercia. Dado que el hueco no es cilíndrico, sino que varía, se utilizarán los valores máximos. Para establecer una presión que asegure que se está en el régimen de flujo de Couette, se va a trabajar con los valores más desfavorables, como en el apartado anterior. Así, los resultados son:

| Envolvente | Presión crítica en la longitud del volante (Pa) | Presión crítica en la longitud del eje superior (Pa) |
|---|---|--|
| Volante de inercia teórico | 25139,987 | 847107,385 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 9374,567 | 927272,900 |

Tabla 34: Presiones críticas para las zonas cilíndricas según Taylor.

7.1.4. Otros fenómenos que causan turbulencia.

Aparte de la velocidad, las propiedades del fluido o la longitud característica del medio, existen otros factores que provocan flujo turbulento. Los fenómenos que ocurren en las envolventes son:

- **Cambio de sección brusco:** en los extremos del volante y el eje hay aristas y radios que cambian bruscamente la geometría. No son demasiado importantes, ya que el flujo se mueve perpendicularmente a ellos y no los atraviesa. A pesar de eso es interesante tenerlo en cuenta, ya que esas zonas son propensas a generar inestabilidad en el flujo. Como se trabaja en presiones muy bajas, el efecto de estas discontinuidades disminuye considerablemente.

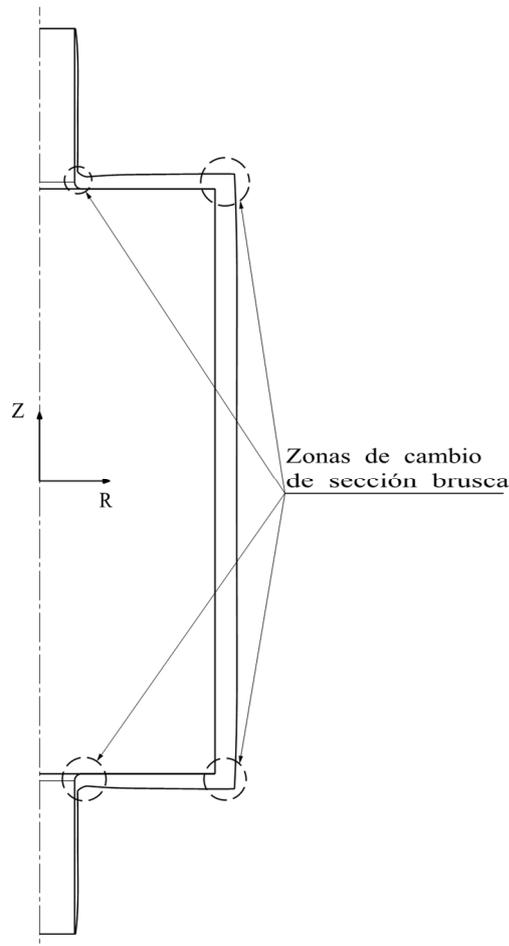


Figura 39: Esquema de las zonas de cambio de sección brusca en la envolvente.

- **Irregularidad en las superficies:** En todos los casos se ha hablado de superficies cilíndricas y circulares. Estas superficies utilizadas para los cálculos son irreales, ya que la geometría es irregular y cambia en su longitud. Como se ha visto en capítulos anteriores, el volante de inercia se deforma en su funcionamiento, y la superficie interna de la carcasa varía su radio dependiendo.

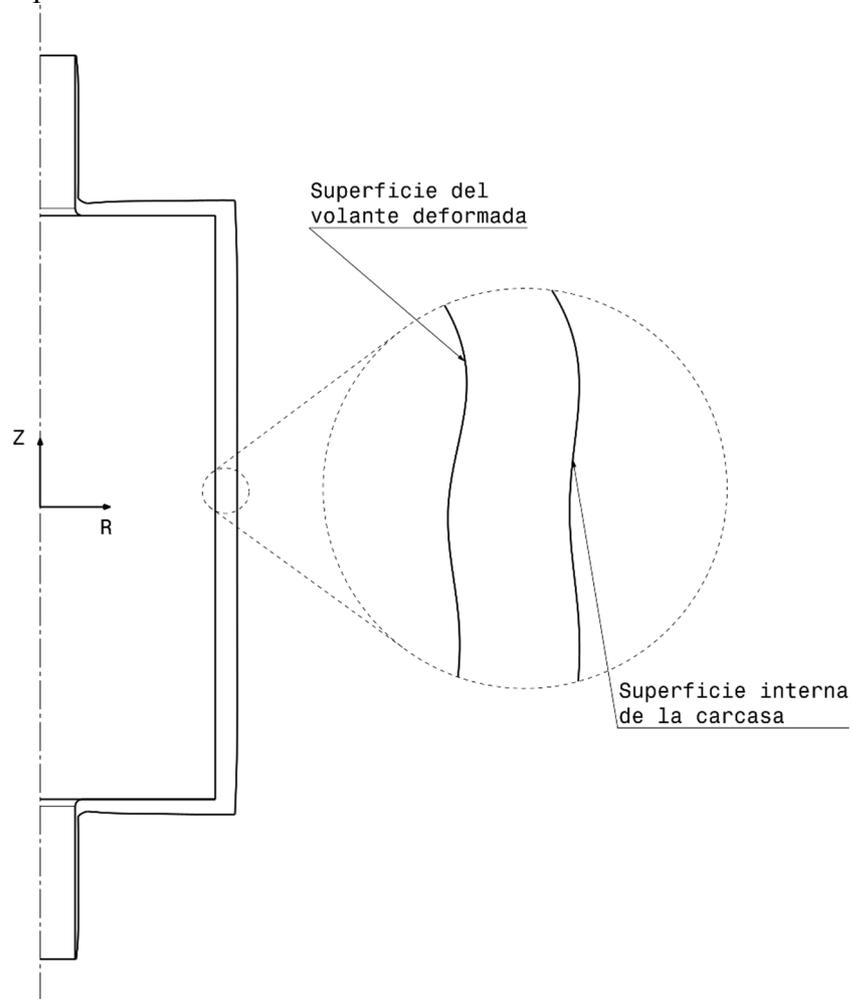


Figura 40: Esquema de las irregularidades en las superficies de la envolvente.

Estas discontinuidades se consideran despreciables, por ser variaciones muy suaves en la geometría. En el caso de presión muy baja, no podrían llegar a producir por sí mismas inestabilidades de gran importancia.

7.1.5. Determinación de presión crítica.

Dado que se han calculado todos los efectos que causan turbulencia, se deben comparar para establecer en cada caso la presión mínima. Esta presión será la que asegure un flujo laminar.

La turbulencia generada por los últimos fenómenos, cambios e irregularidades en las superficies de contacto, es de difícil estudio, además de que varía según el punto de funcionamiento. Para tener en cuenta estos efectos, se aplica un margen de seguridad del 10% a la presión mínima obtenida. Así, para cada envolvente quedan las siguientes presiones críticas:

| Envolvente | Presión crítica (Pa) |
|--|-----------------------------|
| Volante de inercia teórico | 641,37 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 249,93 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | $10^{-1} - 10^{-10}$ |

Tabla 35: Presiones críticas de las envolventes.

Se puede destacar que las presiones críticas son siempre las que hacen el flujo turbulento en la longitud del volante, según el número de Reynolds.

Según (44), la presión de vacío se puede clasificar de la siguiente manera:

| Grado de Vacío | Rango de Presión (Pa) |
|---------------------------|------------------------------|
| Bajo | $10^5 - 3,3 \cdot 10^3$ |
| Medio | $3,3 \cdot 10^3 - 10^{-1}$ |
| Alto | $10^{-1} - 10^{-4}$ |
| Muy alto | $10^{-4} - 10^{-7}$ |
| Ultra-alto | $10^{-7} - 10^{-10}$ |
| Extremadamente Ultra-alto | $> 10^{-10}$ |

Tabla 36: Grados de vacío.

Por ello, en las peores condiciones se debería realizar un vacío medio en las envolventes del volante de inercia teórico y el acumulador de energía de alta capacidad, y habría que estudiar qué vacío se establece en el recuperador de frenada.

7.2. Resistencia aerodinámica. Fuerzas de arrastre.

Una vez que el fluido se supone en flujo laminar, se puede estudiar el fluido sin tener en cuenta perturbaciones ni inestabilidades. El siguiente efecto a tener en cuenta es la fuerza que ejerce sobre la estructura.

La resistencia aerodinámica es la oposición que ejerce el fluido sobre el volante de inercia. Al rotar, se produce una fricción que frena al volante provocando pérdidas. Para un cilindro en rotación, estas pérdidas se pueden establecer mediante la siguiente ecuación (43):

$$W_p = (M_D + M_C)\omega \quad (7.23)$$

Donde W_p es la potencia perdida, M_D es el momento del disco en los dos lados del cilindro (las zonas superior e inferior) y M_C es el momento cilíndrico.

Para determinar las fuerzas de arrastre, o en este caso, los momentos producidos por el fluido se utiliza un parámetro denominado coeficiente de arrastre. Este coeficiente toma diferentes valores según la aplicación requerida. En este caso, se puede expresar en función de los momentos de la siguiente manera (45):

$$C_D = \frac{M_D}{\rho\omega^2 R_i^5} \quad (7.24)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre para el disco, y

$$C_C = \frac{M_C}{\rho\omega^2 R_i^4 \pi L} \quad (7.25)$$

Donde C_C es el coeficiente de arrastre para el cilindro.

De esta manera, si se conocen los valores de los coeficientes de arrastre, se pueden calcular los momentos, y después las pérdidas. Hay expresiones que relacionan los coeficientes con el número de Reynolds y el hueco existente, pero, dado que en este apartado se necesita únicamente la potencia perdida, se va utilizar directamente la ecuación de la tensión cortante, definiéndose como (43):

$$\tau = \frac{1}{2} \rho u_o \sqrt{\frac{2RT}{\pi}} \quad (7.26)$$

Donde u_o es la velocidad de la superficie en rotación y el resto las propiedades del fluido, siendo todas ellas conocidas. Además, se sabe que la potencia perdida en superficies cilíndricas puede definirse como:

$$P_{p,c} = \tau A u_o \quad (7.27)$$

Donde A es el área de contacto. Aplicando las ecuaciones (7.26), (7.4) y (7.10):

$$P_{p,c} = PL \sqrt{\frac{2\pi}{287T}} \omega^2 R^3 \quad (7.28)$$

Donde L y R toman los valores según se calculen las pérdidas en el eje (si lo hubiera) o el volante. Para las zonas del disco, la potencia perdida se define como:

$$P_{p,d} = \int \tau u dA \quad (7.29)$$

Siendo u dependiente del radio del disco. Integrando la ecuación y sustituyendo la ecuación (la de tensión):

$$P_{p,d} = \frac{P}{4} \sqrt{\frac{2\pi}{287T}} \omega^2 (R_v^4 - R_{eje}^4) \quad (7.30)$$

Donde R_v es el radio del volante y R_{eje} el radio del eje. Así, las pérdidas totales serían:

$$P_p = \Sigma P_{p,c} + \Sigma P_{p,d} \quad (7.31)$$

Evaluando las pérdidas en las envolventes, se dan los siguientes resultados:

Capítulo 7. Análisis de fluidos de la envolvente

| Envolvente | Zona | $P_{p,c}$ |
|--|--------------|-----------|
| Volante de inercia teórico | Eje superior | 0,642 P |
| | Volante | 292,990 P |
| | Eje inferior | 0,642 P |
| Acumulador de energía de alta capacidad | Volante | 303,381 P |
| | Eje inferior | 0,146 P |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | Volante | 257,834 P |

Tabla 37: Pérdida de potencia en las superficies cilíndricas en función de la presión.

| Envolvente | Zona | $P_{p,d}$ |
|--|----------------|-----------|
| Volante de inercia teórico | Disco superior | 21,756 P |
| | Disco inferior | 21,756 P |
| Acumulador de energía de alta capacidad | Disco superior | 120,281 P |
| | Disco inferior | 120,281 P |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | Disco superior | 32,178 P |
| | Disco inferior | 32,178 P |

Tabla 38: Pérdida de potencia en las superficies planas en función de la presión.

Sumando todas las pérdidas, se obtiene las pérdidas totales en función de la presión:

| Envolvente | Potencia perdida (W) |
|--|----------------------|
| Volante de inercia teórico | 337,785P |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 544,088P |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | 322,190P |

Tabla 39: Pérdida de potencia total en función de la presión.

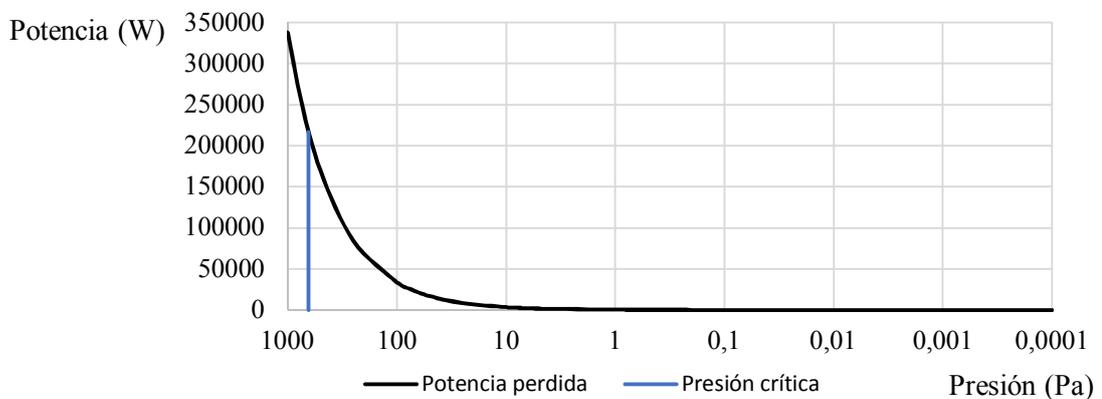


Figura 41: Gráfica de la potencia perdida en función de la presión para el volante de inercia teórico.

Ampliando la gráfica en el rango de presiones 0,1 a 0,0001 Pascales:

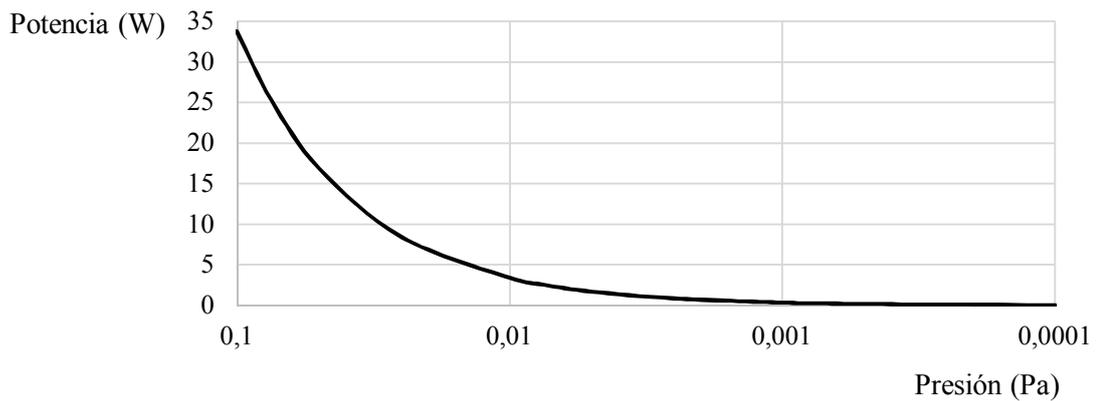


Figura 42: Gráfica de la potencia perdida en función de la presión para el volante de inercia teórico.

Determinando así las pérdidas aerodinámicas en las condiciones más desfavorables. Dado que la bomba de vacío consumirá una potencia del orden de decenas de vatios, se prevé que el rango de operación del fluido oscilará entre las unidades y centésimas de Pascales, lo que implica un vacío medio o alto.

7.3. Determinación de la presión óptima.

Una vez calculadas las pérdidas en función de la presión, hay que determinar la presión de trabajo y diseñar así el fluido completamente. Idealmente, se debería bajar la presión hasta vacío ultra-alto o extremadamente ultra-alto. La cuestión es que producir vacío y mantenerlo requiere tecnología, más concretamente bombas de vacío.

Dependiendo del tipo de bomba, el volumen a evacuar, el caudal del flujo y la presión de trabajo, se necesitará una potencia que alimente a la bomba. Por lo tanto, se debe hacer una comparación entre la potencia que se pierde por las fuerzas de arrastre y la potencia que gasta la bomba de vacío para disminuir las pérdidas.

En función de la aplicación se deberá optar por diferentes sistemas de creación de vacío. Para sistemas de acumulación de energía que utilicen varios volantes de inercia, puede ser interesante utilizar un único sistema de bombas en vez de una bomba aislada para cada envolvente. En otras aplicaciones, como el recuperador de frenada, se colocará una única bomba necesariamente. Dependiendo del vacío que se requiera y la aplicación, se podrán usar unas bombas u otras.

Dado que el objetivo de este apartado es únicamente la determinación de la presión de trabajo, no se va a tener en cuenta los efectos de pérdidas, aislamientos ni desorción. Para tener en cuenta todos los efectos, se debería realizar un estudio de las características del sistema de vacío en profundidad.

En este trabajo se va a suponer que se usa una bomba de vacío en cada volante. Por ello se debe calcular el volumen del fluido que se debe evacuar. Como se tienen diseñados tanto el volante de inercia como la carcasa protectora, se tienen todos los datos. Para cada volante, quedan los siguientes volúmenes:

| Envolvente | Volumen (cm ³) |
|--|----------------------------|
| Volante de inercia teórico | 2727,127 |
| Acumulador de energía de alta capacidad ⁹ | 4548,863 |
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | 146,976 |

Tabla 40: Volumen del fluido en cada envolvente.

Como puede verse, la optimización de la carcasa protectora implica unos volúmenes de fluido mínimos. De esta manera se consigue poder usar bombas pequeñas, de poco caudal de flujo que consigan una presión de vacío.

Para rangos de presión alta, como los que se necesitan en este caso, existen varios tipos de bombas de vacío, como bombas mecánicas, la bomba turbomolecular, la bomba de difusión o la bomba iónica. Para este caso, dado que no se necesita un vacío ultra-alto ni es conveniente utilizar bombas que gasten demasiada energía, se va a realizar una búsqueda de mercado de bombas pequeñas, sin buscar bombas industriales.

Haciendo una búsqueda de bombas con estas características, se han seleccionado las siguientes bombas:

- **Mechanical Booster Pump MBS-052¹⁰** (46): para el volante de inercia teórico y el acumulador de energía de alta capacidad. Esta bomba se caracteriza por su consumo bajo.

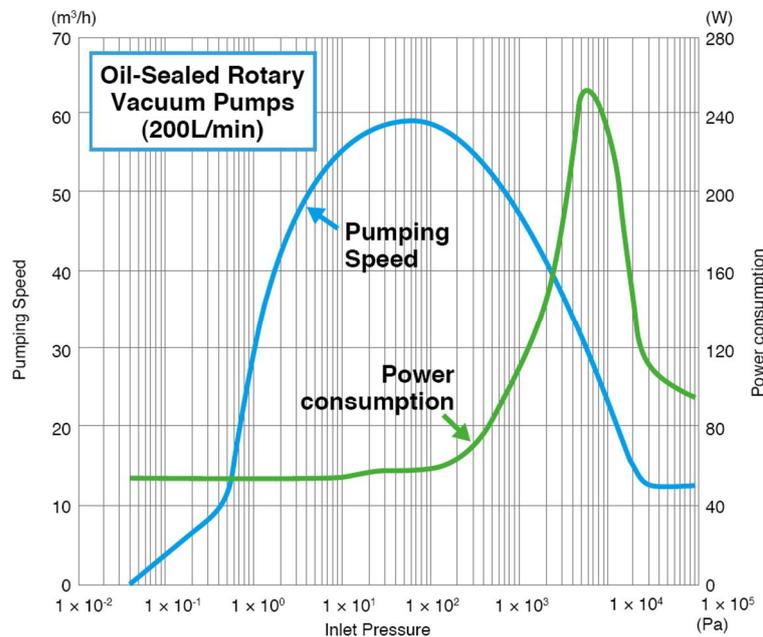


Figura 43: Gráfica del consumo de la bomba MBS-052 frente a la presión (47).

⁹ En el caso del acumulador de energía de alta capacidad, el volumen calculado no es el volumen total. Como se ha visto en los capítulos anteriores, no se ha calculado la carcasa protectora en el eje superior, dado que alrededor del mismo se situará el estator. Para diseñarlo completamente, habría que tener en cuenta toda la estructura, calculando el volumen que hay entre el volante y el estator, y el que hay entre el estator y la carcasa.

¹⁰ Las especificaciones técnicas de la bomba Mechanical Booster Pump MBS-052 pueden verse en (47).

Como puede verse, la bomba tiene un gran caudal, que es innecesario gracias a la optimización de la envolvente, por lo que habría que pedir al fabricante el gasto de potencia a otras velocidades de giro más bajas. Utilizando esta gráfica se puede ver que la potencia se mantiene estable desde presiones de 5 Pascales, por lo que se establece los puntos de funcionamiento:

| Envolvente | Presión (Pa) | Potencia perdida (W) |
|---|--------------|----------------------|
| Volante de inercia teórico | 0,148 | 50 |
| Acumulador de energía de alta capacidad | 0,092 | 50 |

Tabla 41: Presiones óptimas de funcionamiento para las envolventes del volante de inercia teórico y el acumulador de energía de alta capacidad.

Cuando la bomba empieza a evacuar aire necesitará una potencia extra pero, cuando se estabilice, se quedará en un consumo constante de 50 W.

- **TURBOVAC 90 iX¹¹** (48): para el recuperador de frenada en vehículos híbridos, se ha buscado una bomba de pequeño tamaño y poco peso. Lamentablemente, no se ha encontrado una bomba que se ajustara a todas las características necesarias, por lo que se requerirían proveedores especializados. Esta bomba, y otras de su catálogo, son las más convenientes para esta aplicación de las que se ha encontrado, siendo su punto débil el rango de temperaturas de operación (que no cubre el rango de temperaturas diseñado para el volante de inercia). Para esta bomba, la envolvente quedaría en el siguiente punto de funcionamiento:

| Envolvente | Presión (Pa) | Potencia perdida (W) |
|--|--------------|----------------------|
| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | 0,062 | 20 |

Tabla 42: Presión óptima de funcionamiento para la envolvente del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

En este caso, igual que el anterior, cuando la bomba se ponga en funcionamiento llegará a consumir hasta 240 W. En el punto de funcionamiento, quedará en un consumo continuo de 20 W.

Para que este apartado tenga mayor peso, se debe buscar a un proveedor que de soluciones precisas a este caso. De ese modo, se conseguirán bombas de vacío que estén optimizadas a este caso: producir vacío medio-alto con un caudal mínimo.

