



Diseño de banco de ensayos de desgaste entre frotador e hilo de contacto utilizado en el sector ferroviario

Pedro Reyes¹, Rafael J. Luque¹, Vid Bačić¹, Montserrat Simarro¹, Sergio Postigo¹, Juan J. Castillo¹

¹Dpto. de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos, Universidad de Málaga, pedrozuniga1798@uma.es, rafaeljesuslqa@uma.es, vidbacic@uma.es, msimarro@uma.es, spostigo@uma.es, juancas@uma.es

Se presenta el diseño y desarrollo de un banco de ensayos para evaluar el desgaste de hilos contacto y frotadores de pantógrafo, componentes fundamentales en la transmisión de energía en sistemas ferroviarios. El proyecto busca analizar la durabilidad de estos elementos bajo condiciones operativas simuladas, incluyendo variaciones de velocidad, perfil de catenaria, carga y corriente, lo cual proporciona una base sólida para optimizar su rendimiento y prolongar su vida útil.

El diseño del banco de ensayos incluye estructuras que permiten simular tanto el movimiento del hilo conductor como el del pantógrafo, con componentes diseñados para resistir cargas dinámicas y mantener un contacto eficiente entre el hilo de prueba y el pantógrafo simulado. En el desarrollo se emplearon tecnologías avanzadas de CAD para modelado y análisis de resistencia, así como una selección optimizada de materiales y componentes, lo que garantiza una fabricación eficiente y segura del equipo.

La máquina está configurada como una gran noria de aproximadamente 2,5 metros de diámetro, que puede alcanzar velocidades angulares de hasta 600rpm (equivalente a 300 km/h). Este diseño requiere una fabricación precisa, un montaje adecuado y un equilibrio óptimo para su correcto funcionamiento. Entre los desafíos técnicos más relevantes destacan la refrigeración del hilo de contacto y el suministro constante de corriente de alta intensidad al sistema rotativo.

Inicialmente, se prevé realizar ensayos pasivos con una fuerza de interacción constante; sin embargo, el diseño está preparado para ensayos con interacciones activas que simulen los cambios de fuerza y rigidez que ocurren en condiciones reales de operación.

Actualmente, la máquina se encuentra en proceso de construcción. Una vez en funcionamiento, proporcionará datos experimentales para el ajuste de los parámetros de los modelos de desgaste que reproducen el contacto entre el hilo de contacto y los frotadores del pantógrafo.

1. Introducción

En el sector ferroviario, la transmisión de energía eléctrica entre el pantógrafo y el hilo de contacto representa un elemento crucial para el funcionamiento eficiente de los trenes. Sin embargo, este proceso está sujeto a un desgaste constante debido al contacto mecánico entre ambos componentes, así como a las condiciones operativas adversas que incluyen altas velocidades, variaciones de carga y la presencia de corrientes eléctricas de alta intensidad. Estas condiciones no solo afectan la durabilidad de los materiales, sino que también impactan en la seguridad y el rendimiento del sistema en su conjunto.

En escenarios reales, como en las vías del Metro de Málaga, también se producen situaciones de desgaste que conviene estudiar y corregir de forma temprana. En caso contrario, estos fenómenos podrían acarrear elevados costes de mantenimiento de las instalaciones por la necesidad de llevar a cabo la sustitución de hilos de contacto y frotadores. Por tanto, resulta imperativo comprender a fondo la interacción mecánica y eléctrica que ocurre durante el contacto para desarrollar soluciones que optimicen la vida útil de los componentes involucrados. En las figuras 1 y 2 se muestran ejemplos de algunos desgastes observados en la infraestructura de Metro Málaga.