Por último, cabe comentar que la carcasa protectora está sometida a una diferencia de presiones. Esta diferencia viene dada por la presión atmosférica y la presión en el interior de la envolvente. La presión provoca una fuerza compresora en la carcasa, con dirección radial y hacia dentro, que implicaría deformación interna.

Dado que la diferencia es mínima (del orden de una atmósfera) y la carcasa protectora está diseñada al fallo del volante, es completamente despreciable.

¹¹ Las especificaciones técnicas de la bomba TURBOVAC 90 iX pueden verse en el apartado High Vacuum Pumps de (66).

7.4. Estudio de transferencia de calor por radiación.

Una vez calculadas todas las propiedades de la envolvente, se puede realizar una última optimización. En el Apartado 5.1.2. *Estudio de deformación térmica*, se han calculado las deformaciones del volante en las condiciones más desfavorables. En el caso de la deformación térmica, se ha supuesto que la superficie del volante alcanzaba la máxima temperatura del rango. Al tener todas las condiciones de la en volante diseñadas, se puede calcular la temperatura de la superficie y comparar los dos valores.

De esta manera, se propone realizar un análisis de transferencia de calor en el hueco entre la carcasa protectora y el volante de inercia. Sabiendo la temperatura máxima de funcionamiento en el exterior se puede calcular la potencia térmica transferida al volante, y así la temperatura que tiene el volante de inercia y su deformación térmica. Dado que las presiones de trabajo son extremadamente bajas en todos los volantes, se va a suponer que la transferencia de calor por conducción y convección es despreciable¹². Por lo tanto, el único modo de transferencia de calor es la radiación.

La potencia térmica transferida entre dos superficies no rerradiantes (superficies ideales con transferencia neta de radiación $q=0$ (49)) se define como (50):

$$q_{ij} = \frac{E_{bi} - E_{bj}}{\Sigma R} \quad (7.32)$$

Donde q_{ij} es la potencia térmica transferida, E_b la energía total emitida por cada superficie si fuera un cuerpo negro, y ΣR la suma de resistencias térmicas. E_b se puede definir como:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (7.33)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, definiéndose como:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2 K^4} \quad (7.34)$$

Las resistencias térmicas se aplican haciendo un circuito equivalente (red de intercambio radiactivo). La resistencia propia de la superficie viene dada por:

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i} \quad (7.35)$$

Donde ε_i es la emisividad del material y A_i la superficie. La emisividad de los materiales es dependiente de la temperatura, y vale valores entre 0 y 1, diferentes para cada material. La resistencia entre superficies viene dada por:

$$R_{ij} = \frac{1}{A_i F_{ij}} \quad (7.36)$$

Donde F_{ij} es el factor de visión entre la superficie i y la superficie j . En el caso que nos ocupa, dos superficies concéntricas, el valor es 1. Aplicando las ecuaciones (7.33), (7.35) y (7.36) a la ecuación (7.32):

$$q_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{1 - \varepsilon_j}{A_j \varepsilon_j}} \quad (7.37)$$

Quedando definida la potencia térmica por radiación en función de las propiedades de las superficies del volante de inercia y la carcasa protectora. Si se quiere optimizar

¹² Dado que no existe convección ni conducción, la suposición de considerar la temperatura del fluido constante se considera acertada.

aún más se puede estudiar la temperatura de la superficie interna de la carcasa protectora teniendo en cuenta la conductividad térmica de la propia carcasa. La conductividad térmica por conducción en la carcasa se define como:

$$q_{12} = \frac{kA}{e}(T_1 - T_2) \quad (7.38)$$

Donde q_{12} es la potencia térmica transferida, k la conductividad térmica, A el área de paso y e el espesor de la carcasa. Para materiales metálicos, como es nuestro caso, se transmitirá una gran cantidad de energía, ya que la conductividad térmica de estos materiales es elevada. Sumándole a ese factor el hecho de que el espesor es muy pequeño comparado con el área, la diferencia de temperaturas será muy pequeña. Por lo tanto, la deformación de la carcasa protectora por dilatación térmica se puede dar por válida.

Para este trabajo no se tienen en cuenta estos estudios, para guardar más margen y obtener valores más conservadores.

Si se tiene en cuenta hay que distinguir dos casos:

- Si el rango de temperaturas es pequeño: para rangos de temperaturas bajos, la radiación térmica se puede volver un factor despreciable. Si la diferencia entre la temperatura ambiente (la temperatura a la que se montó el volante) y la temperatura del exterior es del orden de decenas de grados, el efecto de la radiación no produce un aumento de la temperatura en el volante significativo. Este efecto se puede ver en los termos, donde el vacío se usa como aislante.
- Si el rango de temperaturas es grande: si en la aplicación que se requiera se alcanzan grandes temperaturas máximas, el efecto de la radiación debe ser tenido en cuenta. Si se alcanzan rangos de temperatura elevados, de centenares de grados, el volante de inercia empezará a deformarse por dilatación térmica y se deberá calcular su temperatura en la superficie.

En cualquier caso, la solución para evitar la radiación es colocar un material reflexivo en la superficie de la carcasa, evitando que la envolvente llegue a absorber el calor, y diseñando un sistema de refrigeración externo.

Además, si mediante el análisis de fluidos se diseñara un fluido en el hueco, habría que estudiar la convección y la conducción en la envolvente.

Capítulo 8

Propuestas de mejora de diseño

En este capítulo se propone diversas propuestas en el diseño de la envolvente, partiendo de los resultados anteriores.

8.1. Sistema de seguridad adicional.

El sistema de seguridad propuesto soluciona el problema del diseño de la carcasa protectora. El espesor está diseñado para que la carcasa almacene de manera uniforme la energía que contiene el volante de inercia, en forma de deformación plástica. El problema es que el volante chocará en puntos concretos, aumentando considerablemente la tensión y pudiendo provocar la fractura.

Para contrarrestarlo, se había impuesto un margen de seguridad de 20%. Además, el hueco existente entre la carcasa y el volante es tan pequeño que probablemente la fricción ocurra en varias zonas a la vez. Estas suposiciones pueden ser insuficientes, por lo que se propone un sistema de seguridad adicional: frenar el volante de inercia mediante un fluido viscoso.

Este fluido contribuiría a absorber la energía mediante el rozamiento. La principal idea es que, si el volante se desestabiliza y se prevé que va a chocar, el fluido viscoso se libera ocupando el espacio donde antes había vacío u aire a presiones bajas. Mediante la fricción se transforma la energía que contiene el volante en forma de calor. Mediante un intercambiador se evacúa el calor al exterior. El funcionamiento sería el siguiente:

Se colocan unos sensores que miden la desestabilización del volante de inercia. Si se sobrepasan los límites establecidos, la bomba de vacío se para y se abren dos válvulas adicionales. La primera válvula deja pasar el fluido viscoso desde un depósito en el que se almacena. El depósito se encuentra a una presión muy superior a la presión del gas de la envolvente. El fluido recorre el hueco existente entre la carcasa y el volante de inercia por la diferencia de presiones. Mientras llena el hueco va almacenando energía en forma de calor por el rozamiento con el volante. Una vez que ha recorrido el hueco sale por la segunda válvula, impulsado por una bomba. Después, mediante un intercambiador de calor, se evacúa el calor en una zona externa a la estructura. Una vez que el fluido vuelve a tener una temperatura baja, vuelve al depósito para repetir el ciclo y así, en poco tiempo, se absorba gran cantidad de energía.

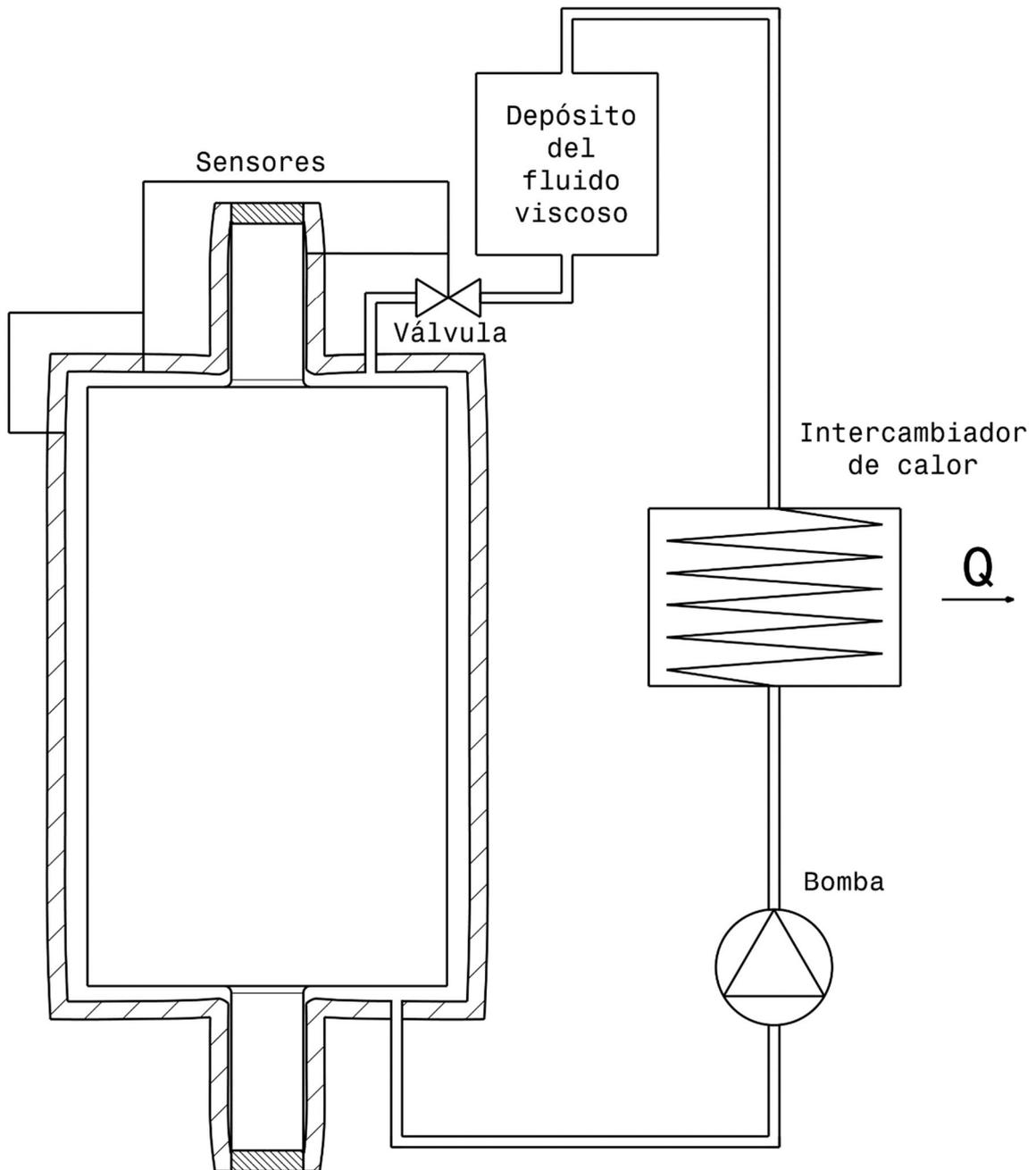


Figura 44: Esquema del sistema de seguridad.

La principal ventaja de este sistema es que es un sistema no destructivo. Se activa antes de que choque con la carcasa pudiendo evitar la colisión si la desestabilización es pequeña. Si inevitablemente choca, el fluido absorbe parte de la energía ayudando a la carcasa a mitigar la energía y evitar que esta se fracture.

8.2. Encerrar en el espacio fluido de baja densidad.

El hecho de tener funcionando una bomba de vacío, implica estar gastando energía en hacer que cree el vacío, por lo que siempre tendrá pérdidas el volante. La opción que se propone es encapsular la carcasa con un fluido de baja densidad y viscosidad evitando así el gasto energético de la bomba.

Teniendo en cuenta únicamente las propiedades termodinámicas del fluido, el gas idóneo para trabajar sería el hidrógeno, el gas de densidad más baja y una viscosidad también baja. El problema que presenta es que es un gas inflamable y reactivo, por lo que trabajar a velocidades altas, como es el caso, es peligroso. Su tensión de ruptura (tensión a la que se vuelve conductor) Por ello se deben buscar gases no reactivos.

El siguiente próximo gas es el helio (He), de densidad muy baja, buenas propiedades térmicas y estabilidad. Sin embargo, se sabe que la presencia de pequeñas cantidades de gases electronegativos tiende a subir la tensión de ruptura. Por ello, se propone utilizar una mezcla de helio y hexafluoruro de azufre (SF₆), siendo este un gas electronegativo (51).

La idea de usar esta mezcla de gases parte del estudio (52) en el que se concluía que, en rotores girando con ciertas mezclas de fluidos, las pérdidas aerodinámicas disminuían respecto a utilizar aire. Usando mezclas de He y SF₆ entre un 15 y 5 por ciento, se podía comprobar de manera experimental que las pérdidas se reducían. En el trabajo especifica que este diseño es válido para ciertos regímenes de giro, por lo que se diseñará para el acumulador de energía de alta capacidad y se compararán los resultados del aire con los de la mezcla.

Sabiendo que la masa molecular del helio es 4 g/mol y la del SF₆ es 146,06 g/mol, utilizando una mezcla de SF₆ 5%, queda la siguiente ecuación de estado de los gases:

$$\frac{P}{\rho} = 456,7T \quad (8.1)$$

Como ya se ha comentado anteriormente, para los volantes diseñados la presión crítica aparece en la longitud del volante, al hacerse el flujo turbulento. Por lo tanto, aplicando las ecuaciones de estado a la ecuación (7.17), se obtienen la presión crítica:

$$P_{cr} = 437,474 Pa \quad (8.2)$$

Aumentando la presión crítica un 59% respecto al aire. Este es un resultado esperable, ya que el helio tiene una densidad inferior al aire. Realizando un estudio de las fuerzas de arrastre como en el Apartado 7.2. *Resistencia aerodinámica. Fuerzas de arrastre*, se tiene la siguiente pérdida de potencia en función de la presión:

$$W_p = 431,315P W \quad (8.3)$$

Comparándola con la potencia perdida en el aire:

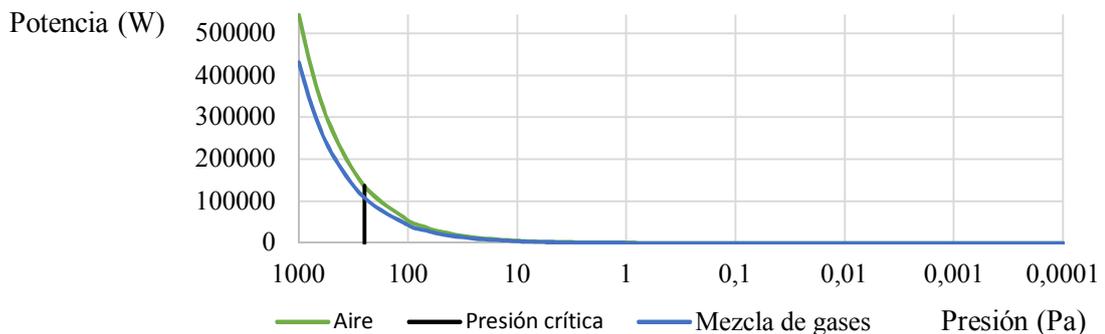


Figura 45: Comparación de la potencia perdida por las fuerzas aerodinámicas en el aire y en la mezcla de gases SF₆ 5%.

Ampliando la gráfica en el rango de presiones 0,1 a 0,0001 Pascales:

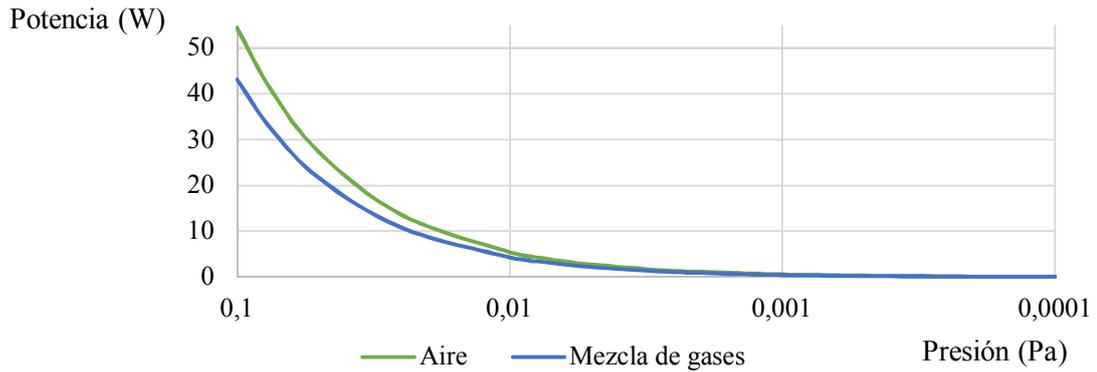


Figura 46: Comparación de la potencia perdida por las fuerzas aerodinámicas en el aire y en la mezcla de gases SF₆ 5%.

Como puede verse, la potencia perdida en la mezcla de gases es bastante inferior a la perdida en el aire, un 26% menor, consiguiendo así una mejora en el rendimiento del volante.

El principal problema de esta tecnología es encapsular el fluido a presión más baja que la de ambiente. Ya que no existe bomba de vacío, debe aislarse la carcasa para evitar que entre aire a presión ambiente. El aislamiento perfecto no existe, por lo que siempre existirán mínimas cantidades de aire que entren a la envolvente. El objetivo es minimizarlas usando técnicas de aislamiento y así, a mayor capacidad de disminuir fugas, mayor vacío se podrá producir disminuyendo las pérdidas aerodinámicas.

8.3. Bomba de vacío mono-eje / eje libre.

Otra idea para minimizar las pérdidas es utilizar una bomba cuyo eje de giro sea al mismo que el del volante de inercia. De esta manera, se evitan las pérdidas de energía al transformar la energía cinética a electricidad.

El principal problema de esta propuesta es la complejidad que implica diseñar la bomba de vacío y los problemas mecánicos que presentan. Además, el rendimiento de la conversión de energía es muy alto, por lo que debería ser estudiada su viabilidad en profundidad.

Una derivación de la idea anterior es usar una bomba de vacío que comparta el eje con el volante de inercia, pero use un regulador de velocidad.

Capítulo 9

Marco regulador

9.1. Normativa aplicable.

Para la aplicación de este trabajo se ha tenido en cuenta la siguiente normativa:

- **UNE-EN 60034-1:2011.** *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento.*
Esta norma se usa para poder especificar las condiciones de funcionamiento (temperaturas máximas y mínimas). Además, asigna las tolerancias normalizadas de las pérdidas totales de la máquina y la tolerancia de los momentos de inercia que tiene el rotor.
- **UNE-EN 60204-1:2007** (*Versión corregida en fecha 2016-09-28*). *Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales. (IEC 60204-1:2005, modificada).*
Esta norma obliga a proteger la máquina mediante una envolvente, pero sin especificar el método ni tolerancias.
- **UNE-EN ISO 12100:2012.** *Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. (ISO 12100:2010).*
La norma de seguridad en las máquinas establece los límites de las mismas. En este caso, lo interesante es establecer los límites en el espacio de la máquina, que se consigue con la carcasa protectora.

Para la fabricación de las envolventes, se deberá usar la siguiente normativa:

- **UNE-EN 60034-2-1:2004.** *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción).*
La norma establece las pautas para determinar las pérdidas reales mediante ensayos. Se debe leer junto a la norma **UNE-EN 60034-2-2:2010.** *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-2: Métodos específicos para determinar las pérdidas separadas de máquinas de gran tamaño a partir de ensayos.*
- **UNE-EN 60034-5:2003.** *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 5: Grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas eléctricas rotativas (código IP). Clasificación.*
Esta norma establece el grado de protección que tiene la máquina.
- **UNE-EN 60034-7:2003.** *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 7: Clasificación de los tipos de construcción y de las disposiciones de montaje (Código IM).*

Para clasificar la máquina según su configuración.

- **UNE-EN 60034-14:2004.** *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 14: Vibraciones mecánicas de determinadas máquinas con altura de eje igual o superior a 56 mm. Medición, evaluación y límites de la intensidad de vibración.*

Mediante esta norma se ensaya la máquina y se calculan las deformaciones reales.

A continuación, se muestra la normativa que puede ser interesante tener en cuenta, pero por falta de disponibilidad no se ha podido estudiar:

- **ISO 11055:1996.** *Flywheels for reciprocating internal combustion engines.*
- **ISO 21648:2008.** *Flywheel module desing and testing.*
- **ISO 10791-1:2015.** *Test conditions for machining centres -- Part 1: Geometric tests for machines with horizontal spindle (horizontal Z-axis).*
- **ISO 10791-2:2001.** *Test conditions for machining centres -- Part 2: Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis).*
- **ISO 10791-3:1998.** *Test conditions for machining centres -- Part 3: Geometric tests for machines with integral indexable or continuous universal heads (vertical Z -axis).*
- **ISO 10791-4:1998.** *Test conditions for machining centres -- Part 4: Accuracy and repeatability of positioning of linear and rotary axes.*
- **ISO 10791-5:1998.** *Test conditions for machining centres -- Part 5: Accuracy and repeatability of positioning of work-holding pallets.*
- **ISO 10791-6:2014.** *Test conditions for machining centres -- Part 6: Accuracy of speeds and interpolations.*
- **ISO 10791-7:2014.** *Test conditions for machining centres -- Part 7: Accuracy of finished test pieces.*
- **ISO 10791-8:2001.** *Test conditions for machining centres -- Part 8: Evaluation of contouring performance in the three coordinate planes.*
- **ISO 10791-9:2001.** *Test conditions for machining centres -- Part 9: Evaluation of the operating times of tool change and pallet change.*
- **ISO 10791-10:2007.** *Test conditions for machining centres -- Part 10: Evaluation of thermal distortions.*

9.2. Herramientas utilizadas.

Los softwares que se utilizan en el trabajo son:

- El software matemático **MATLAB** (53): con él se programa un “script” para optimizar la geometría de los volantes de inercia.
- El programa de diseño **Catia v5** (54): para diseñar en CAD los diferentes volantes de inercia y documentarlos en planos, además de diseñar las carcasas protectoras y dibujar los esquemas.
- El programa de elementos finitos **ANSYS** (Mechanical y ACP) (55): para simular y realizar los distintos análisis estructurales, dinámicos, modales y armónicos; y para diseñar materiales compuestos.
- El programa de realización de esquemas **yEd Graph Editor** (56): con este programa se crean los esquemas y flujos de trabajo que aparecen en la memoria.

- El pack de programas de **Microsoft Office** (57): Word y Excel: con el programa Word se redacta la memoria, y con Excel se manejan los datos de entrada y salida de los programas Catia y ANSYS. Además, se diseñan las tablas.

9.3. Trabajos similares.

La optimización de la envolvente es un tema que se ha tratado en varias ocasiones. Normalmente, los informes sobre ello tratan las pérdidas aerodinámicas o por histéresis de ciertos rotores. Todos los trabajos consultados están en inglés, sin haber podido hallar ningún informe en castellano. Algunos de estos trabajos son:

- *Determining the mechanical losses in a high-speed motor on the example of a flywheel energy storage system* (58): en el artículo se propone un método para calcular las pérdidas mecánicas de un volante de inercia de manera indirecta.
- *A method of reducing windage power loss of a high-Speed motor using a viscous vacuum pump* (59): para reducir las pérdidas aerodinámicas, propone utilizar una bomba de vacío viscosa rediseñando la envolvente por completo.
- *Cylindrical Rotor Design for Acoustic Noise and Windage Loss Reduction in Switched Reluctance Motor for HEV Applications* (60): se propone un rotor diseñado para reducir las pérdidas aerodinámicas y se ensaya con el fin de aplicarlo a vehículos eléctricos e híbridos.
- Patent US20120097570. *Vacuum chambers for flywheels* (61): esta patente de 2012, propone mejorar el sistema de vacío y los materiales de la carcasa protectora.

Aparte de estos trabajos, existe abundante bibliografía sobre coeficientes de rozamiento de cilindros, discos, cilindros encapsulados, vórtices de Taylor en diferentes fluidos y regímenes de trabajo, control del paso del fluido laminar a turbulento,

No obstante, no se ha encontrado bibliografía que trate el tema de reducir el volumen del fluido a evacuar. Por lo tanto, y tal como se explica en los trabajos futuros, se propone probar experimentalmente la metodología y comprobar su validez.

Otro trabajo que propone una metodología de diseño es “*A methodology for evaluating and reducing rotor losses, heating, and operational limitations of high-speed flywheel batteries*” (62). Desafortunadamente, no se ha podido obtener acceso a él.

Capítulo 10

Entorno socioeconómico

10.1. Presupuesto de la elaboración del Trabajo de Fin de Grado.

| Presupuesto de realización del TFG | | | |
|---|-----------------------------------|--------------------|-------------------|
| Licencias de software | Microsoft Office Profesional 2016 | 188,99 € | |
| | Matlab Estándar | 2.000,00 € | |
| | Catia V5 CS1 | 5.000,00 € | |
| | ANSYS Mechanical Enterprise | 3.200,00 € | |
| | yEd Graph Editor3.17 | 0,00 € | |
| | Total Software | 10.388,99 € | |
| Normativa | UNE-EN 60034-1:2011 | 81,00 € | |
| | UNE-EN 60204-1:2007 | 112,00 € | |
| | UNE-EN ISO 12100:2012 | 91,00 € | |
| | Total Normativa | 284,00 € | |
| Nómina Coste/hora= 8,33€/h | Tarea | Tiempo (h) | |
| | Documentación | 55 | 458,33 € |
| | Diseño y cálculo | 260 | 2.166,67 € |
| | Redacción de memoria | 185 | 1.541,67 € |
| | Total Nóminas | 500 | 4.166,67 € |
| Presupuesto total | | 14.839,66 € | |

Tabla 43: Presupuesto de la elaboración del Trabajo de Fin de Grado.

El coste de las licencias de “Catia V5 CS1” y “ANSYS Mechanical Enterprise” no es público. Dado que son programas destinados a empresas, dependiendo del contrato que se acuerde varían los costes, soliendo ser por un periodo de tiempo.

El coste de la nómina incluye los costes indirectos.

10.2. Impacto socioeconómico.

La tecnología de los volantes de inercia está en auge, abarcando cada vez más aplicaciones en diferentes sectores. Este trabajo está diseñado para un volante genérico, por lo que el empleo de la metodología se puede extender a cualquier aplicación.

La metodología requiere ciertos requisitos de tolerancias y precisión. Como se quiere una carcasa protectora ajustada al volante, se requiere que las máquinas usadas para la fabricación sean precisas. Además, los rodamientos deben estar perfectamente alineados, sobretodo en aplicaciones que requieran volantes de inercia de gran masa.

Por ello, es aconsejable usar la metodología en los casos que se conozcan bien las condiciones de contorno y se prevea estabilidad. Si el volante va a estar sometido a cargas externas fuertes u condiciones que predigan cierta vibración en el volante, no sería muy conveniente ceñir la carcasa protectora al volante de inercia por las complicaciones que se pueden derivar, principalmente rozamientos y choques. Si se quisiera usar habría que tener en cuenta estas fuerzas en el diseño de la superficie interior de la carcasa y rediseñar toda la envolvente.

La principal ventaja frente a otras tecnologías de acumulación de energía es que esta es una tecnología respetuosa con el medio ambiente. Contamina únicamente en el proceso de fabricación y transporte. Una vez instalada, puede durar hasta 35 años, compensando, sin degradarse ni perder capacidad operativa. Por lo tanto, puede considerarse como un sistema de almacenamiento de energía limpio, que no genera residuos.

En este trabajo se propone la expansión de esta tecnología a más aplicaciones, más concretamente a una aplicación doméstica. Actualmente, ya existen empresas que fabrican volantes de inercia para empresas, como pueden ser ActivePower (63) o PowerThru (64). También existen empresas que distribuyen baterías de litio para un uso casero (65). Estas baterías son usadas junto a pequeños sistemas de generación de energía (placas fotovoltaicas normalmente). Así, cumplen el mismo cometido que los volantes de inercia estabilizando la tensión y frecuencia.

El uso de los volantes de inercia para el hogar puede ser una realidad. Combinando los volantes de inercia modernos junto a una envolvente que no genere pérdidas se tiene un sistema de acumulación de energía efectivo. Como ya se ha visto anteriormente, los volantes actuales pueden almacenar gran cantidad de energía ocupando poco espacio. Además, al pesar poco (la masa del recuperador de frenada diseñado era de 8,53 Kg) es perfectamente posible usarlo en el hogar como ayuda en las horas que se use mayor cantidad de energía.

Por lo tanto, los volantes de inercia pueden sustituir a las baterías convencionales en las aplicaciones domésticas, ganando tanto en capacidad de almacenamiento como en vida útil. El principal problema es el coste de producción de un volante moderno, que actualmente es mayor al de otras tecnologías más baratas. Se espera que el avance en el estudio de los volantes de inercia y en la de producción de materiales compuestos solucione este problema, abaratando poco a poco los costes de producción y llevando esta tecnología a todas las aplicaciones posibles.

Capítulo 11

Conclusiones y trabajos futuros

11.1. Conclusiones.

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se ha propuesto una metodología para optimizar la envolvente de un volante de inercia genérico.

La principal conclusión es que, estudiando los movimientos y deformaciones del volante y la carcasa protectora, se puede conseguir una envolvente ajustada al volante de inercia. Este volumen minimizado es muy conveniente, ya sea para que la bomba de vacío tenga que evacuar mucho menos fluido, o para disminuir las fugas.

Además, se ha podido ver en qué zonas de los volantes de inercia aparecen las principales pérdidas por rozamiento. La mayoría del arrastre aparece en la superficie cilíndrica del volante, siguiéndole las superficies superior e inferior. Realizando una serie de estudios descritos, se puede diseñar la envolvente pudiendo asegurar que se han reducido las pérdidas aerodinámicas. Se ha podido demostrar que el rozamiento en los ejes es despreciable comparado con la resistencia que ofrece el volante de inercia.

El principal problema de la aplicación de la metodología es la exactitud que requiere. Dado que la carcasa está muy ceñida al volante, se requieren alineamientos muy precisos para evitar esfuerzos flectores y vibraciones indeseadas. Además, las tolerancias de fabricación deben ser del orden de la unidad o décima de micra para conseguir buenos resultados.

Mediante este trabajo, se han obtenido conocimientos en distintos ámbitos. Por ser un estudio multidisciplinar, se ha podido profundizar en el estudio de diferentes campos. En la rama de la mecánica, se han realizado estudios mediante el programa ANSYS aplicando la teoría de elasticidad, resistencia de materiales y vibraciones. Además, se han conseguido amplios conocimientos en los distintos módulos del programa. En el campo de la ciencia de materiales, se ha aprendido sobre materiales compuestos, en concreto sobre las fibras y el apilado de las mismas. En la rama de la mecánica de fluidos, se han aplicado los conceptos aprendidos en el grado de distintas maneras. Además, se ha profundizado en las cuestiones de turbulencia, tipos de flujo (Couette), y las fuerzas de arrastre.

11.2. Trabajos futuros.

Los trabajos futuros o líneas de investigación que se proponen son:

Respecto al estudio de la envolvente de volantes de inercia:

- Comprobación experimental de la metodología. A partir de un volante de inercia real, aplicar la metodología y ensayar utilizando una carcasa protectora y bomba de vacío óptimas. Comparar los resultados teóricos y experimentales.
- Estudiar en profundidad métodos de creación de vacío y el diseño de la bomba de vacío. Estudiar las diferentes bombas de vacío para diversas aplicaciones de las envolventes. Estudiar en profundidad la posibilidad de enclaustrar un fluido a baja presión.
- Estudiar en profundidad el sistema de seguridad propuesto. Diseñarlo y optimizarlo para comprobar su efectividad.
- Estudiar los límites de la carcasa. Calcular las fuerzas y vibraciones externas que puede soportar el sistema sin que se desestabilice.

Respecto al estudio de volantes de inercia en general:

- Crear una metodología de diseño para volantes de inercia modernos.
- Estudiar las pérdidas de energía en los rodamientos y optimizarlos. Crear una metodología para reducir el rozamiento y poder considerar una estabilidad perfecta del volante de inercia.
- Estudiar las pérdidas eléctricas.
- Estudiar en profundidad las soluciones para el arranque del volante de inercia. Estudiar las técnicas de reducción de vibraciones en profundidad.

Bibliografía

1. Benato, Anna Stoppato and Alberto. The Importance of Energy Storage. [aut. libro] Gerard M Crawley. *Energy Storage*. New Jersey : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2017.
2. *Compressed Air Energy Storage System Control and Performance Assessment Using Energy Harvested Index*. Hanif SedighNejad *, Tariq Iqbal and John Quicoe. 1, Canada : Electronics, 2014, Vol. 3.
3. Gonzalez, David Ugena. *Desarrollo de un Amacenedor Cinético de Energía*. Leganés : Universidad Carlos III de Madrid, 2008.
4. Björn Bolund, Hans Berhoff, Mats Leijon. *Flywheel energy and power storage systems*. Uppsala : Elsevier, 2005.
5. Bender, Donald. Flywheels. [aut. libro] Gerard M Crawley. *Energy Storage*. New Jersey : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2017, págs. 249-289.
6. Big Rhink Editors. Big Think. [En línea] [Citado el: 05 de Septiembre de 2017.] http://assets4.bigthink.com/system/idea_thumbnails/38697/size_896/flywheel.jpg?1307016904.
7. S. M Mousavi G, Faramarz Faraji, Abbas Majazi, Kamal Al-Haddad. *A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology*. s.l. : Elsevier, 2017.
8. Modern Flywheel Technology. [En línea] [Citado el: 10 de Septiembre de 2017.] http://assets4.bigthink.com/system/idea_thumbnails/38697/size_896/flywheel.jpg?1307016904.
9. Barbara H. Kenny, Peter E. Kascal, Ralp Jansen, Timothy Dever and Walter Santiago. *Control of a High Speed Flywheel System for Energy Storage in Space Applications*. Ohio : Nasa, 2004.
10. *Materials for Advanced Flywheel Energy-Storage Devices*. DeTeresa, S. J. 11, s.l. : MRSBulletin, 1999, Vol. 29. ISSN: 0883-7694.
11. ASM INTERNATIONAL. *Engineered Materials Handbook. Volume 1, Composites*. s.l. : ASM International, 1987. ISBN: 0-87170-279-7.
12. Berrocal, Luis Ortiz. *Resistencia de materiales*. s.l. : McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2007. ISBN: 8448156331.
13. Special Steel. Special Steel. [En línea] [Citado el: 23 de Agosto de 2017.] http://www.specialsteel-jy.com/SAE_950X.html.
14. The Engineering Tool Box. [En línea] [Citado el: 23 de Agosto de 2017.] http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html.

Bibliografía

15. Mansferrer, Lluís Ripoll. *Análisis y diseño de volantes de inercia de materiales compuestos*. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2005. ISBN: 9788469167335.
16. La Voz de La Palma. La Voz de La Palma. [En línea] 11 de Marzo de 2016. [Citado el: 15 de Agosto de 2017.] <http://lavozdelapalma.com/2016/03/11/el-proyecto-store-de-almacenamiento-cumple-tres-anos-desde-su-puesta-en-servicio-en-canarias/>.
17. Beacon Power. Beacon Power. [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2017.] <http://beaconpower.com/stephentown-new-york/>.
18. REE. Red Eléctrica Española. [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2017.] <http://www.ree.es/es/red21/idi/proyectos-idi/proyecto-volante-inercia>.
19. —. Red Eléctrica Española. [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2017.] http://www.ree.es/sites/default/files/gallery/volante_0.jpg.
20. —. Red Eléctrica Española. [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2017.] http://www.ree.es/sites/default/files/presentacion_volante_de_inercia_0.pdf.
21. El Mundo. ELMUNDO.es. [En línea] 23 de Octubre de 2014. [Citado el: 17 de Septiembre de 2017.] <http://www.elmundo.es/motor/2014/10/14/543d131ae2704efe368b4574.html>.
22. Anfac. Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones. [En línea] 04 de Septiembre de 2017. [Citado el: 17 de Septiembre de 2017.] http://anfac.com/noticias.action?idDoc=13714&accion=noticias_anfac.
23. Torotrak. Flybrid. [En línea] [Citado el: 2017 de Septiembre de 17.] <http://www.torotrak.com/products-partners/products/flybrid/>.
24. Autotenic. [En línea] 15 de Julio de 2015. [Citado el: 17 de Septiembre de 2017.] <http://autotecnic2000.com/2015/07/15/cuanto-falta-para-que-los-vehiculos-de-calle-dispongamos-del-kers-de-los-formula-1/>.
25. Alexander Sroklosa. Car and Drive. [En línea] 26 de Mayo de 2011. [Citado el: 23 de Agosto de 2017.] <http://blog.caranddriver.com/volvo-testing-kers-kinetic-energy-recovery-flywheels-for-its-lineup/>.
26. Paultran. [En línea] 1 de Mayo de 2013. [Citado el: 2017 de Agosto de 23.] https://s3.paultan.org/image/2013/04/Volvo_Flywheel_KERS_05.jpg.
27. Genta, G. *Kinetics Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 1985. ISBN: 978-0-408-01396-3.
28. Juvinal. [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2017.] <http://player.slideplayer.es/13/4040559/data/images/img35.jpg>.
29. Walter D. Pilkey, Deborah F. Pilkey. *Stress Concentration Factors*. s.l. : Peterson's, 1999.
30. ASM International. *ASM Ready Reference: Thermal Properties of Metals*. Ohio : ASM International, 2002. ISBN: 978-0-87170-768-0.
31. Hull, Derek. *Materiales compuestos*. Barcelona : Editorial Reverté S.A., 1987.
32. ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. s.l. : ASM International, 1990. ISBN-10: 0871703777.
33. French, A. P. *Vibraciones y ondas*. New York : Editorial Reverté S. A., 1982.
34. William Smith, Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. s.l. : McGraw-Hill, 2006. ISBN: 970-10-5638-8.

35. S. Kalpakjian, S. R. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México : Pearson Educación, 2008. ISBN: 978-970-26-1026-7.
36. Callister, William D. *Materials Science and Engineering*. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN-13: 978-0-471-73696-7.
37. ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook. Volume 2, Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Ma.* s.l. : ASM International, 1990. ISBN: 978-0-87170-378-1.
38. Martínez, Antonio Crespo. *Mecánica de Fluidos*. Madrid : Paraninfo, 2012. ISBN: 978-84-9732-292-8.
39. Nakayama, Y. *Introduction to Fluid Mechanics*. s.l. : Butterworth Heinemann, 1999. ISBN: 0-340-67649-3.
40. Childs, Peter. *Rotating Flow*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN: 9780128102121.
41. *High-Reynolds Number Taylor-Couette Turbulence*. Siegfried Grossmann, Detlef Lohse, Chao Sun. s.l. : Annual Review of Fluid Mechanics, 2016, Vol. 48.
42. *Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders*. David Andereck, S. S. Liu, Harry L. Swinney. Texas : University of Texas, 1985, Vol. 164.
43. Hsing-Pang Liu, Mike Werst, and Jonathan J. Hahne. *Prediction of Windage Losses of an Enclosed High Speed Composite Rotor in Low Air Pressure Environments*. Austin : The University of Texas, 2003.
44. O'Hanlon, John F. *A User's Guide to Vacuum Technology, Third Edition*. s.l. : Wiley-Interscience, 2003.
45. Genium Publishing Corporation. *The General Electric Fluid Flow Data Book*. New York : Genium Publishing Corporation, 1994.
46. ULVAC. [En línea] [Citado el: 19 de Septiembre de 2017.] <http://www.ulvac.com/vacuum-pumps-components/system.cfm?cid=42&scid=101&sid=7>.
47. —. [En línea] [Citado el: 19 de Septiembre de 2017.] http://www.ulvac.com/userfiles/files/Vacuum%20Pumps/pumps_catalog_en_1303.pdf.
48. Leybold. [En línea] [Citado el: 21 de Septiembre de 2017.] <https://www.leybold.com/en/products/high-vacuum-pumps/turbovac-turbovac-mag/>.
49. Frank P. Incropera, David P. DeWitt. *Fundamentos de transferencia de calor*. s.l. : Prentice Hall, 1996. ISBN:970-17-0170-4.
50. Dpto. Ingeniería Térmica y de Fluidos. *Apuntes de Transferencia de Calor. Transferencia de calor por radiación*. 2015-2016.
51. *Some electrical and thermal characteristics of helium and sulfur-hexafluoride mixtures*. Cobine, J. D. 6, s.l. : Electrical Engineering, 1955, Vol. 74. ISSN: 0095-9197.
52. Ajisman, Jun Kobuchi, Ken Oobayashi, Ryuichi Shimada. *Windage loss reduction of flywheel/generator system using He and SF6 Gas Mixtures*. Tokyo : Tokyo Institute of Technology, Research Laboratory for Nuclear Reactors, 2002. ISBN: 0-7803-4515-0.
53. MathWorks. *MATLAB 8.3*. [Software] 2016.
54. Dassault Systemes. *CATIA v5*. [Software] 2016.

Bibliografía

55. ANSYS, Inc. *ANSYS 17.1*. [Software] 2016.
56. yWorks. *Yed Graph Editor 3.17*. [Software] 2017.
57. Microsoft Office. *Microsoft Office Profesional 2016*. [Software]
58. *Determining the mechanical losses in a high-speed motor on the example of a flywheel energy storage system*. MARCIN BASZYŃSKI, STANISŁAW PIRÓG. 3, s.l. : Electrical Engineering, 2012, Vol. 61.
59. Fumiya Asamia, Masaaki Miyatakea, Shigeka Yoshimotoa, Eitaro Tanakab, Takuma Yamauchib. *A method of reducing windage power loss of a high-Speed motor using a viscous vacuum pump*. s.l. : Precision Engineering, 2016.
60. *Cylindrical Rotor Design for Acoustic Noise and Windage Loss Reduction in Switched Reluctance Motor for HEV Applications*. Kyohei Kiyota, Takeo Kakishima, Akira Chiba, M. Azizur Rahman. 1, s.l. : IEEE, 2016, Vol. 52.
61. John Michael Pinneo, Portola Valley, Jonathan Forrest Garber, Hillsborough. *Vacuum Chambers for flywheel*. US 2012/0097570 A1 Estados Unidos, 16 de Abril de 2012.
62. *A methodology for evaluating and reducing rotor losses, heating, and operational limitations of high-speed flywheel batteries*. Flynn, Mark Matthew. 12, s.l. : ProQuest Dissertations And Theses. The University of Texas at Austin, 2003, Vol. 64. ISBN: 9780496637416.
63. ActivePower. [En línea] [Citado el: 17 de Septiembre de 2017.] <http://www.activepower.com/en-US>.
64. PowerThru. [En línea] [Citado el: 17 de Septiembre de 2017.] <http://powerthru.com/index.html>.
65. Tesla. [En línea] [Citado el: 17 de Septiembre de 2017.] https://www.tesla.com/es_ES/powerwall.
66. Leybold. [En línea] [Citado el: 21 de Septiembre de 21.] <https://www.leybold.com/en/downloads/download-documents/catalogue-chapters-pdf/>.

Anexos

Anexo A

Código MATLAB

A continuación, se presenta el código MATLAB: “Optimización de parámetros de volantes de inercia enteros”.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE VOLANTES DE INERCIA ENTEROS
% TFG: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE ENVOLVENTES DE VOLANTES DE INERCIA
% PABLO ÁNGEL PRIETO DÍAZ
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%% DESCRIPCIÓN %%%%%

% El siguiente programa está diseñado para calcular parámetros optimizados
% de un volante de inercia a partir de los datos de entrada.

% A partir de los radios límite introducidos, el programa dará los
% parámetros de los volantes que haya entre esos dos valores.

% En el caso de que existan condiciones limitantes, el programa indicará
% si los valores son óptimos o están siendo limitados por alguna condición
% de contorno.

% En ese caso, el programa dará una tabla de datos adicionales donde se
% expone cuales serian los datos si no se impusieran condiciones
% limitantes.

% Si no se desea imponer condiciones límites, se deben dejar los parámetros
% con valor de 0. Estos son los parámetros dentro del apartado
% DATOS DE ENTRADA OPCIONALES.

% Si se desea una única solución, el programa calculará los valores para
% el valor introducido como radio mínimo.

% El programa da los valores para volantes de inercia cilíndricos y
% enteros. Sólo está basado en la tracción que soporta, sin tener en
% cuenta otros factores.

% Los parámetros obligatorios son: Densidad, TensionMax, CoefPoisson,
% Ecin, Rmin, Rmax, Nsoluciones.