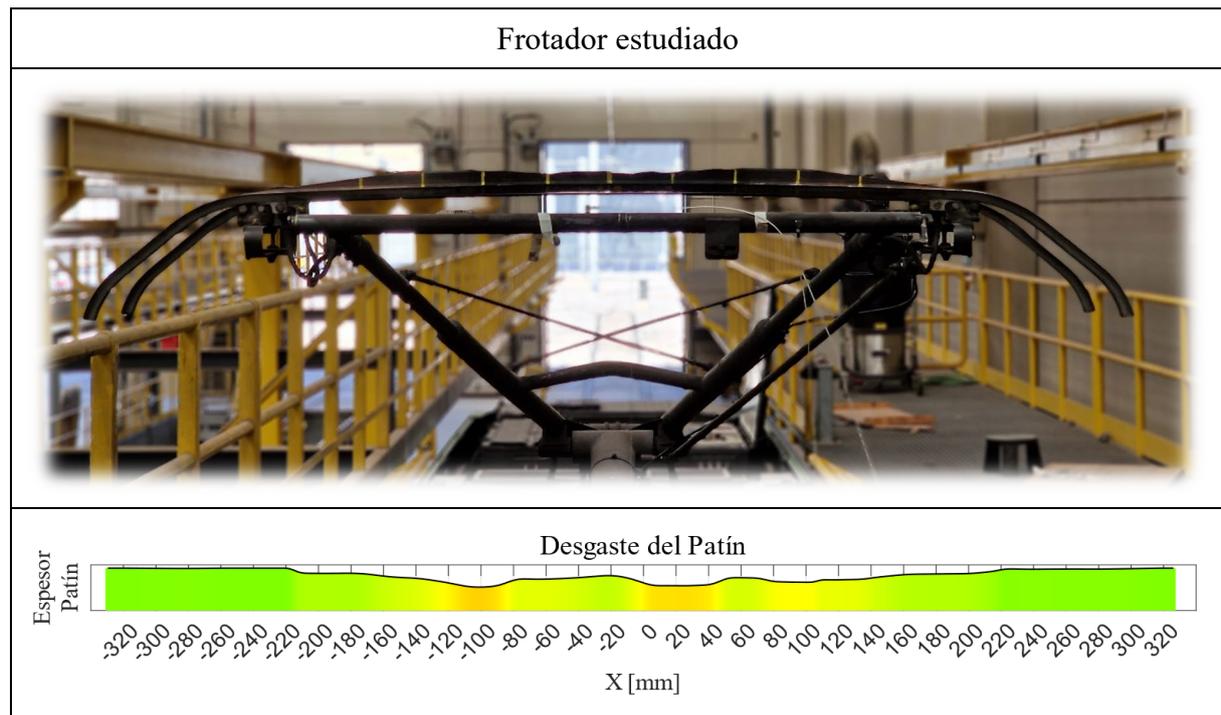


Figura 1: Frotador de grafito con desgaste

La figura 1 compuesta de dos ilustraciones muestra el desgaste de un frotador de grafito, posiblemente atribuible a la disposición de los apoyos de la catenaria tanto en posición horizontal como vertical, lo cual podría estar generando un contacto puntualmente no uniforme de las fuerzas de interacción. La colocación correcta de la catenaria respecto a la vía no es una tarea sencilla, ya que esta depende de muchos factores como la intensidad inyectada en cada punto, la velocidad del transporte o la rigidez de las estructuras utilizadas entre otros. Por otro lado, hay que mostrar especial atención en los tramos con catenaria rígida, ya que en estos segmentos cualquier discrepancia en la colocación de los soportes puede generar fuerzas de interacción no adecuadas que podría generar funcionamientos inadecuados tanto en los frotadores como en el hilo de contacto.