% Los parámetros opcionales son: Lmax, Wmin, Wmax; FactorSeguridad.

clear
%%%%% DATOS DE ENTRADA OBLIGATORIOS %%%%%

%% Datos de material del volante de inercia %%
```

Anexo A. Código MATLAB

```
Densidad = 7850; % Densidad [Kg/m3]
TensionMax = 250e6; % Límite elástico [Pa]
CoefPoisson = 0.3; % Coeficiente de Poisson

%%% Energía que se desea acumular %%%
Ecin = 2e8; % Energía [J]

%%% Rango de Radios que se desea calcular %%%
Rmin = 0.2; % Radio mínimo [m]
Rmax = 1.5; % Radio máximo [m]

%%% Número de soluciones que se desea %%%
Nsoluciones = 20;

%%%%% DATOS DE ENTRADA OPCIONALES %%%%%

%%% Longitud máxima que se desea %%%
Lmax = 4; % Longitud máxima [m]

%%% Rango de velocidades de funcionamiento %%%
Wmin = 2000; % Velocidad angular mínima [rpm]
Wmax = 7000; % Velocidad angular máxima [rpm]

%%% Factor de seguridad %%%
% De 0 a 1 define cuanto de cerca se quiere estar de la tension máxima al
% rotar a la velocidad máxima
FactorSeguridad = 0.95;

%%%%% ITERACIÓN %%%%%

% Variables auxiliares
Nopt = 0;
OP = 0;
FAIL = 0;
EXISTE = 0;
Ideal = 'Sí';
RELACION1 = 0;
RELACION2 = 0;
Walert = 0;
Lalert1 = 0;
Lalert2 = 0;
Wcont = 0;
Lcont1 = 0;
Lcont2 = 0;

% Comprobación de Datos de entrada correctos
if Densidad<=0 || TensionMax<=0 || CoefPoisson<-1 || CoefPoisson>0.5
    fprintf('ERROR: Datos de material incompatibles.\nTodos los datos ')
    fprintf('deben ser rellenados de forma coherente.\nLa densidad debe ')
    fprintf('estar en Kg/m3.\nEl límite elástico debe estar en Pa.\nEl ')
    fprintf('coeficiente de Poisson debe estar entre valores de 0 y ')
    fprintf('0.5, salvo para materiales augéticos que puede valer de -1 a')
    fprintf(' 0.5. Los valores típicos van de 0.2 a 0.4\n')
    FAIL = 1;
elseif (Rmax<=0) && (Nsoluciones~=1) || (Rmax<Rmin) && (Nsoluciones~=1)||...
    Rmin<0 || Nsoluciones<=0 || mod(Nsoluciones,1)~=0 || Ecin<=0
    fprintf('ERROR: Datos de entrada incompatibles.\nError en el apartado')
    fprintf(' de DATOS DE ENTRADA OBLIGATORIOS.\nTodos los datos ')
    fprintf('deben ser rellenados de forma coherente.\nEl número de ')
    fprintf('soluciones debe ser un número entero y valer 1 o más.\nEl ')
    fprintf('radio mínimo debe valer mayor que 0.\nSi se desea más de ')
    fprintf('una solución, el radio máximo debe ser superior al radio ')
    fprintf('mínimo.\nDebe haber un valor de energía cinética.\n')
    FAIL = 1;
```

```

elseif Lmax<0 || ((Wmax<Wmin) && (Wmax~=0)) || FactorSeguridad>1 ||...
    FactorSeguridad<0
    fprintf('ERROR: Datos de entrada incompatibles.\nError en el apartado')
    fprintf(' de DATOS DE ENTRADA OPCIONALES.\nTodos los datos ')
    fprintf('deben ser rellenados de forma coherente.\nLos valores que ')
    fprintf('no se deseen introducir se deben igualar a 0.\n La longitud ')
    fprintf('máxima debe ser mayor que 0.\n La velocidad máxima de ')
    fprintf('rotación debe ser superior a la velocidad mínima de rotación')
    fprintf('\nEl factor de seguridad debe estar entre los valores de ')
    fprintf('0 y 1.\n')
    FAIL = 1;
end

if FAIL == 0
    % Matrices solución
    Mat1 = zeros(Nsoluciones,7);
    Mat2 = zeros(Nopt,7);
    ArrWcont = zeros(Wcont);
    ArrLcont1 = zeros(Lcont1);
    ArrLcont2 = zeros(Lcont2);

    % Cálculo límite elástico
    TensionMax = FactorSeguridad*TensionMax;

    % Datos para la primera iteración
    R = Rmin;
    L = 0;

    % Iteración
    for fl=1:Nsoluciones
        Lopt = ((3+CoefPoisson)*Ecin)/(2*pi*TensionMax*(R^2));
        Mopt = Densidad*Lopt*pi*(R^2);
        wopt = sqrt((8*TensionMax)/(Densidad*(R^2)*(3+CoefPoisson)));
        Wopt = wopt*(30/pi);
        if (Lmax==0) || ((Lmax~=0) && (Lopt<Lmax)) % Si L está en rango
            if ((Wmax==0) && (Wmin==0)) || ((Wopt<Wmax) && (Wmin==0)) ||...
                ((Wopt>Wmin) && (Wmax==0)) || ((Wopt<Wmax) && (Wopt>Wmin))
                % Si W está en rango
                L = Lopt;
                M = Mopt;
                W = Wopt;
                EcinR = Ecin;
                Tension = TensionMax;
                if (L/R)>10 || (R/L)>10 % Si L/R es demasiado grande
                    RELACION1 = 1;
                    Lalert1 = 1;
                end
            elseif (Wmax~=0) && (Wmax<Wopt) % Si W es mayor que Wmax
                OP = 1;
                Nopt = Nopt + 1;
                Ideal = 'No';
                W = Wmax;
                w = W*(pi/30);
                I = (2*Ecin)/(w^2);
                M = (2*I)/(R^2);
                L = M/(Densidad*pi*(R^2));
                if ((L<Lmax) && (Lmax~=0)) || (Lmax==0)
                    EcinR = Ecin;
                    Tension = (1/8)*Densidad*(w^2)*(R^2)*(3+CoefPoisson);
                    if (L/R)>10 || (R/L)>10 % Si L/R es demasiado grande
                        RELACION1 = 1;
                        Lalert1 = 1;
                    end
                end
                if (Lopt/R)>10 || (R/Lopt)>10 % Si L/R es demasiado
                    % grande
                    RELACION2 = 1;
                    Lalert2 = 1;
            end
        end
    end
end

```

Anexo A. Código MATLAB

```
        end
    else
        L = Lmax;
        M = Densidad*L*pi*(R^2);
        I = 0.5*M*(R^2);
        EcinR = 0.5*I*(w^2);
        Tension = (1/8)*Densidad*(w^2)*(R^2)*(3+CoefPoisson);
        if (L/R)>10 || (R/L)>10 % Si L/R es demasiado grande
            RELACION1 = 1;
            Lalert1 = 1;
        end
        if (Lopt/R)>10 || (R/Lopt)>10 % Si L/R es demasiado
            % grande
            RELACION2 = 1;
            Lalert2 = 1;
        end
    end
elseif (Wmin~=0) && (Wmin>Wopt) % Si W es menor que Wmin
    OP = 1;
    Nopt = Nopt + 1;
    Ideal = 'No';
    W = 0;
    L = 0;
    M = 0;
    w = 0;
    EcinR = 0;
    Tension = 0;
    Walert = 1;
    if (Lopt/R)>10 || (R/Lopt)>10 % Si L/R es demasiado grande
        RELACION2 = 1;
        Lalert2 = 1;
    end
end
else % Si L no está en rango
    OP = 1;
    Nopt = Nopt + 1;
    Ideal = 'No';
    L = Lmax;
    if (L/R)>10 || (R/L)>10 % Si L/R es demasiado grande
        RELACION1 = 1;
        Lalert1 = 1;
    end
    if (Lopt/R)>10 || (R/Lopt)>10 % Si L/R es demasiado grande
        RELACION2 = 1;
        Lalert2 = 1;
    end
end
M = Densidad*L*pi*(R^2);
I = 0.5*M*(R^2);
if (Wmax==0) && (Wmin==0) || ((Wopt<Wmax) && (Wmin==0)) ||...
    ((Wopt>Wmin) && (Wmax==0)) || ((Wopt<Wmax) && (Wopt>Wmin))
    % Si W está en rango
    W = Wopt;
    w = wopt;
    EcinR = 0.5*I*(w^2);
    Tension = TensionMax;
elseif (Wmax~=0) && (Wmax<Wopt) % Si W es mayor que Wmax
    W = Wmax;
    w = W*(pi/30);
    I = (2*Ecin)/(w^2);
    M = (2*I)/(R^2);
    L = M/(Densidad*pi*(R^2));
    if ((L<Lmax) && (Lmax~=0)) || (Lmax==0)
        EcinR = Ecin;
        Tension = (1/8)*Densidad*(w^2)*(R^2)*(3+CoefPoisson);
        if (L/R)>10 || (R/L)>10 % Si L/R es demasiado grande
            RELACION1 = 1;
            Lalert1 = 1;
        end
    end
end
```

```

        if (Lopt/R)>10 || (R/Lopt)>10 % Si L/R es demasiado
            % grande
            RELACION2 = 1;
            Lalert2 = 1;
        end
    else
        L = Lmax;
        M = Densidad*L*pi*(R^2);
        I = 0.5*M*(R^2);
        EcinR = 0.5*I*(w^2);
        Tension = (1/8)*Densidad*(w^2)*(R^2)*(3+CoefPoisson);
        if (L/R)>10 || (R/L)>10 % Si L/R es demasiado grande
            RELACION1 = 1;
        end
        if (Lopt/R)>10 || (R/Lopt)>10 % Si L/R es demasiado
            % grande
            RELACION2 = 1;
            Lalert2 = 1;
        end
    end
elseif (Wmin~=0) && (Wmin>Wopt) % Si W es menor que Wmin
    W = 0;
    L = 0;
    M = 0;
    w = 0;
    EcinR = 0;
    Tension = 0;
    Walert = 1;
    if (Lopt/R)>10 || (R/Lopt)>10 % Si L/R es demasiado grande
        RELACION2 = 1;
        Lalert2 = 1;
    end
end
end
end
% Guardar datos
Mat1(1,f1) = f1;
Mat1(2,f1) = R;
Mat1(3,f1) = L;
Mat1(4,f1) = M;
Mat1(5,f1) = W;
Mat1(6,f1) = EcinR;
Mat1(7,f1) = Tension;
Id1{f1} = Ideal;
if OP == 1
    Mat2(1,Nopt) = f1;
    Mat2(2,Nopt) = R;
    Mat2(3,Nopt) = Lopt;
    Mat2(4,Nopt) = Mopt;
    Mat2(5,Nopt) = Wopt;
    Mat2(6,Nopt) = Ecin;
    Mat2(7,Nopt) = TensionMax;
    Id2{Nopt} = 'Sí';
end
if Walert == 1
    Wcont = Wcont + 1;
    ArrWcont(Wcont) = f1;
end
if Lalert1 == 1
    Lcont1 = Lcont1 + 1;
    ArrLcont1(Lcont1) = f1;
end
if Lalert2 == 1
    Lcont2 = Lcont2 + 1;
    ArrLcont2(Lcont2) = f1;
end
% R para la siguiente iteración
if f1 < Nsoluciones
    R = R + (Rmax-Rmin)/(Nsoluciones-1);

```

Anexo A. Código MATLAB

```
end
% Restablecimiento de valores
OP = 0;
Ideal = 'Sí';
Walert = 0;
Lalert1 = 0;
Lalert2 = 0;
end
end

%%%%% RESULTADOS %%%%%
if FAIL == 0
    % Comprobación de que exista algún resultado válido
    for f2=1:Nsoluciones
        if Mat1(3,f2) ~= 0
            EXISTE = 1;
            break
        end
    end
    if EXISTE==0
        fprintf('ERROR: Datos de entrada incompatibles.\n')
        fprintf('Se recomienda cambiar una o varias de las siguientes ')
        fprintf('opciones:\n 1) Disminuir la velocidad de rotación ')
        fprintf('mínima\n 2) Disminuir el radio mínimo.\n 3) Cambiar el ')
        fprintf('material a uno con mayor límite elástico.\n 4) Cambiar ')
        fprintf('el material a uno con menor densidad.\n')
        FAIL = 1;
    end

    % Construcción de tablas
    T1 = table;
    T1.Solucion = Mat1(1,1:f1)';
    T1.Radio_m = Mat1(2,1:f1)';
    T1.Longitud_m = Mat1(3,1:f1)';
    T1.Masa_Kg = Mat1(4,1:f1)';
    T1.Velocidad_rpm = Mat1(5,1:f1)';
    T1.Energia_J = Mat1(6,1:f1)';
    T1.Tension_Pa = Mat1(7,1:f1)';
    T1.Condiciones_Ideales = Id1';

    if Nopt > 0
        T2 = table;
        T2.Solucion = Mat2(1,1:Nopt)';
        T2.Radio_m = Mat2(2,1:Nopt)';
        T2.Longitud_m = Mat2(3,1:Nopt)';
        T2.Masa_Kg = Mat2(4,1:Nopt)';
        T2.Velocidad_rpm = Mat2(5,1:Nopt)';
        T2.Energia_J = Mat2(6,1:Nopt)';
        T2.Tension_Pa = Mat2(7,1:Nopt)';
        T2.Condiciones_Ideales = Id2';
    end

    % Display
    fprintf('\n --- SOLUCIÓN --- \n')
    fprintf('Resultados para los datos de entrada introducidos:\n')

    % Advertencia de relación
    if RELACION1 == 1
        if Lcont1 > 1
            fprintf('ADVERTENCIA: En las soluciones ')
            if Lcont1 > 2
                fprintf('%d, ',ArrLcont1(1:(Lcont1-2)))
            end
            fprintf('%d ',ArrLcont1(Lcont1-1))
            fprintf('y ')
            fprintf('%d ',ArrLcont1(Lcont1))
        end
    end
end
```

```

        fprintf('la relación entre la longitud y el radio del volante')
        fprintf(' de inercia excede de 10.\n')
    else
        fprintf('ADVERTENCIA: En la solución ')
        fprintf('%d ',ArrLcont1)
        fprintf('la relación entre la longitud y el radio del volante')
        fprintf(' de inercia excede de 10.\n')
    end
end
end

% Advertencia de W más pequeña que Wmin
if Wcont > 0
    if Wcont > 1
        fprintf('ADVERTENCIA: En las soluciones ')
        if Wcont > 2
            fprintf('%d, ',ArrWcont(1:(Wcont-2)))
        end
        fprintf('%d ',ArrWcont(Wcont-1))
        fprintf('y ')
        fprintf('%d ',ArrWcont(Wcont))
        fprintf('la velocidad angular es menor que la velocidad ')
        fprintf('angular mínima. No se puede superar o sobrepasaría ')
        fprintf('el límite elástico.\n')
    else
        fprintf('ADVERTENCIA: En la solución ')
        fprintf('%d ',ArrWcont)
        fprintf('la velocidad angular es menor que la velocidad ')
        fprintf('angular mínima. No se puede superar o sobrepasaría ')
        fprintf('el límite elástico.\n')
    end
end
display(T1)

if Nopt > 0
    fprintf('Resultados sin tener en cuenta las limitaciones:\n')
    % Advertencia de relación
    if RELACION2 == 1
        if Lcont2 > 1
            fprintf('ADVERTENCIA: En las soluciones ')
            if Lcont2 > 2
                fprintf('%d, ',ArrLcont2(1:(Lcont2-2)))
            end
            fprintf('%d ',ArrLcont2(Lcont2-1))
            fprintf('y ')
            fprintf('%d ',ArrLcont2(Lcont2))
            fprintf('la relación entre la longitud y el radio del ')
            fprintf('volante de inercia excede de 10.\n')
        else
            fprintf('ADVERTENCIA: En la solución ')
            fprintf('%d ',ArrLcont2)
            fprintf('la relación entre la longitud y el radio del ')
            fprintf('volante de inercia excede de 10.\n')
        end
    end
end
display(T2)
end
end
end

```

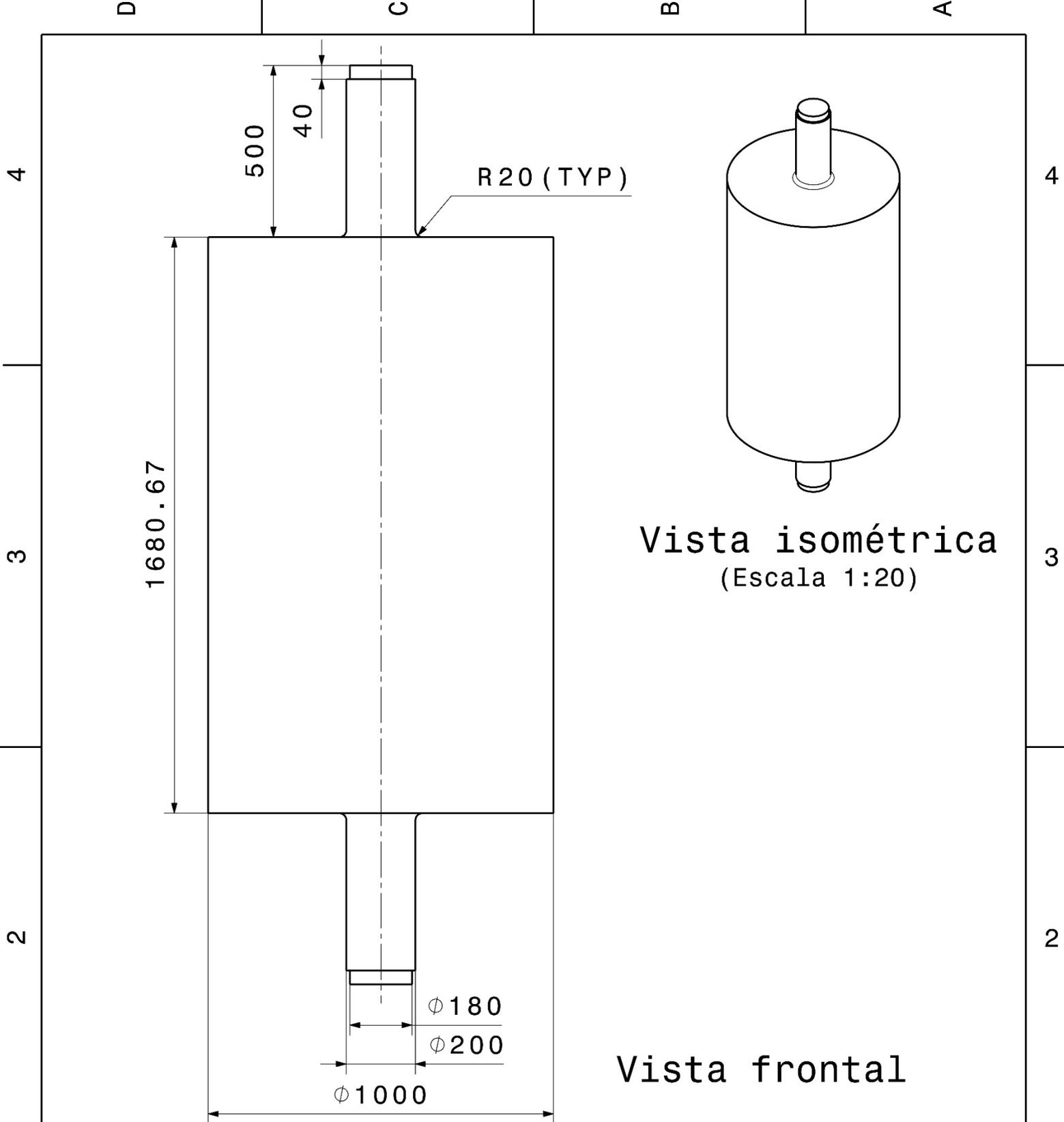

Anexo B

Planos de los volantes de inercia

A continuación, se presentan los planos de los volantes calculados.

Todas las cotas están expresadas en milímetros.

La escala de cada plano viene indicada en el mismo.



Vista isométrica
(Escala 1:20)

Vista frontal

| | | | | |
|---|-----------------------------------|---|--------------------------------|---|
| This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement. | | TFG: Metodología para el diseño de envolventes de volantes de inercia | | |
| DRAWN BY P. A. Prieto | | DRAWING TITLE Acotación del volante de inercia teórico | | |
| DATE 15/08/2017 | CHECKED BY P. A. Prieto | DATE 02/09/2017 | SIZE A4 | DRAWING NUMBER Volante de Inercia 1 |
| DESIGNED BY P. A. Prieto | DATE 15/08/2017 | SCALE 1:15 | WEIGHT(kg) 10605,727 | REV 1 |
| | | | SHEET 1/1 | |

D

C

B

A

4

4

3

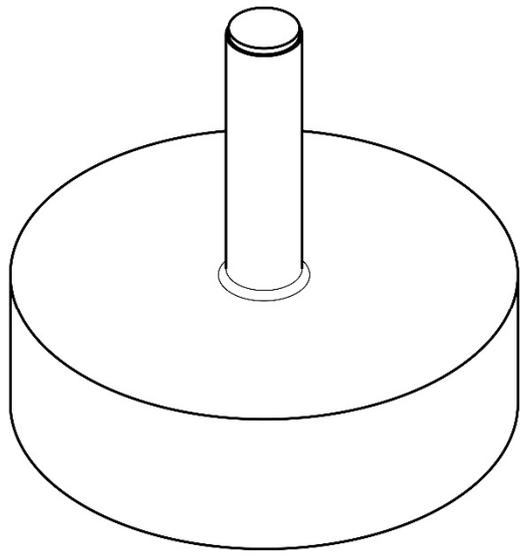
3

2

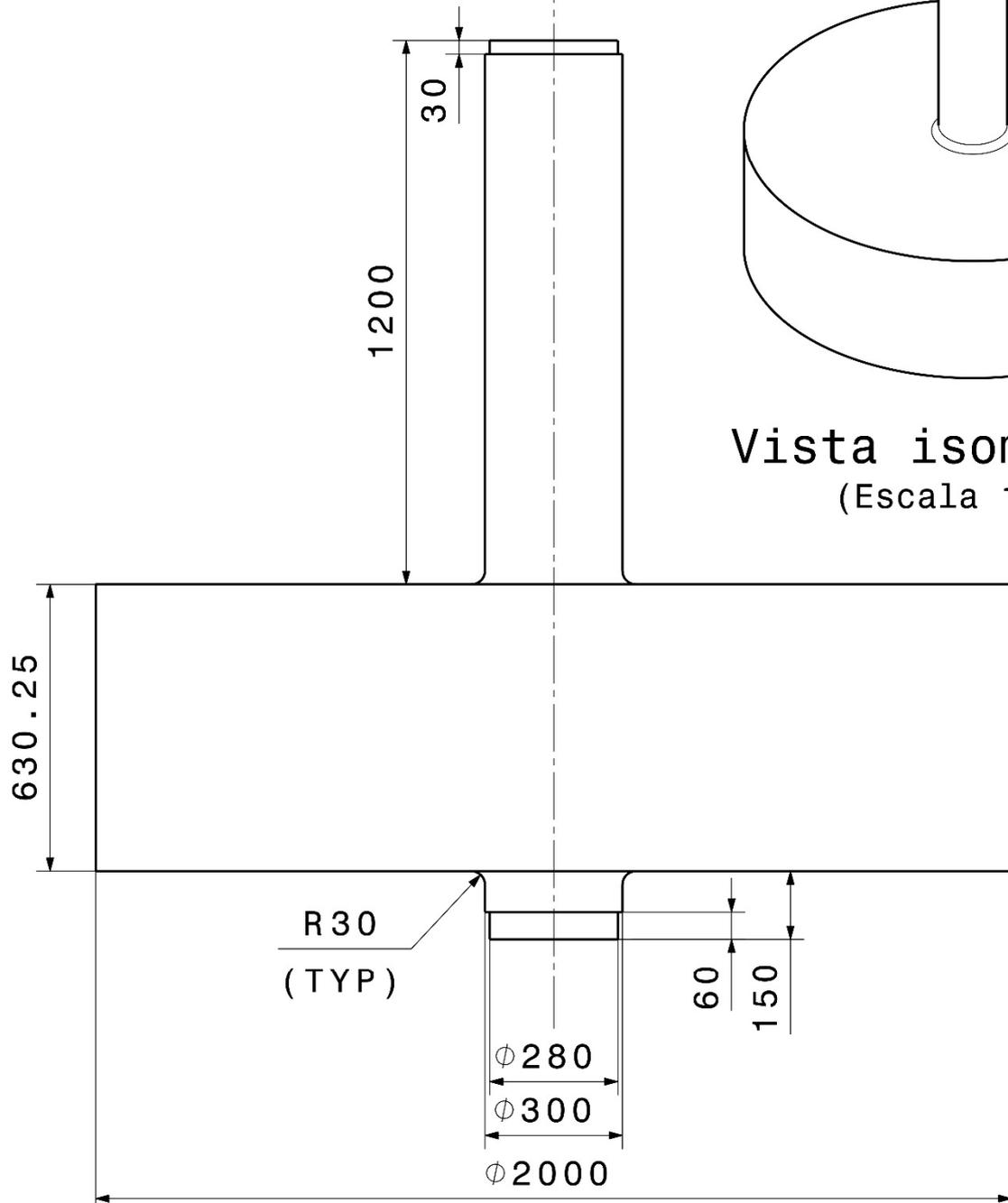
2

1

1



Vista isométrica
(Escala 1:20)



Vista frontal

| | | | | |
|---|-----------------------------------|---|------------------------|---|
| This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement. | | TFG: Metodología para el diseño de envolventes de volantes de inercia | | |
| DRAWN BY P. A. Prieto | | DRAWING TITLE Acotación del acumulador de energía de alta capacidad. | | |
| DATE 21/08/2017 | CHECKED BY P. A. Prieto | DATE 02/09/2017 | SIZE A4 | DRAWING NUMBER Volante de Inercia 2 |
| DESIGNED BY P. A. Prieto | DATE 21/08/2017 | SCALE 1:15 | WEIGHT(kg) 16247,11 | REV 1 |
| | | SHEET | | 1/1 |

D

A

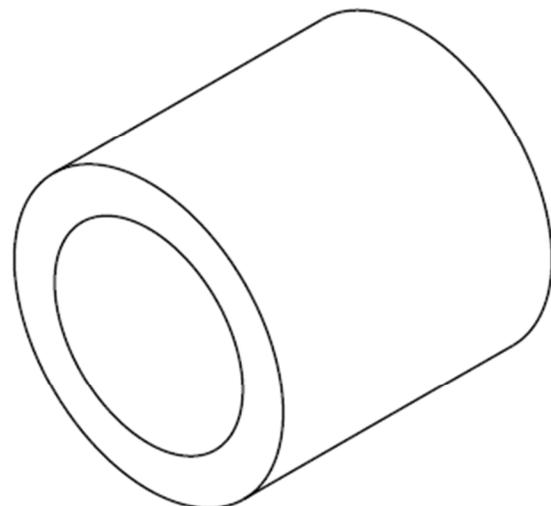
D

C

B

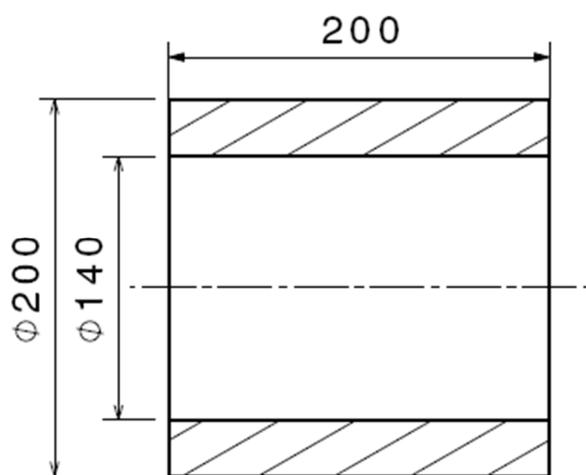
A

4



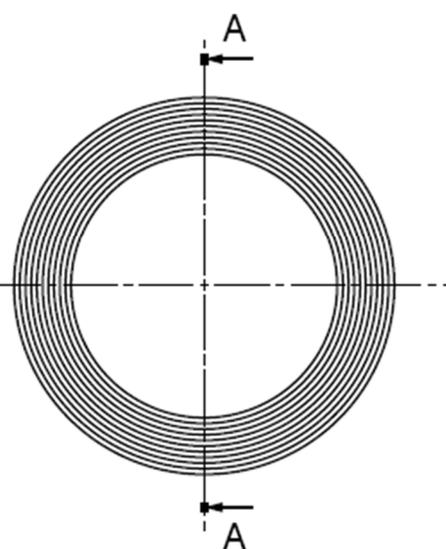
Vista isométrica

3



Vista de corte A-A

3



Vista frontal

2

Posición de laminado

| Lámina | Orientación | Material | Espesor |
|--------|-------------|------------|---------|
| 1:300 | 0° | Epoxy CFRP | 0,1 |

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

TFG: Metodología para el diseño de
envolventes de volantes de inercia

DRAWN BY
P. A. Prieto

DATE
28/08/2017

DRAWING TITLE
Acotación del recuperador de frenada en
vehículos híbridos.

CHECKED BY
P. A. Prieto

DATE
02/09/2017

SIZE A4 DRAWING NUMBER Volante de Inercia 3 REV 1

DESIGNED BY
P. A. Prieto

DATE
28/08/2017

SCALE 1:4 WEIGHT(kg) 5,64 SHEET 1/1

D

A

1

Anexo C

Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

A continuación, se muestran los resultados de las diferentes simulaciones y cálculos para el acumulador de energía de alta capacidad y el recuperador de frenada en vehículos híbridos.

1. Resultados de las simulaciones del acumulador de energía de alta capacidad:
 - 1.1. Estudio del movimiento del volante de inercia.

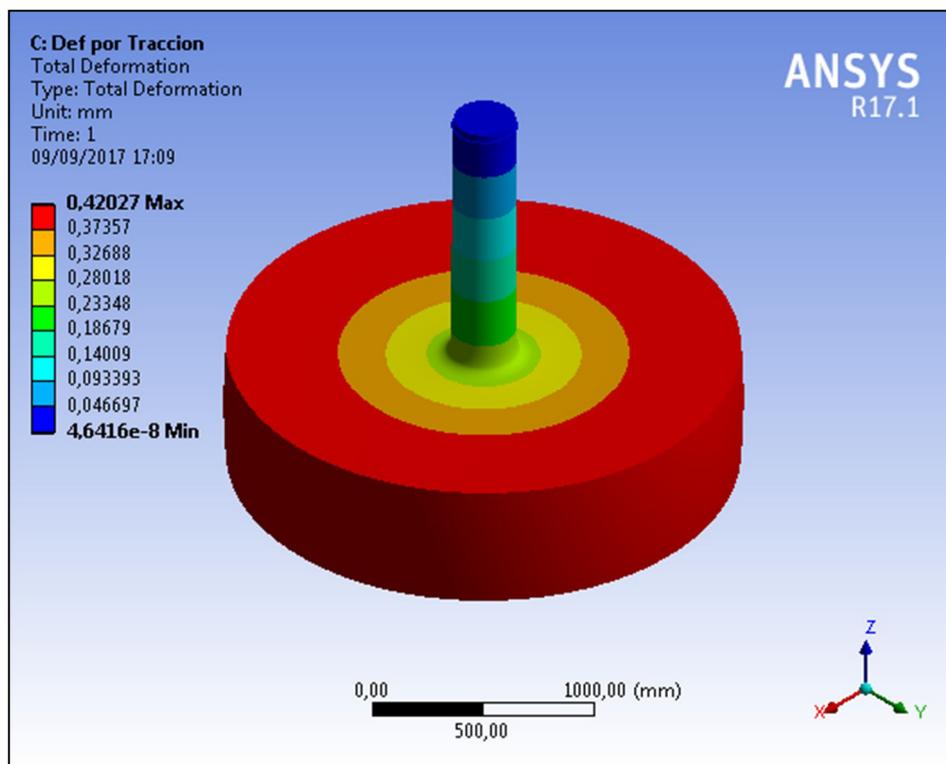


Figura 47: Deformación total del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la tracción.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

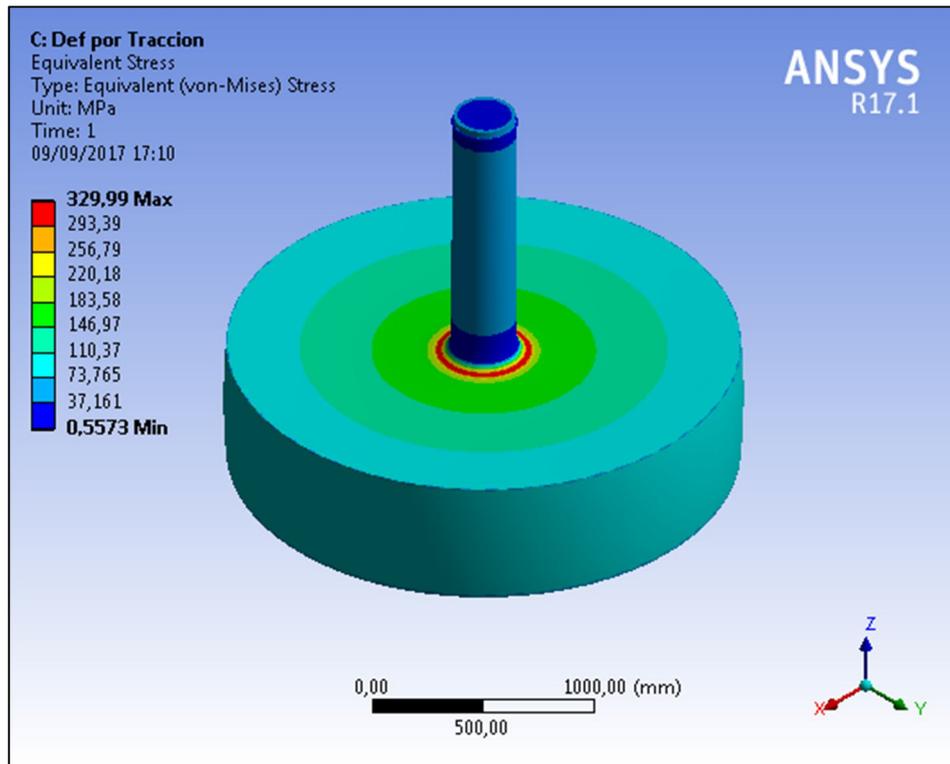


Figura 48: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la tracción.

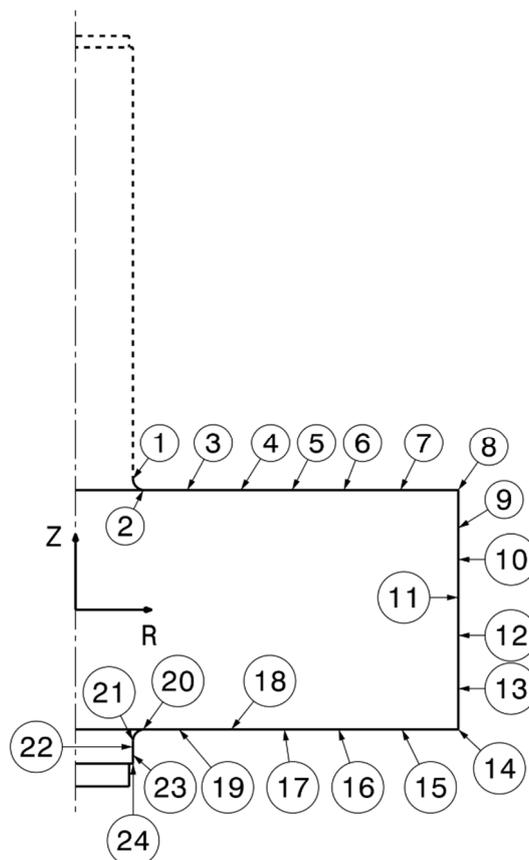


Figura 49: Perfil de puntos del acumulador de energía de alta capacidad.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

| Acumulador de energía de alta capacidad | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,15 | 0,34513 | 0,02207 | -0,24154 | 0,24255 |
| 2 | 0,18 | 0,31513 | 0,09081 | -0,24949 | 0,26550 |
| 3 | 0,317 | 0,31513 | 0,02456 | -0,25858 | 0,25974 |
| 4 | 0,453 | 0,31513 | 0,21489 | -0,24924 | 0,32909 |
| 5 | 0,59 | 0,31513 | 0,19366 | -0,23267 | 0,30272 |
| 6 | 0,727 | 0,31513 | 0,29491 | -0,21085 | 0,36253 |
| 7 | 0,863 | 0,31513 | 0,35339 | -0,18539 | 0,39907 |
| 8 | 1 | 0,31513 | 0,36841 | -0,15856 | 0,40108 |
| 9 | 1 | 0,21009 | 0,38420 | -0,14717 | 0,41142 |
| 10 | 1 | 0,10504 | 0,39256 | -0,13426 | 0,41488 |
| 11 | 1 | 0 | 0,39508 | -0,12033 | 0,41300 |
| 12 | 1 | -0,10504 | 0,39237 | -0,10641 | 0,40654 |
| 13 | 1 | -0,21009 | 0,38383 | -0,09351 | 0,39506 |
| 14 | 1 | -0,31513 | 0,36784 | -0,08214 | 0,37690 |
| 15 | 0,863 | -0,31513 | 0,35283 | -0,05504 | 0,35710 |
| 16 | 0,727 | -0,31513 | 0,29438 | -0,02926 | 0,29583 |
| 17 | 0,59 | -0,31513 | 0,19325 | -0,00705 | 0,19338 |
| 18 | 0,453 | -0,31513 | 0,21432 | 0,00997 | 0,21455 |
| 19 | 0,317 | -0,31513 | 0,02448 | 0,01988 | 0,03153 |
| 20 | 0,18 | -0,31513 | 0,09024 | 0,01193 | 0,09102 |
| 21 | 0,15 | -0,34513 | 0,02201 | 0,00587 | 0,02277 |
| 22 | 0,15 | -0,36513 | 0,00886 | 0,00604 | 0,01072 |
| 23 | 0,15 | -0,38513 | 0,00218 | 0,00691 | 0,00724 |
| 24 | 0,15 | -0,40513 | -0,00022 | 0,00753 | 0,00753 |

Tabla 44: Perfil de deformación por tracción del acumulador de energía de alta capacidad.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

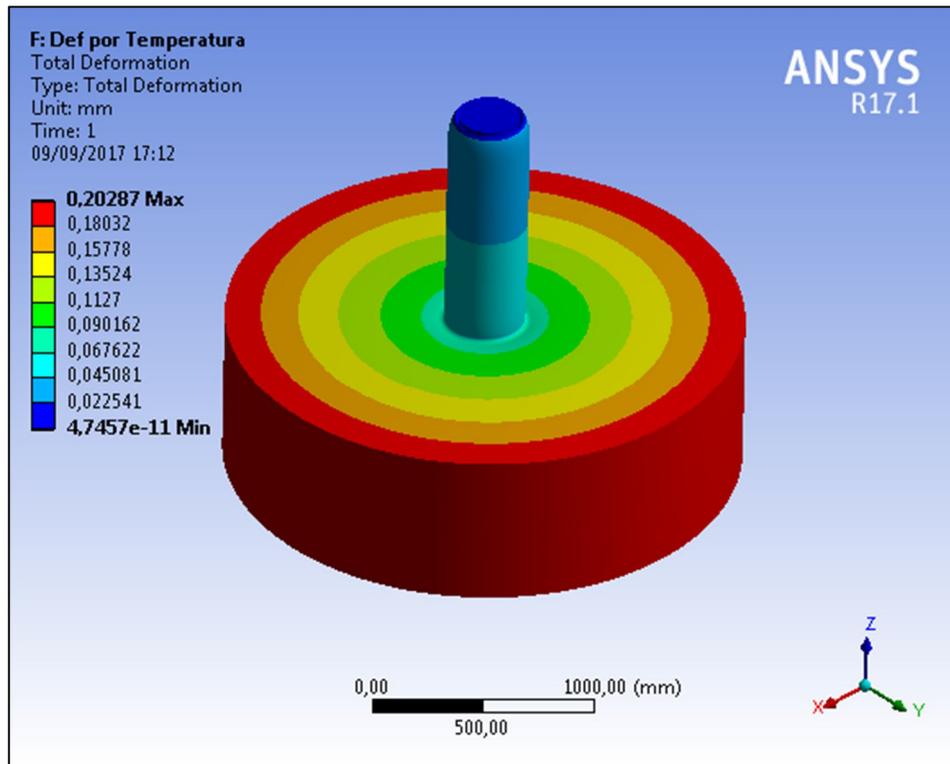


Figura 50: Deformación total del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la temperatura.

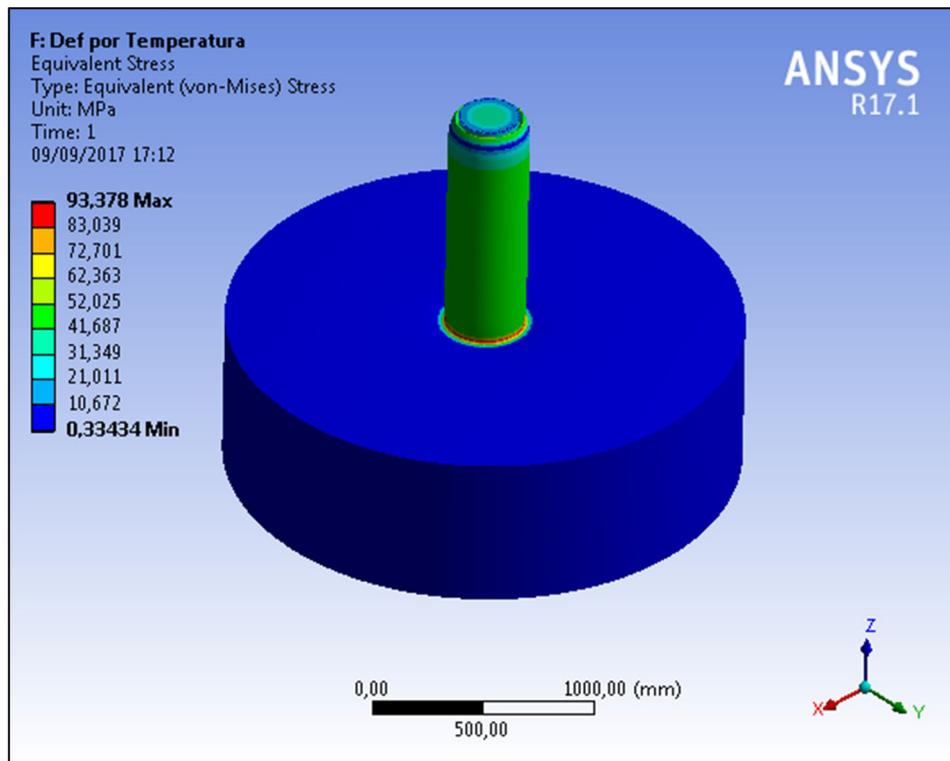


Figura 51: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad por efecto de la temperatura.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

| Acumulador de energía de alta capacidad | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,15 | 0,34513 | 0,03123 | 0,05524 | 0,06346 |
| 2 | 0,18 | 0,31513 | 0,03178 | 0,06920 | 0,07615 |
| 3 | 0,317 | 0,31513 | 0,01918 | 0,08295 | 0,08514 |
| 4 | 0,453 | 0,31513 | -0,01498 | 0,08554 | 0,08684 |
| 5 | 0,59 | 0,31513 | -0,08968 | 0,08608 | 0,12431 |
| 6 | 0,727 | 0,31513 | -0,00067 | 0,08613 | 0,08613 |
| 7 | 0,863 | 0,31513 | -0,00384 | 0,08611 | 0,08620 |
| 8 | 1 | 0,31513 | 0,18365 | 0,08612 | 0,20284 |
| 9 | 1 | 0,21009 | 0,18367 | 0,06705 | 0,19553 |
| 10 | 1 | 0,10504 | 0,18371 | 0,04796 | 0,18987 |
| 11 | 1 | 0 | 0,18373 | 0,02885 | 0,18598 |
| 12 | 1 | -0,10504 | 0,18372 | 0,00974 | 0,18398 |
| 13 | 1 | -0,21009 | 0,18369 | -0,00935 | 0,18393 |
| 14 | 1 | -0,31513 | 0,18367 | -0,02842 | 0,18586 |
| 15 | 0,863 | -0,31513 | -0,00384 | -0,02842 | 0,02868 |
| 16 | 0,727 | -0,31513 | -0,00067 | -0,02845 | 0,02846 |
| 17 | 0,59 | -0,31513 | -0,08970 | -0,02842 | 0,09410 |
| 18 | 0,453 | -0,31513 | -0,01498 | -0,02789 | 0,03166 |
| 19 | 0,317 | -0,31513 | 0,01920 | -0,02535 | 0,03180 |
| 20 | 0,18 | -0,31513 | 0,03190 | -0,01223 | 0,03416 |
| 21 | 0,15 | -0,34513 | 0,02906 | -0,00257 | 0,02917 |
| 22 | 0,15 | -0,36513 | 0,02747 | -0,00411 | 0,02777 |
| 23 | 0,15 | -0,38513 | 0,02160 | -0,00836 | 0,02316 |
| 24 | 0,15 | -0,40513 | 0,00485 | -0,01512 | 0,01588 |

Tabla 45: Perfil de deformación por dilatación térmica del acumulador de energía de alta capacidad.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

| Acumulador de energía de alta capacidad | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje Z (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje Z (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | 0,15 | 0,34513 | 0,05330 | 0,05524 | 0,07676 |
| 2 | 0,18 | 0,31513 | 0,12259 | 0,06920 | 0,14077 |
| 3 | 0,317 | 0,31513 | 0,04374 | 0,08295 | 0,09378 |
| 4 | 0,453 | 0,31513 | 0,21489 | 0,08554 | 0,23129 |
| 5 | 0,59 | 0,31513 | 0,19366 | 0,08608 | 0,21193 |
| 6 | 0,727 | 0,31513 | 0,29491 | 0,08613 | 0,30723 |
| 7 | 0,863 | 0,31513 | 0,35339 | 0,08611 | 0,36373 |
| 8 | 1 | 0,31513 | 0,55206 | 0,08612 | 0,55874 |
| 9 | 1 | 0,21009 | 0,56787 | 0,06705 | 0,57182 |
| 10 | 1 | 0,10504 | 0,57627 | 0,04796 | 0,57826 |
| 11 | 1 | 0 | 0,57881 | 0,02885 | 0,57953 |
| 12 | 1 | -0,10504 | 0,57609 | -0,10641 | 0,58584 |
| 13 | 1 | -0,21009 | 0,56752 | -0,10286 | 0,57677 |
| 14 | 1 | -0,31513 | 0,55151 | -0,11056 | 0,56248 |