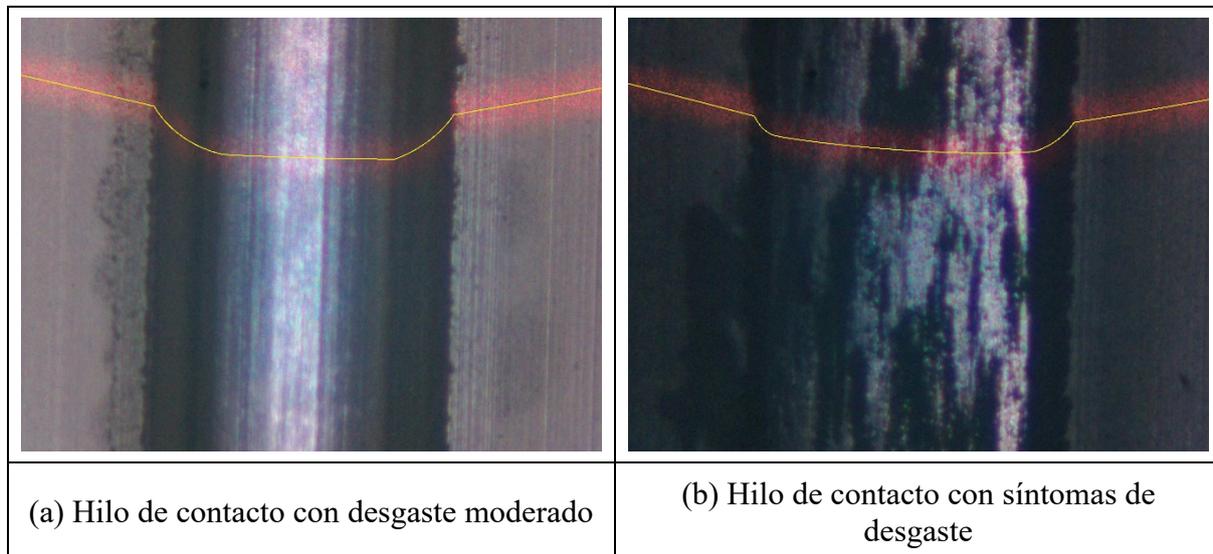


Figura 2: Muestra de desgastes reales de hilo de contacto en Metro Málaga

La Figura 2 muestra el desgaste localizado en el hilo de contacto de la catenaria, resaltado con la línea amarilla. Se observa una variabilidad en la intensidad del desgaste a lo largo del tramo, con diferencias apreciables en distancias relativamente cortas. Esto puede requerir sustituciones puntuales de ciertos segmentos, lo que supone un desafío para el mantenimiento y puede influir en la eficiencia operativa del sistema ferroviario.

El presente trabajo aborda esta problemática mediante el diseño y desarrollo de un banco de ensayos específico para simular las condiciones reales de operación en la interacción frotador-hilo de contacto, permitiendo un análisis exhaustivo del desgaste bajo factores como la velocidad, la carga y la corriente aplicada. Gracias a ello, se obtendrán datos precisos que permitirán optimizar la disposición de la catenaria, ajustándola a las particularidades de cada tramo de vía y maximizando así la eficiencia tanto de los frotadores como del hilo de contacto, reduciendo el desgaste irregular y prolongando la vida útil de los componentes.

La construcción de este equipo supone un avance significativo en la investigación aplicada al sector ferroviario, proporcionando una herramienta robusta y fiable para enfrentar los desafíos actuales de sostenibilidad y eficiencia en el transporte público. Este artículo presenta los detalles del diseño y las consideraciones técnicas involucradas, así como los objetivos a largo plazo de la investigación.

2. Diseño del banco de ensayos

En este apartado se presentará y argumentará el diseño detallado de la máquina, describiendo las ideas y fundamentos técnicos que han guiado su desarrollo. También se destacarán las ventajas del diseño, subrayando los beneficios que aporta en términos de funcionalidad, repetibilidad y eficiencia para el análisis del desgaste en el sistema frotador-hilo de contacto. [1],[2].

2.1. Conceptos principales

En la realidad, el frotador, ubicado en el pantógrafo del tren, está en contacto continuo con un hilo de catenaria que, debido a la longitud de las vías ferroviarias, puede considerarse prácticamente infinito. Para simular este contacto continuo en un espacio limitado como es el de un banco de ensayos, se ha diseñado un anillo de gran diámetro que en su periferia contiene hilo de contacto, el cual emula esta vía infinita y al rotar, simula el movimiento del tren a lo largo de la misma.

Por otro lado, el frotador objeto de estudio se pone en contacto con este anillo rotativo y se integra en un sistema que reproduce un movimiento de zigzag, simulando el desplazamiento lateral característico del hilo de catenaria sobre las vías. Para simular el flujo de intensidad eléctrica, se inyectará corriente al contacto entre el frotador y el hilo de contacto. De esta forma, será posible caracterizar los desgastes considerando todos los factores principales que influyen en este fenómeno: fuerza de contacto, intensidad de corriente, velocidad de operación y frecuencia del zigzag. Este enfoque integral permite replicar de manera eficiente las condiciones reales del sistema frotador-hilo de contacto, proporcionando datos representativos que permitirán realizar el análisis del desgaste de estos componentes. En la siguiente imagen se puede apreciar el boceto o la idea principal de diseño de la máquina (Figura 3).