| 15 | 0,863 | -0,31513 | 0,35283 | -0,08346 | 0,36257 |
| 16 | 0,727 | -0,31513 | 0,29438 | -0,05771 | 0,29998 |
| 17 | 0,59 | -0,31513 | 0,19325 | -0,03547 | 0,19648 |
| 18 | 0,453 | -0,31513 | 0,21432 | -0,02789 | 0,21613 |
| 19 | 0,317 | -0,31513 | 0,04367 | -0,02535 | 0,05050 |
| 20 | 0,18 | -0,31513 | 0,12213 | -0,01223 | 0,12274 |
| 21 | 0,15 | -0,34513 | 0,05107 | -0,00257 | 0,05113 |
| 22 | 0,15 | -0,36513 | 0,03633 | -0,00411 | 0,03656 |
| 23 | 0,15 | -0,38513 | 0,02378 | -0,00836 | 0,02520 |
| 24 | 0,15 | -0,40513 | 0,00485 | -0,01512 | 0,01588 |

Tabla 46: Perfil de deformación total del acumulador de energía de alta capacidad.

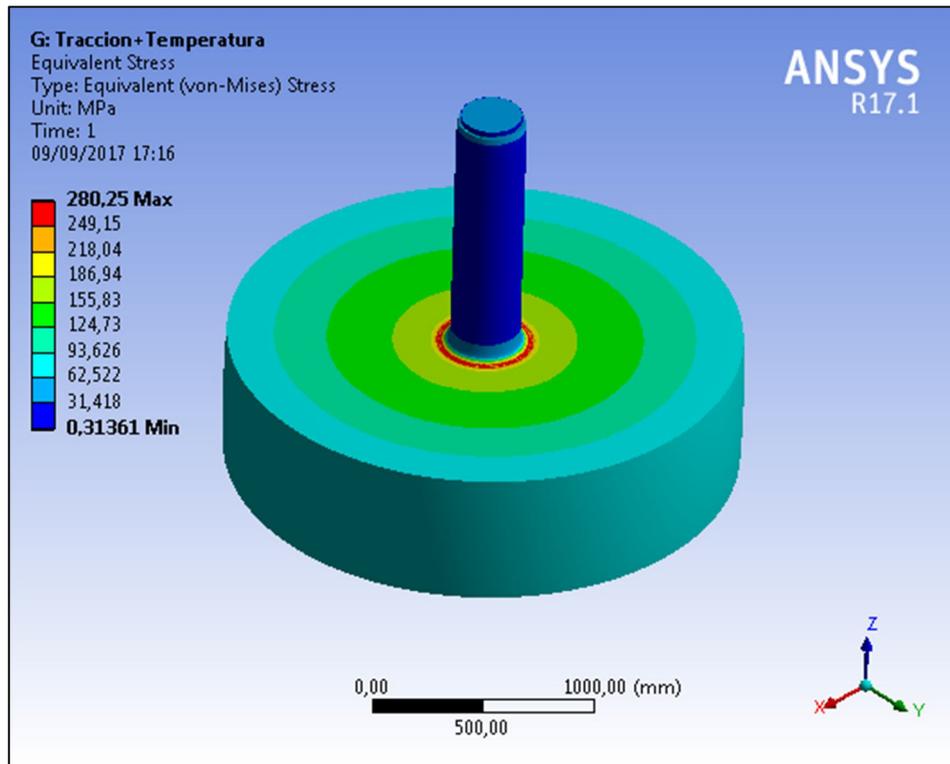


Figura 52: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad rotando a temperatura de 35°C.

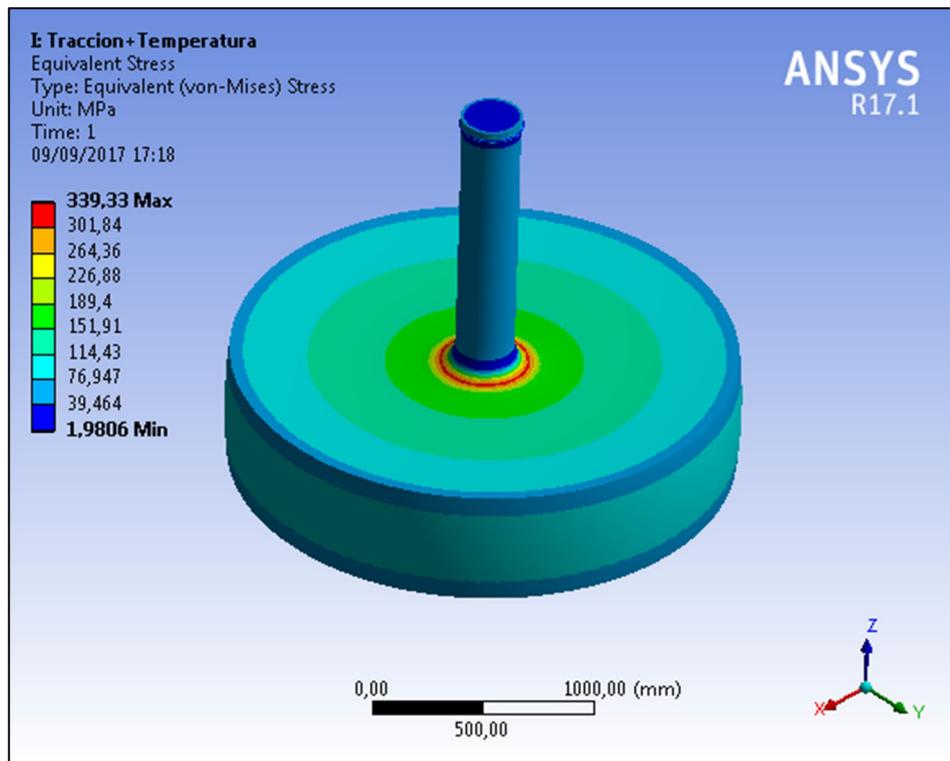


Figura 53: Distribución de tensiones del acumulador de energía de alta capacidad rotando a temperatura de 15°C.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

1.2. Estudio de vibraciones.

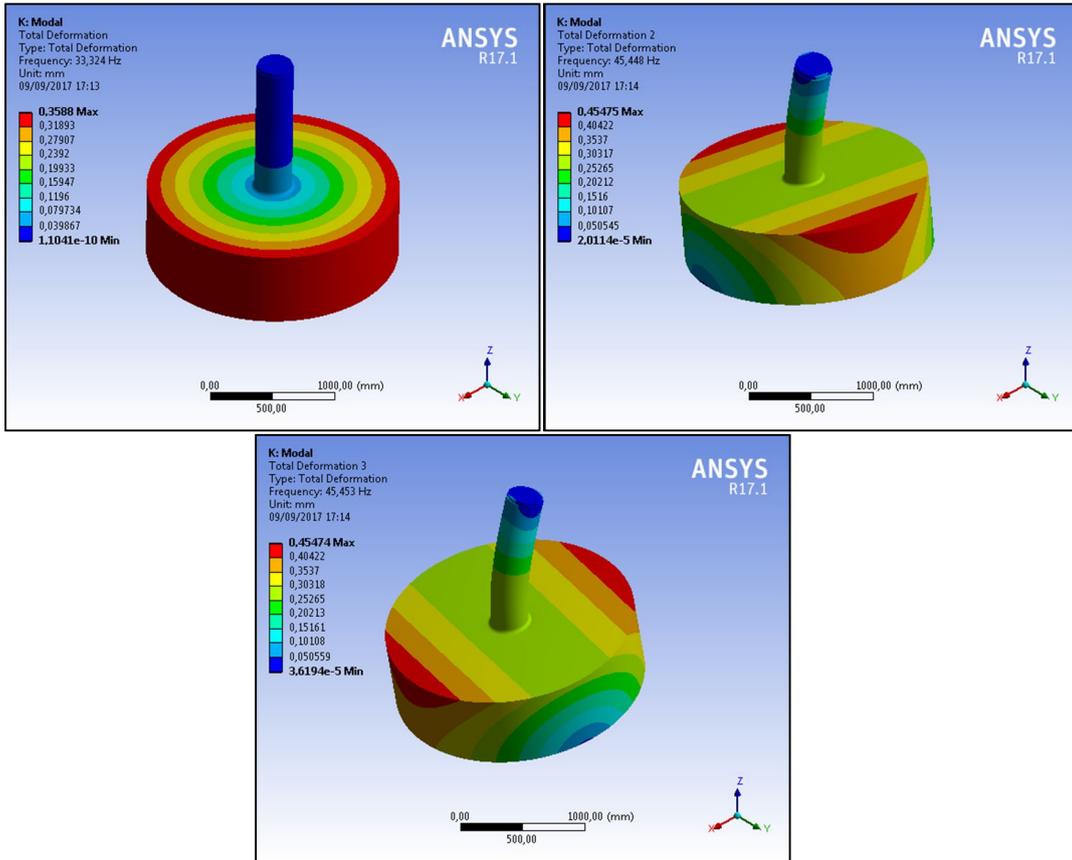


Figura 54: Tres primeros modos de vibración del acumulador de energía de alta capacidad.

| Acumulador de energía de alta capacidad | |
|---|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 33,324 |
| 2 | 45,448 |
| 3 | 45,453 |

Tabla 1.1: Modos de vibración del acumulador de energía de alta capacidad según ANSYS.

| Acumulador de energía de alta capacidad | |
|---|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 33,324 |
| 2 | 45,450 |

Tabla 1.2: Modos de vibración del acumulador de energía de alta capacidad corregidos.

| Acumulador de energía de alta capacidad | | |
|---|---------------------------|-------------------------|
| Velocidad crítica | Velocidad de giro (rad/s) | Velocidad de giro (rpm) |
| 1 | 209,38 | 1999,44 |
| 2 | 285,57 | 2727,03 |

Tabla 47: Velocidades críticas del acumulador de energía de alta capacidad.

Dado que la velocidad de funcionamiento del acumulador de energía es de 2244 rpm, no coincide con ninguna velocidad crítica. Sin embargo, pasará por una al acelerarse. La siguiente velocidad crítica está lejos de la velocidad de funcionamiento.

2. Resultados de las simulaciones del recuperador de frenada en vehículos híbridos:

2.1. Estudio de movimientos del volante.

En el caso del recuperador de frenada, el propio peso produce una deformación asimétrica en su longitud. Dado que la masa del volante de inercia es tan solo de 8,53 Kg se puede calcular únicamente la deformación en el caso más desfavorable y aplicarlo a todo el radio. Calculando la deformación en varios puntos se ha demostrado que la variación es muy inferior al orden de magnitud que se maneja.

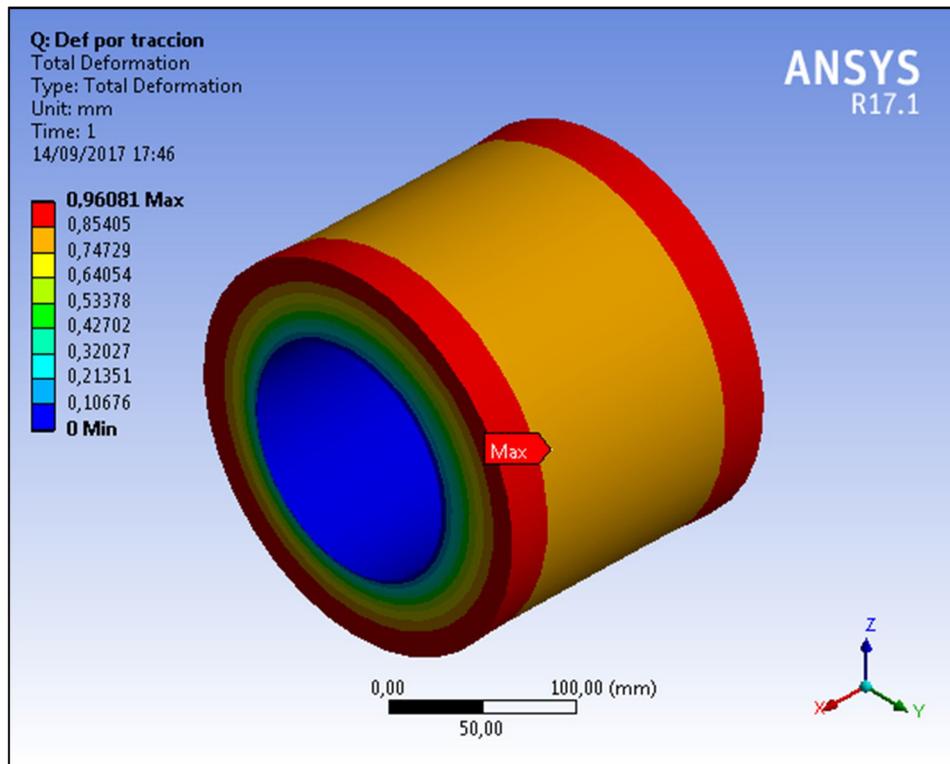


Figura 55: Deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la tracción.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

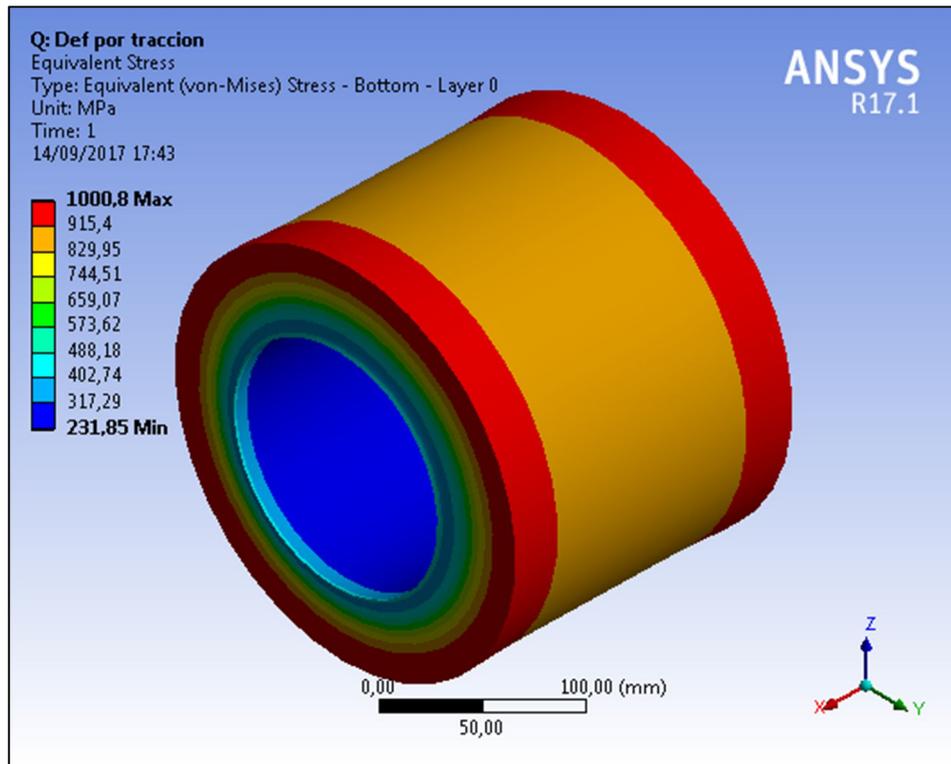


Figura 56: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la tracción.

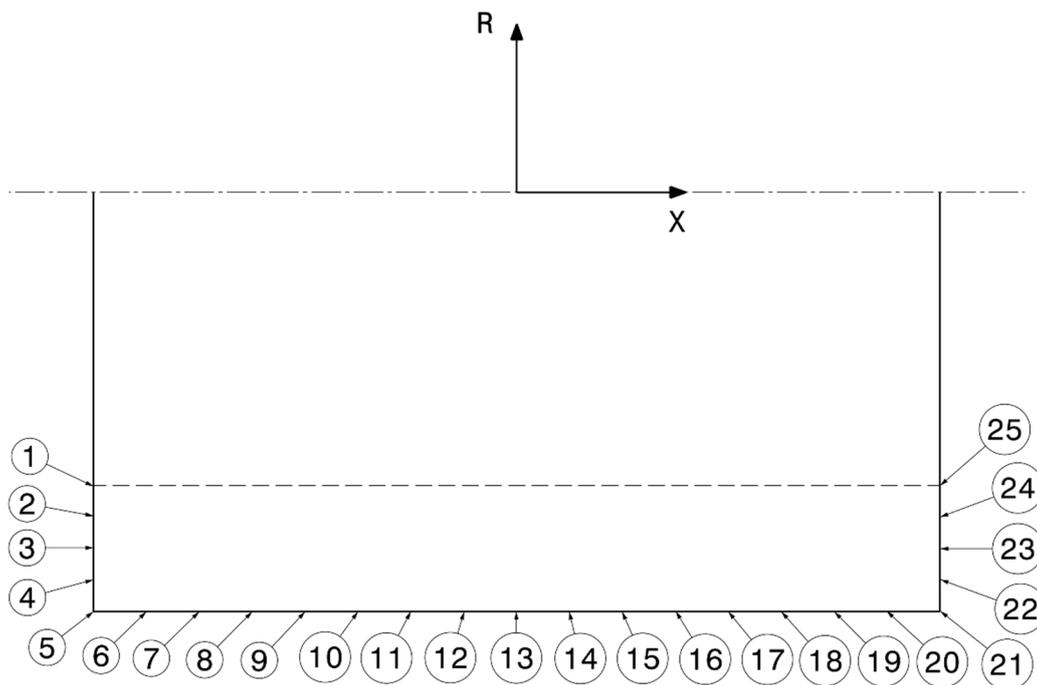


Figura 57: Perfil de puntos del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje X (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje X (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | -0,07 | -0,1 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | -0,0775 | -0,1 | -0,45787 | 0,28206 | 0,53778 |
| 3 | -0,085 | -0,1 | -0,71460 | 0,35289 | 0,79698 |
| 4 | -0,0925 | -0,1 | -0,85557 | 0,35265 | 0,92540 |
| 5 | -0,1 | -0,1 | -0,89645 | 0,33363 | 0,95652 |
| 6 | -0,1 | -0,0875 | -0,88235 | 0,27557 | 0,92438 |
| 7 | -0,1 | -0,075 | -0,84767 | 0,19729 | 0,87033 |
| 8 | -0,1 | -0,0625 | -0,82785 | 0,12816 | 0,83771 |
| 9 | -0,1 | -0,05 | -0,82055 | 0,08043 | 0,82448 |
| 10 | -0,1 | -0,0375 | -0,81807 | 0,04952 | 0,81957 |
| 11 | -0,1 | -0,025 | -0,81685 | 0,02871 | 0,81735 |
| 12 | -0,1 | -0,0125 | -0,81611 | 0,01318 | 0,81622 |
| 13 | -0,1 | 0 | -0,81586 | 0,00000 | 0,81586 |
| 14 | -0,1 | 0,0125 | -0,81611 | -0,01318 | 0,81622 |
| 15 | -0,1 | 0,025 | -0,81685 | -0,02871 | 0,81735 |
| 16 | -0,1 | 0,0375 | -0,81807 | -0,04952 | 0,81957 |
| 17 | -0,1 | 0,05 | -0,82055 | -0,08043 | 0,82448 |
| 18 | -0,1 | 0,0625 | -0,82785 | -0,12816 | 0,83771 |
| 19 | -0,1 | 0,075 | -0,84767 | -0,19740 | 0,87035 |
| 20 | -0,1 | 0,0875 | -0,88235 | -0,27557 | 0,92438 |
| 21 | -0,1 | 0,1 | -0,89645 | -0,33363 | 0,95652 |
| 22 | -0,0925 | 0,1 | -0,85557 | -0,35265 | 0,92540 |
| 23 | -0,085 | 0,1 | -0,71460 | -0,35289 | 0,79698 |
| 24 | -0,0775 | 0,1 | -0,45787 | -0,28206 | 0,53778 |
| 25 | -0,07 | 0,1 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Tabla 48: Perfil de deformación por tracción del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

En la deformación por temperatura existen dos efectos. Dado que en la dirección de las fibras el coeficiente de dilatación es negativo, a mayor temperatura el volante se contrae en esa dirección. Como las fibras están orientadas circularmente, la deformación transversal viene dada por la dirección a 90° de las fibras, cuyo coeficiente de dilatación es positivo. Es por eso que se deforma más a temperatura máxima que a mínima.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

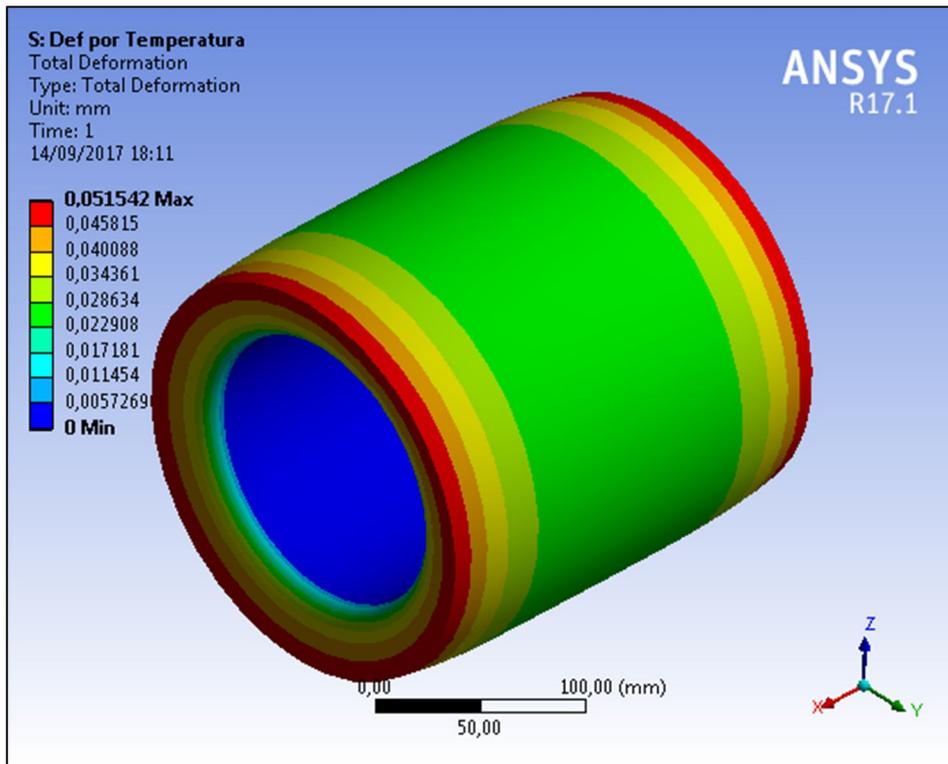


Figura 58: Deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la temperatura a 135°C.

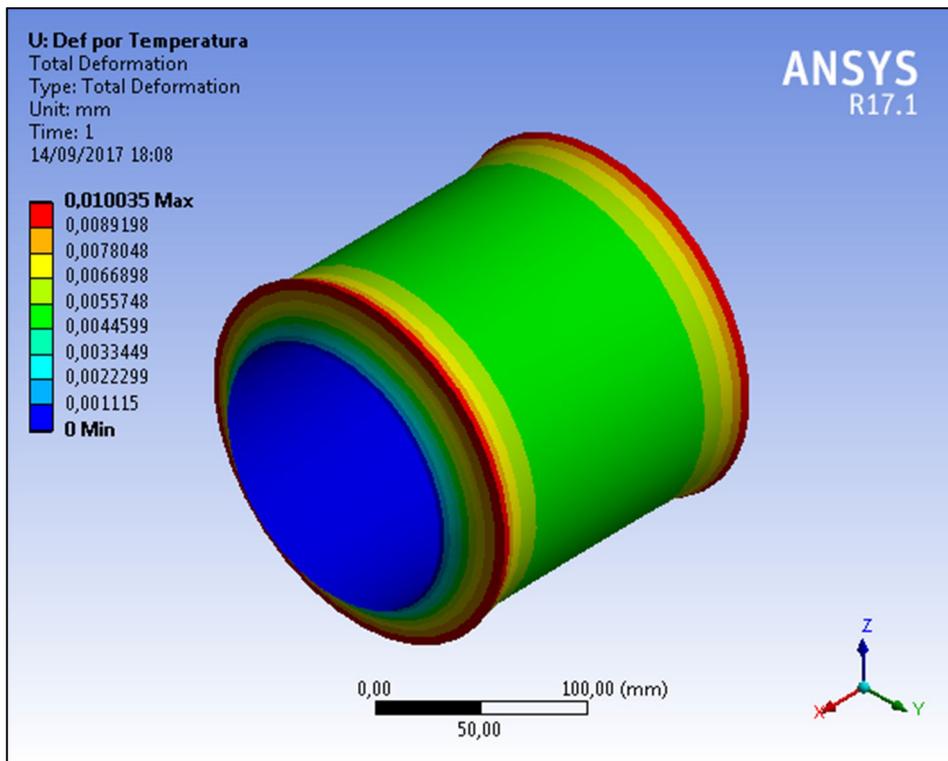


Figura 59: Deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la temperatura a 0°C.

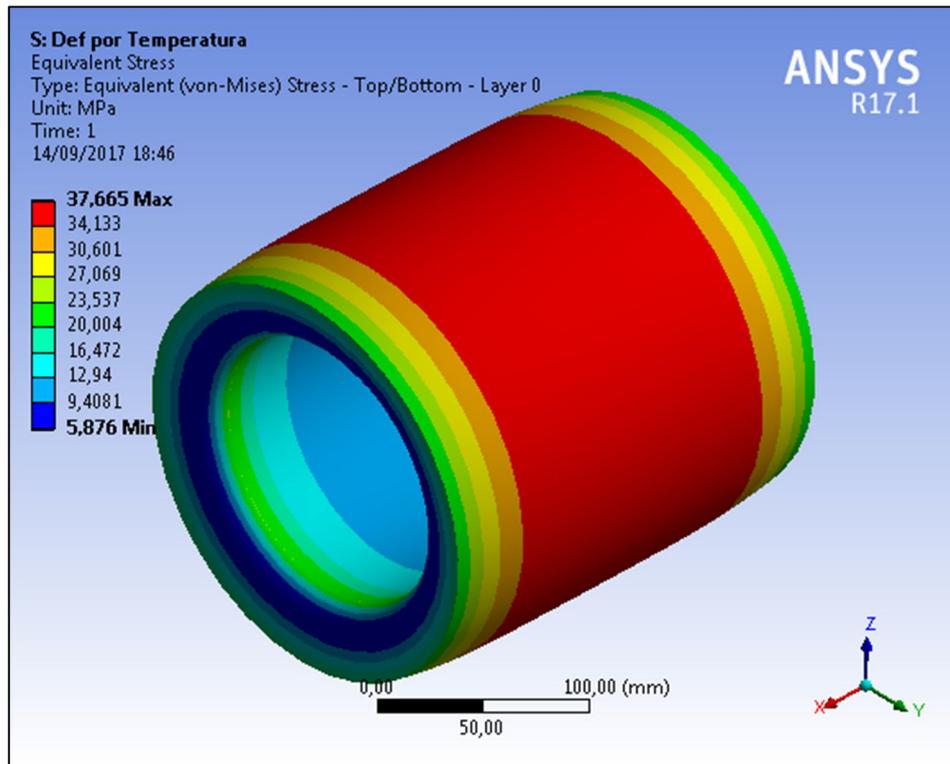


Figura 60: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos por efecto de la temperatura.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje X (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje X (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | -0,07 | -0,1 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | -0,0775 | -0,1 | 0,00572 | -0,02646 | 0,02707 |
| 3 | -0,085 | -0,1 | 0,00271 | -0,03878 | 0,03888 |
| 4 | -0,0925 | -0,1 | -0,00338 | -0,04561 | 0,04574 |
| 5 | -0,1 | -0,1 | -0,01077 | -0,05026 | 0,05140 |
| 6 | -0,1 | -0,0875 | -0,01793 | -0,03653 | 0,04069 |
| 7 | -0,1 | -0,075 | -0,02226 | -0,02431 | 0,03295 |
| 8 | -0,1 | -0,0625 | -0,02403 | -0,01547 | 0,02857 |
| 9 | -0,1 | -0,05 | -0,02462 | -0,00973 | 0,02648 |
| 10 | -0,1 | -0,0375 | -0,02487 | -0,00604 | 0,02559 |
| 11 | -0,1 | -0,025 | -0,02502 | -0,00352 | 0,02527 |
| 12 | -0,1 | -0,0125 | -0,02512 | -0,00162 | 0,02517 |
| 13 | -0,1 | 0 | -0,02515 | 0,00000 | 0,02515 |
| 14 | -0,1 | 0,0125 | -0,02512 | 0,00162 | 0,02517 |
| 15 | -0,1 | 0,025 | -0,02502 | 0,00352 | 0,02527 |
| 16 | -0,1 | 0,0375 | -0,02487 | 0,00604 | 0,02559 |
| 17 | -0,1 | 0,05 | -0,02462 | 0,00973 | 0,02648 |
| 18 | -0,1 | 0,0625 | -0,02403 | 0,01547 | 0,02858 |
| 19 | -0,1 | 0,075 | -0,02226 | 0,02431 | 0,03296 |
| 20 | -0,1 | 0,0875 | -0,01792 | 0,03655 | 0,04070 |
| 21 | -0,1 | 0,1 | -0,01077 | 0,05026 | 0,05140 |
| 22 | -0,0925 | 0,1 | -0,00338 | 0,04561 | 0,04573 |
| 23 | -0,085 | 0,1 | 0,00274 | 0,03878 | 0,03888 |
| 24 | -0,0775 | 0,1 | 0,00572 | 0,02646 | 0,02707 |
| 25 | -0,07 | 0,1 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Tabla 49: Perfil de deformación por dilatación térmica del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Punto | Coordenada Eje R (m) | Coordenada Eje X (m) | Deformación Eje R (mm) | Deformación Eje X (mm) | Deformación Total (mm) |
| 1 | -0,07 | -0,1 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | -0,0775 | -0,1 | -0,45787 | -0,02646 | 0,45863 |
| 3 | -0,085 | -0,1 | -0,71460 | -0,03878 | 0,71565 |
| 4 | -0,0925 | -0,1 | -0,85895 | -0,04561 | 0,86016 |
| 5 | -0,1 | -0,1 | -0,90722 | -0,05026 | 0,90861 |
| 6 | -0,1 | -0,0875 | -0,90028 | -0,03653 | 0,90102 |
| 7 | -0,1 | -0,075 | -0,86993 | -0,02431 | 0,87026 |
| 8 | -0,1 | -0,0625 | -0,85188 | -0,01547 | 0,85202 |
| 9 | -0,1 | -0,05 | -0,84517 | -0,00973 | 0,84523 |
| 10 | -0,1 | -0,0375 | -0,84294 | -0,00604 | 0,84296 |
| 11 | -0,1 | -0,025 | -0,84187 | -0,00352 | 0,84188 |
| 12 | -0,1 | -0,0125 | -0,84123 | -0,00162 | 0,84123 |
| 13 | -0,1 | 0 | -0,84101 | 0,00000 | 0,84101 |
| 14 | -0,1 | 0,0125 | -0,84123 | 0,00162 | 0,84123 |
| 15 | -0,1 | 0,025 | -0,84187 | 0,00352 | 0,84188 |
| 16 | -0,1 | 0,0375 | -0,84294 | 0,00604 | 0,84296 |
| 17 | -0,1 | 0,05 | -0,84517 | 0,00973 | 0,84523 |
| 18 | -0,1 | 0,0625 | -0,85188 | 0,01547 | 0,85202 |
| 19 | -0,1 | 0,075 | -0,86993 | 0,02431 | 0,87027 |
| 20 | -0,1 | 0,0875 | -0,90027 | 0,03655 | 0,90102 |
| 21 | -0,1 | 0,1 | -0,90722 | 0,05026 | 0,90861 |
| 22 | -0,0925 | 0,1 | -0,85895 | 0,04561 | 0,86016 |
| 23 | -0,085 | 0,1 | -0,71460 | 0,03878 | 0,71565 |
| 24 | -0,0775 | 0,1 | -0,45787 | 0,02646 | 0,45863 |
| 25 | -0,07 | 0,1 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Tabla 50: Perfil de deformación total del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

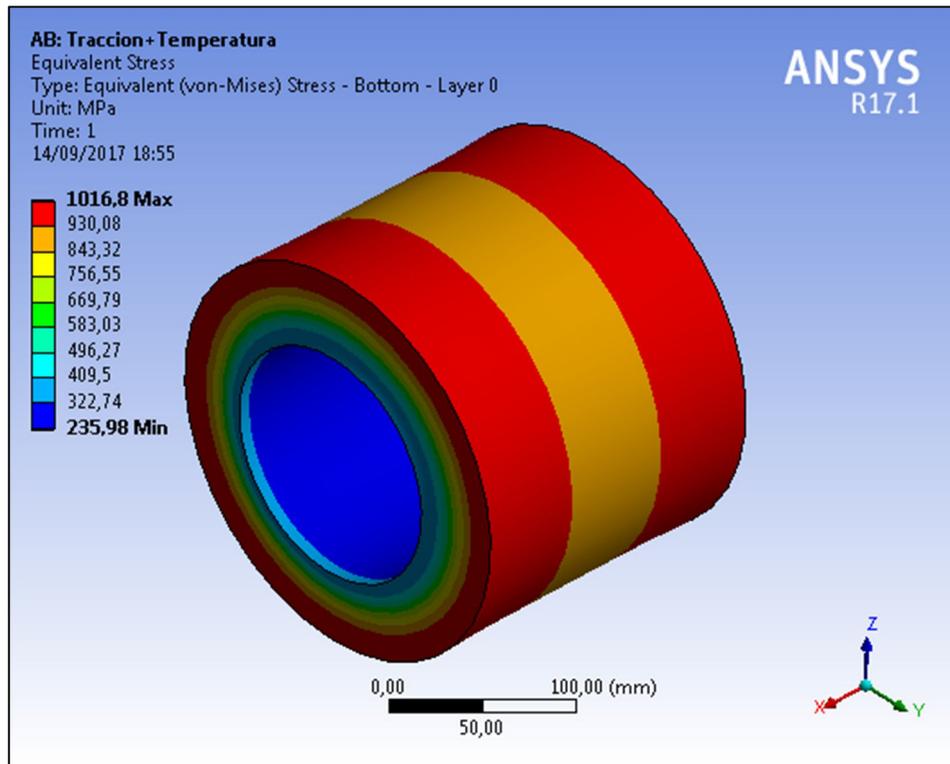


Figura 61: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos rotando a temperatura de 135°C.

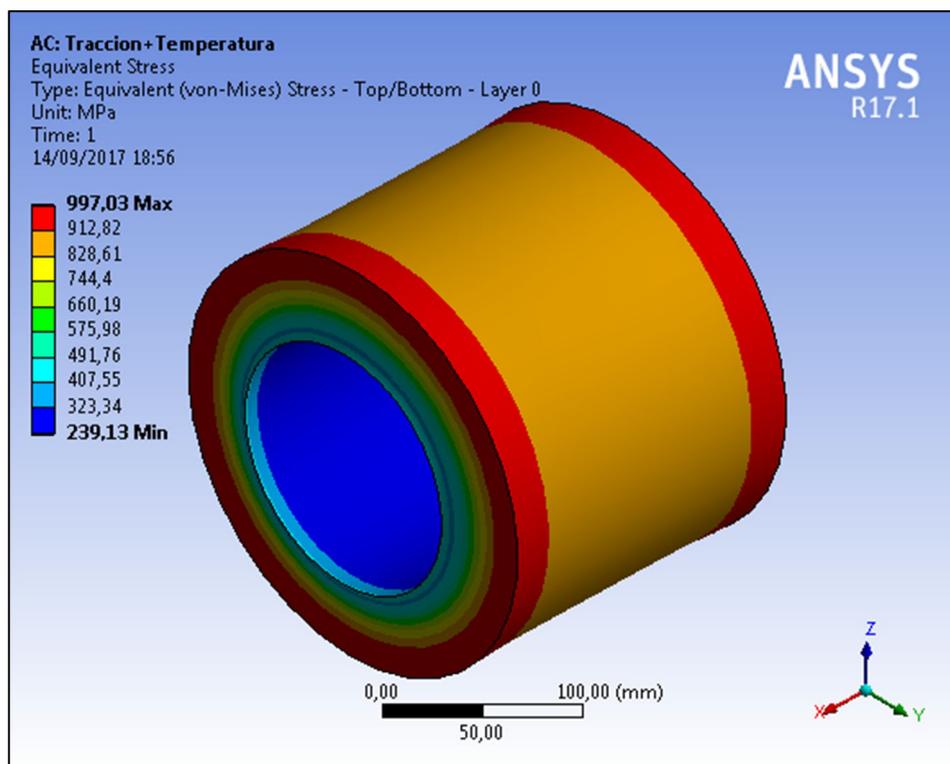


Figura 62: Distribución de tensiones del recuperador de frenada en vehículos híbridos rotando a temperatura de 135°C.

2.2. Estudio de vibraciones.

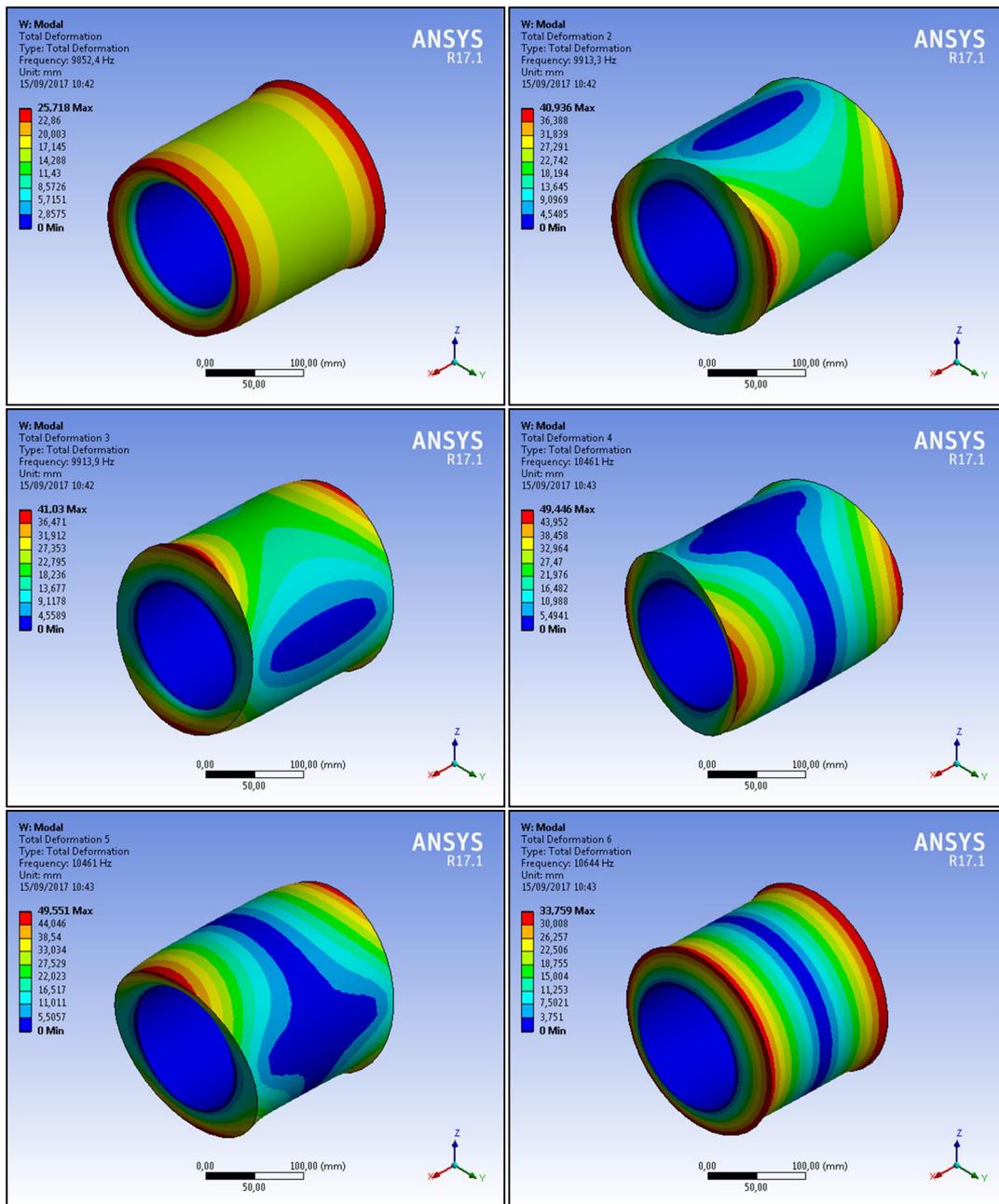


Figura 63: Seis primeros modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | |
|--|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 9852,4 |
| 2 | 9913,3 |
| 3 | 9913,9 |
| 4 | 10461 |
| 5 | 10461 |
| 6 | 10644 |

Anexo C. Resultados de las simulaciones de los volantes de inercia

Tabla 51: Modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos según ANSYS.

| Recuperador de frenada en vehículos híbridos | |
|---|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 9852,4 |
| 2 | 9913,6 |
| 3 | 10461 |
| 4 | 10644 |

Tabla 52: Modos de vibración del recuperador de frenada en vehículos híbridos corregidos.

Anexo D

Resultados de las simulaciones de las carcasas protectoras

A continuación, se muestran los resultados de las iteraciones para el cálculo del perfil de la superficie interior corregida de las carcasas protectoras y los análisis modales.

1. Cálculo de la superficie interior corregida de la carcasa protectora del volante de inercia teórico.

| Zona | d (mm) |
|----------------|---------------|
| Eje superior | 100 |
| Disco superior | 840 |
| Radio exterior | 500 |
| Disco inferior | 840 |
| Eje inferior | 100 |

Tabla 53: Valores de d según la zona de la carcasa protectora.

Anexo D. Resultados de las simulaciones de las carcasas protectoras

1.1. Iteración 0.

| Carcasa protectora del volante de inercia teórico | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Punto | Coordenada R a Temperatura máxima (mm) | Coordenada Z a Temperatura máxima (mm) | Coordenada R a Temperatura ambiente (mm) | Coordenada Z a Temperatura ambiente (mm) |
| 1 | 100,0097 | 1300,3369 | 100,0388 | 1300,3369 |
| 2 | 100,0453 | 1190,3394 | 100,0745 | 1190,3394 |
| 3 | 100,0444 | 1080,3732 | 100,0735 | 1080,3732 |
| 4 | 100,0442 | 970,4274 | 100,0734 | 970,4274 |
| 5 | 100,0400 | 860,4832 | 100,0692 | 860,4832 |
| 6 | 120,0736 | 840,5091 | 120,0736 | 840,6981 |
| 7 | 215,0521 | 840,5354 | 215,0521 | 840,7244 |
| 8 | 310,1256 | 840,5430 | 310,1256 | 840,7320 |
| 9 | 405,0169 | 840,5468 | 405,0169 | 840,7358 |
| 10 | 500,2674 | 840,5494 | 500,3830 | 840,7384 |
| 11 | 500,2979 | 630,4147 | 500,4135 | 630,4147 |
| 12 | 500,3001 | 420,2716 | 500,4157 | 420,2716 |
| 13 | 500,2982 | 210,1410 | 500,4137 | 210,1410 |
| 14 | 500,2974 | 0,0000 | 500,4129 | 0,0000 |
| 15 | 500,2982 | -210,1410 | 500,4138 | -210,1410 |
| 16 | 500,3002 | -420,2716 | 500,4158 | -420,2716 |
| 17 | 500,2980 | -630,4147 | 500,4136 | -630,4147 |
| 18 | 500,2674 | -840,5494 | 500,3830 | -840,5725 |
| 19 | 405,0169 | -840,5468 | 405,0169 | -840,5698 |
| 20 | 310,1256 | -840,5430 | 310,1256 | -840,5661 |
| 21 | 215,0521 | -840,5354 | 215,0521 | -840,5584 |
| 22 | 120,0734 | -840,5091 | 120,0734 | -840,5322 |
| 23 | 100,0403 | -860,4832 | 100,2152 | -860,4832 |
| 24 | 100,0442 | -970,4274 | 100,2192 | -970,4274 |
| 25 | 100,0444 | -1080,3732 | 100,2193 | -1080,3732 |
| 26 | 100,0453 | -1190,3394 | 100,2203 | -1190,3394 |
| 27 | 100,0097 | -1300,3369 | 100,1846 | -1300,3369 |

Tabla 54: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del volante de inercia teórico.

Iteración 0. En gris aparecen los valores modificados.

Anexo D. Resultados de las simulaciones de las carcasas protectoras

1.2. Iteración 1.

| Carcasa protectora del volante de inercia teórico | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Punto | Coordenada R a Temperatura máxima (mm) | Coordenada Z a Temperatura máxima (mm) | Coordenada R a Temperatura ambiente (mm) | Coordenada Z a Temperatura ambiente (mm) |
| 1 | 100,0097 | 1300,3369 | 100,0328 | 1300,3369 |
| 2 | 100,0453 | 1190,3394 | 100,0684 | 1190,3394 |
| 3 | 100,0444 | 1080,3732 | 100,0674 | 1080,3732 |
| 4 | 100,0442 | 970,4274 | 100,0673 | 970,4274 |
| 5 | 100,0400 | 860,4832 | 100,0631 | 860,4832 |
| 6 | 120,0736 | 840,5091 | 120,0736 | 840,6841 |
| 7 | 215,0521 | 840,5354 | 215,0521 | 840,7103 |
| 8 | 310,1256 | 840,5430 | 310,1256 | 840,7180 |
| 9 | 405,0169 | 840,5468 | 405,0169 | 840,7217 |
| 10 | 500,2674 | 840,5494 | 500,3845 | 840,7244 |
| 11 | 500,2979 | 630,4147 | 500,4150 | 630,4147 |
| 12 | 500,3001 | 420,2716 | 500,4172 | 420,2716 |
| 13 | 500,2982 | 210,1410 | 500,4152 | 210,1410 |
| 14 | 500,2974 | 0,0000 | 500,4144 | 0,0000 |
| 15 | 500,2982 | -210,1410 | 500,4153 | -210,1410 |
| 16 | 500,3002 | -420,2716 | 500,4173 | -420,2716 |
| 17 | 500,2980 | -630,4147 | 500,4151 | -630,4147 |
| 18 | 500,2674 | -840,5494 | 500,3845 | -840,6477 |
| 19 | 405,0169 | -840,5468 | 405,0169 | -840,6450 |
| 20 | 310,1256 | -840,5430 | 310,1256 | -840,6413 |
| 21 | 215,0521 | -840,5354 | 215,0521 | -840,6336 |
| 22 | 120,0734 | -840,5091 | 120,0734 | -840,6074 |
| 23 | 100,0403 | -860,4832 | 100,0633 | -860,4832 |
| 24 | 100,0442 | -970,4274 | 100,0672 | -970,4274 |
| 25 | 100,0444 | -1080,3732 | 100,0674 | -1080,3732 |
| 26 | 100,0453 | -1190,3394 | 100,0684 | -1190,3394 |
| 27 | 100,0097 | -1300,3369 | 100,0327 | -1300,3369 |

Tabla 55: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del volante de inercia teórico.

Iteración 1. En gris aparecen los valores modificados.

2. Cálculo de la superficie interior corregida de la carcasa protectora del almacenador de energía de alta capacidad.

| Zona | d (mm) |
|----------------|--------|
| Disco superior | 315 |
| Radio exterior | 1000 |
| Disco inferior | 315 |
| Eje inferior | 150 |

Tabla 56: Valores de d según la zona de la carcasa protectora.

2.1. Iteración 0.

| Carcasa protectora del almacenador de energía de alta capacidad | | | | |
|---|--|--|--|--|
| Punto | Coordenada R a Temperatura máxima (mm) | Coordenada Z a Temperatura máxima (mm) | Coordenada R a Temperatura ambiente (mm) | Coordenada Z a Temperatura ambiente (mm) |
| 1 | 150,0652 | 345,1975 | 150,0652 | 345,1975 |
| 2 | 180,1483 | 315,2142 | 180,1483 | 315,2884 |
| 3 | 317,0537 | 315,2307 | 317,0537 | 315,3049 |
| 4 | 453,2591 | 315,2338 | 453,2591 | 315,3080 |
| 5 | 590,2336 | 315,2345 | 590,2336 | 315,3086 |
| 6 | 727,3551 | 315,2346 | 727,3551 | 315,3087 |
| 7 | 863,4253 | 315,2345 | 863,4253 | 315,3086 |
| 8 | 1000,6637 | 315,2345 | 1000,8857 | 315,3087 |
| 9 | 1000,6826 | 210,1717 | 1000,9047 | 210,1717 |
| 10 | 1000,6927 | 105,0988 | 1000,9148 | 105,0988 |
| 11 | 1000,6958 | 0,0000 | 1000,9178 | 0,0000 |
| 12 | 1000,6925 | -105,1665 | 1000,9146 | -105,1665 |
| 13 | 1000,6822 | -210,2122 | 1000,9043 | -210,2122 |
| 14 | 1000,6630 | -315,2615 | 1000,8851 | -315,3356 |
| 15 | 863,4246 | -315,2290 | 863,4246 | -315,3031 |
| 16 | 727,3545 | -315,1981 | 727,3545 | -315,2722 |
| 17 | 590,2331 | -315,1714 | 590,2331 | -315,2455 |
| 18 | 453,2584 | -315,1623 | 453,2584 | -315,2364 |
| 19 | 317,0536 | -315,1592 | 317,0536 | -315,2333 |
| 20 | 180,1478 | -315,1435 | 180,1478 | -315,2176 |
| 21 | 150,0625 | -345,1319 | 150,1009 | -345,1319 |
| 22 | 150,0448 | -365,1337 | 150,0832 | -365,1337 |
| 23 | 150,0297 | -385,1388 | 150,0682 | -385,1388 |
| 24 | 150,0070 | -405,1469 | 150,0455 | -405,1469 |

Tabla 57: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad. Iteración 0. En gris aparecen los valores modificados.

2.2. Iteración 1.

| Carcasa protectora del almacenador de energía de alta capacidad | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Punto | Coordenada R a Temperatura máxima (mm) | Coordenada Z a Temperatura máxima (mm) | Coordenada R a Temperatura ambiente (mm) | Coordenada Z a Temperatura ambiente (mm) |
| 1 | 150,0652 | 345,1975 | 150,0652 | 345,1975 |
| 2 | 180,1483 | 315,2142 | 180,1483 | 315,3362 |
| 3 | 317,0537 | 315,2307 | 317,0537 | 315,3527 |
| 4 | 453,2591 | 315,2338 | 453,2591 | 315,3558 |
| 5 | 590,2336 | 315,2345 | 590,2336 | 315,3565 |
| 6 | 727,3551 | 315,2346 | 727,3551 | 315,3565 |
| 7 | 863,4253 | 315,2345 | 863,4253 | 315,3565 |
| 8 | 1000,6637 | 315,2345 | 1000,8793 | 315,3565 |
| 9 | 1000,6826 | 210,1717 | 1000,8983 | 210,1717 |
| 10 | 1000,6927 | 105,0988 | 1000,9083 | 105,0988 |
| 11 | 1000,6958 | 0,0000 | 1000,9114 | 0,0000 |
| 12 | 1000,6925 | -105,1665 | 1000,9081 | -105,1665 |
| 13 | 1000,6822 | -210,2122 | 1000,8978 | -210,2122 |
| 14 | 1000,6630 | -315,2615 | 1000,8786 | -315,2827 |
| 15 | 863,4246 | -315,2290 | 863,4246 | -315,2502 |
| 16 | 727,3545 | -315,1981 | 727,3545 | -315,2193 |
| 17 | 590,2331 | -315,1714 | 590,2331 | -315,1926 |
| 18 | 453,2584 | -315,1623 | 453,2584 | -315,1835 |
| 19 | 317,0536 | -315,1592 | 317,0536 | -315,1805 |
| 20 | 180,1478 | -315,1435 | 180,1478 | -315,1647 |
| 21 | 150,0625 | -345,1319 | 150,0802 | -345,1319 |
| 22 | 150,0448 | -365,1337 | 150,0626 | -365,1337 |
| 23 | 150,0297 | -385,1388 | 150,0475 | -385,1388 |
| 24 | 150,0070 | -405,1469 | 150,0248 | -405,1469 |

Tabla 58: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad. Iteración 1. En gris aparecen los valores modificados.

2.3. Resultados de las iteraciones.

| Carcasa protectora del almacenador de energía de alta capacidad | | | | |
|--|---------------------------------|--------------------------|------------|--------------------------|
| Iteración 0 | | | | |
| Zona | Deformación supuesta (mm) | Deformación real (mm) | Error (mm) | Validez (Error<0,001) |
| Disco superior | 0,07412 | 0,12196 | -0,04785 | No válido |
| Radio exterior | 0,22205 | 0,21562 | 0,00643 | No válido |
| Disco inferior | 0,07412 | 0,02125 | 0,05286 | No válido |
| Eje inferior | 0,03845 | 0,01776 | 0,02069 | No válido |
| Iteración 1 | | | | |
| Zona | Deformación supuesta (mm) | Deformación real (mm) | Error (mm) | Validez (Error<0,001) |
| Disco superior | 0,12196 | 0,12203 | -0,00007 | Válido |
| Radio exterior | 0,21562 | 0,21562 | 0,00000 | Válido |
| Disco inferior | 0,02125 | 0,02127 | -0,00002 | Válido |
| Eje inferior | 0,01776 | 0,01774 | 0,00001 | Válido |

Tabla 59: Resultados de las iteraciones del cálculo de la superficie interior corregida. Resultados de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad.

3. Cálculo de la superficie interior corregida de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

| Zona | d (mm) |
|----------------|---------------|
| Disco superior | 100 |
| Radio exterior | 100 |
| Disco inferior | 315 |

Tabla 60: Valores de d según la zona de la carcasa protectora.

3.1. Iteración 0.

| Carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Punto | Coordenada R a Temperatura máxima (mm) | Coordenada X a Temperatura máxima (mm) | Coordenada R a Temperatura ambiente (mm) | Coordenada X a Temperatura ambiente (mm) |
| 1 | -70,0110 | -100,0110 | -70,0110 | -100,1858 |
| 2 | -78,0147 | -100,0401 | -78,0147 | -100,2149 |
| 3 | -85,7971 | -100,0537 | -85,7971 | -100,2285 |
| 4 | -93,4558 | -100,0612 | -93,4558 | -100,2360 |
| 5 | -101,0089 | -100,0663 | -101,1838 | -100,2411 |
| 6 | -101,0013 | -87,5512 | -101,1761 | -87,5512 |
| 7 | -100,9679 | -75,0377 | -101,1427 | -75,0377 |
| 8 | -100,9481 | -62,5280 | -101,1229 | -62,5280 |
| 9 | -100,9407 | -50,0217 | -101,1155 | -50,0217 |
| 10 | -100,9382 | -37,5176 | -101,1130 | -37,5176 |
| 11 | -100,9371 | -25,0149 | -101,1119 | -25,0149 |
| 12 | -100,9364 | -12,5128 | -101,1112 | -12,5128 |
| 13 | -100,9361 | 0,0000 | -101,1109 | 0,0000 |
| 14 | -100,9364 | 12,5128 | -101,1112 | 12,5128 |
| 15 | -100,9371 | 25,0149 | -101,1119 | 25,0149 |
| 16 | -100,9382 | 37,5176 | -101,1130 | 37,5176 |
| 17 | -100,9407 | 50,0217 | -101,1155 | 50,0217 |
| 18 | -100,9481 | 62,5280 | -101,1229 | 62,5280 |
| 19 | -100,9679 | 75,0377 | -101,1427 | 75,0377 |
| 20 | -101,0013 | 87,5512 | -101,1761 | 87,5512 |
| 21 | -101,0089 | 100,0663 | -101,1837 | 100,2411 |
| 22 | -93,4558 | 100,0612 | -93,4558 | 100,2360 |
| 23 | -85,7971 | 100,0537 | -85,7971 | 100,2285 |
| 24 | -78,0147 | 100,0401 | -78,0147 | 100,2149 |
| 25 | -70,0110 | 100,0110 | -70,0110 | 100,1858 |

Tabla 61: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos. Iteración 0. En gris aparecen los valores modificados.

3.2. Iteración 1.

| Carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Punto | Coordenada R a Temperatura máxima (mm) | Coordenada X a Temperatura máxima (mm) | Coordenada R a Temperatura ambiente (mm) | Coordenada X a Temperatura ambiente (mm) |
| 1 | -70,0110 | -100,0110 | -70,0110 | -100,0886 |
| 2 | -78,0147 | -100,0401 | -78,0147 | -100,1178 |
| 3 | -85,7971 | -100,0537 | -85,7971 | -100,1313 |
| 4 | -93,4558 | -100,0612 | -93,4558 | -100,1388 |
| 5 | -101,0089 | -100,0663 | -101,1654 | -100,1439 |
| 6 | -101,0013 | -87,5512 | -101,1577 | -87,5512 |
| 7 | -100,9679 | -75,0377 | -101,1243 | -75,0377 |
| 8 | -100,9481 | -62,5280 | -101,1045 | -62,5280 |
| 9 | -100,9407 | -50,0217 | -101,0971 | -50,0217 |
| 10 | -100,9382 | -37,5176 | -101,0946 | -37,5176 |
| 11 | -100,9371 | -25,0149 | -101,0935 | -25,0149 |
| 12 | -100,9364 | -12,5128 | -101,0928 | -12,5128 |
| 13 | -100,9361 | 0,0000 | -101,0925 | 0,0000 |
| 14 | -100,9364 | 12,5128 | -101,0928 | 12,5128 |
| 15 | -100,9371 | 25,0149 | -101,0935 | 25,0149 |
| 16 | -100,9382 | 37,5176 | -101,0947 | 37,5176 |
| 17 | -100,9407 | 50,0217 | -101,0971 | 50,0217 |
| 18 | -100,9481 | 62,5280 | -101,1045 | 62,5280 |
| 19 | -100,9679 | 75,0377 | -101,1243 | 75,0377 |
| 20 | -101,0013 | 87,5512 | -101,1577 | 87,5512 |
| 21 | -101,0089 | 100,0663 | -101,1654 | 100,1567 |
| 22 | -93,4558 | 100,0612 | -93,4558 | 100,1516 |
| 23 | -85,7971 | 100,0537 | -85,7971 | 100,1441 |
| 24 | -78,0147 | 100,0401 | -78,0147 | 100,1306 |
| 25 | -70,0110 | 100,0110 | -70,0110 | 100,1015 |

Tabla 62: Perfil de la superficie interior de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos. Iteración 1. En gris aparecen los valores modificados.

3.3. Resultados de las iteraciones.

| Carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos | | | | |
|--|---------------------------------|--------------------------|------------|-------------------------|
| Iteración 0 | | | | |
| Zona | Deformación supuesta (mm) | Deformación real (mm) | Error (mm) | Validez (Error<0,01) |
| Disco superior | 0,17481 | 0,07764 | 0,09717 | No válido |
| Radio exterior | 0,17481 | 0,15642 | 0,01839 | No válido |
| Disco inferior | 0,17481 | 0,09046 | 0,08435 | No válido |
| Iteración 1 | | | | |
| Zona | Deformación supuesta (mm) | Deformación real (mm) | Error (mm) | Validez (Error<0,01) |
| Disco superior | 0,07764 | 0,07744 | 0,00020 | Válido |
| Radio exterior | 0,15642 | 0,15642 | 0,00000 | Válido |
| Disco inferior | 0,09046 | 0,09046 | 0,00000 | Válido |

Tabla 63: Resultados de las iteraciones del cálculo de la superficie interior corregida. Resultados de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

6. Análisis modal de las carcasas protectoras.

6.1. Carcasa protectora del volante de inercia teórico.

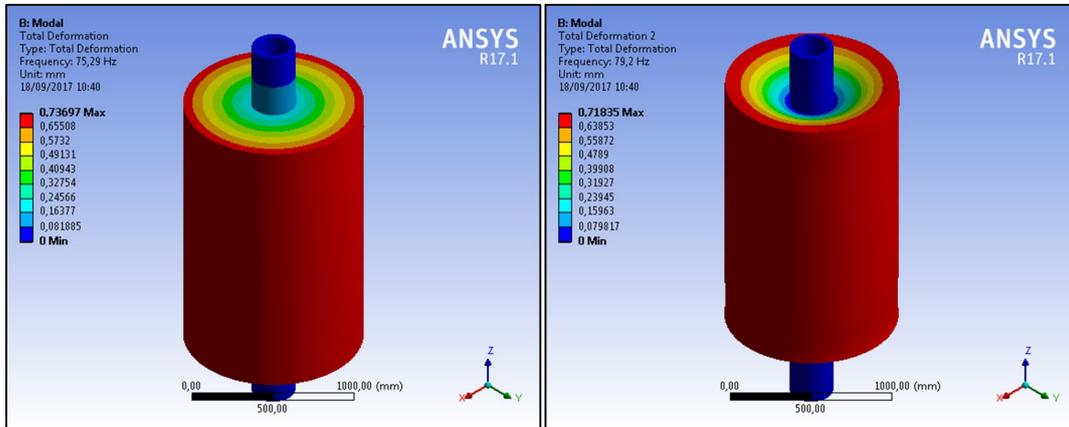


Figura 64: Primeros modos de vibración de la carcasa protectora del volante de inercia teórico.

| Carcasa protectora del volante de inercia teórico | |
|--|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 75,29 |
| 2 | 79,20 |

Tabla 64: Modos de vibración de la carcasa protectora del volante de inercia teórico según ANSYS.

Dado que ANSYS da las frecuencias sin error no hace falta corregirlas.

6.2. Carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad.

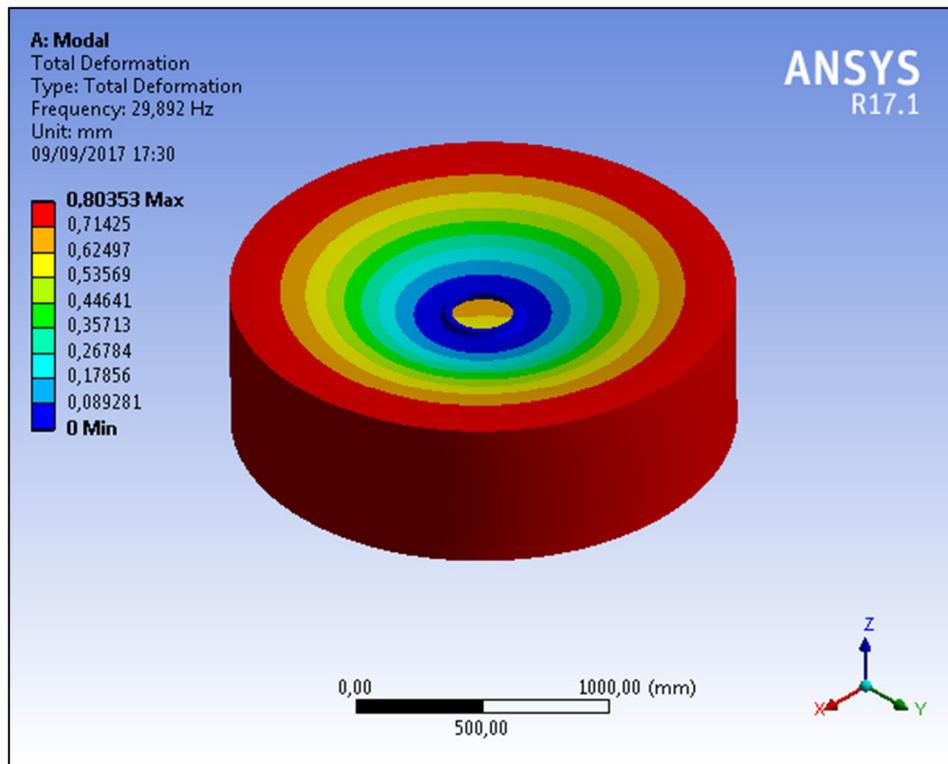


Figura 65: Primer modo de vibración de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad.

| Carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad | |
|--|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 29,892 |

Tabla 65: Modo de vibración de la carcasa protectora del acumulador de energía de alta capacidad.

Dado que ANSYS da la frecuencia sin error no hace falta corregirla.

6.3. Carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

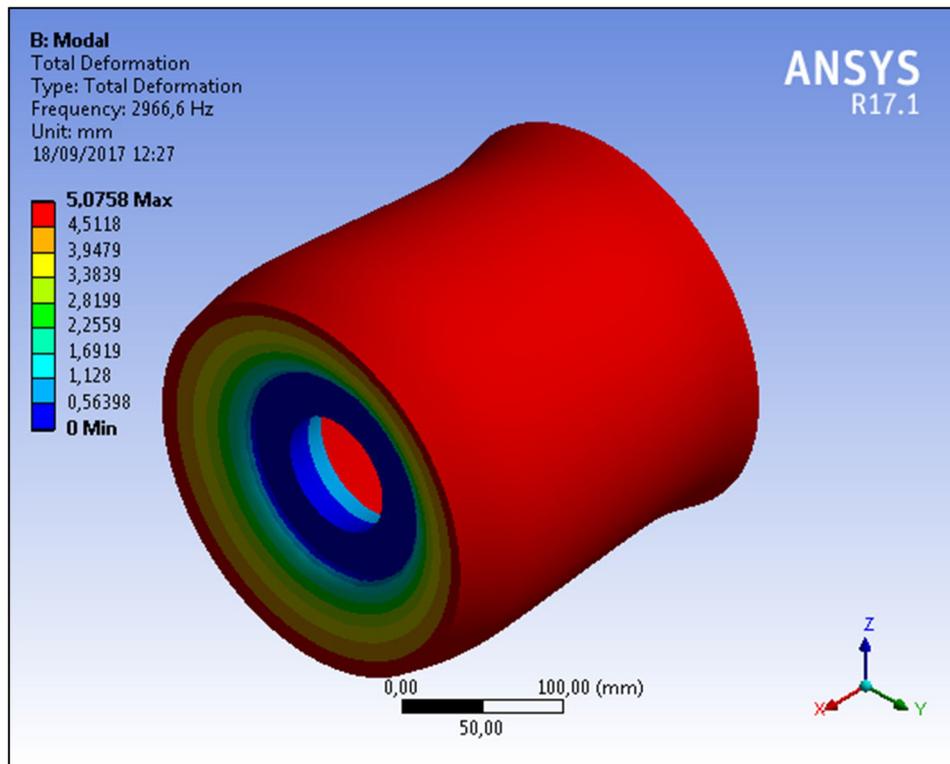


Figura 66: Primer modo de vibración de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

| Carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos | |
|---|-----------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) |
| 1 | 2966,6 |

Tabla 66: Modo de vibración de la carcasa protectora del recuperador de frenada en vehículos híbridos.

Dado que ANSYS da la frecuencia sin error no hace falta corregirla.