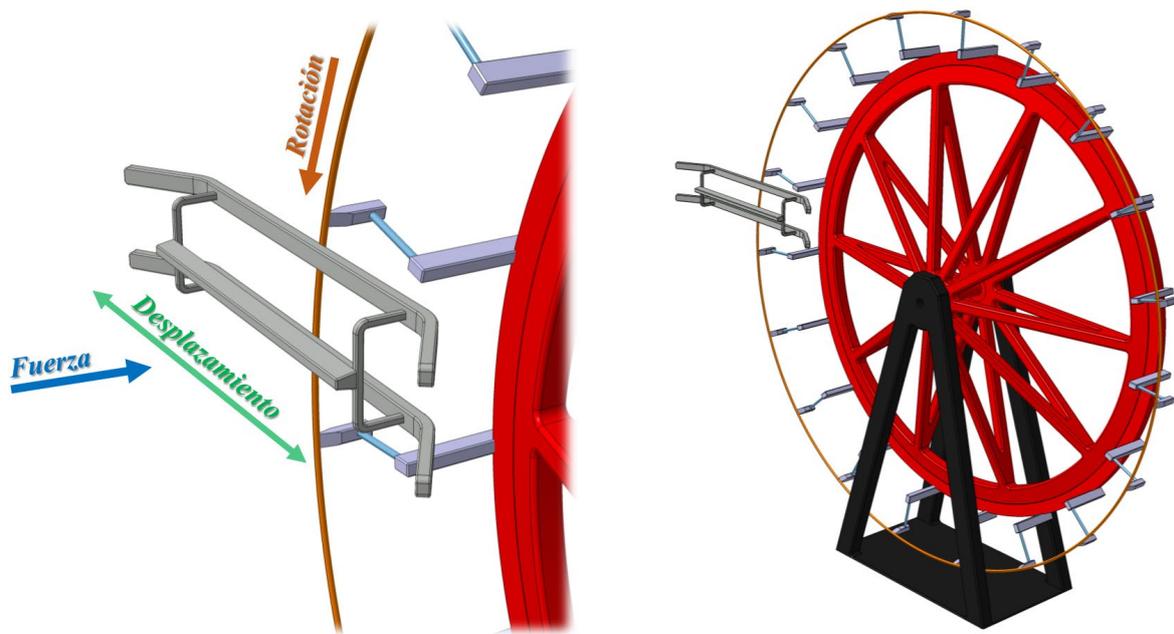


Figura 3: Boceto conceptual del banco de ensayos

Debido al diseño adoptado, la máquina se divide en dos secciones claramente diferenciadas: la parte correspondiente al anillo rotativo y la sección encargada del frotador y su movimiento en zigzag. A continuación, se describirán en detalle ambas partes, explicando sus características y el funcionamiento de cada una en el conjunto del sistema.

2.2. Diseño detallado. Anillo rotativo.

Para el diseño del anillo rotativo, es fundamental establecer una serie de parámetros clave que definirán tanto las características del sistema como la selección de los componentes adecuados, tales como el motor y la transmisión. Con el objetivo de optimizar el diseño y garantizar su funcionalidad, se han fijado los siguientes datos esenciales:

- **Velocidad máxima de operación:** Se fijará en 300 km/h, lo que corresponde a las velocidades máximas de operación alcanzadas por los trenes de alta velocidad actuales. Esto permitirá generar curvas de desgaste a altas velocidades operativas. $V_{max} = 300\text{km/h}$
- **Diámetro exterior del anillo:** Se ha seleccionado un diámetro de 2,5 m, ya que cuanto mayor sea este diámetro, mejor simulará el contacto recto entre el frotador y el hilo de contacto. Además, un diámetro mayor facilita la integración de frotadores de mayor volumen, manteniéndolos paralelos al plano del círculo del hilo de contacto, sin interferir con los apoyos o la bancada de la máquina. $\varnothing_{ext} = 2,5\text{m}$
- **Fuerza de interacción:** La fuerza de contacto entre el pantógrafo y la catenaria varía entre 40 N y 150 N en la mayoría de los casos, siendo 150 N la más desfavorable en cuanto a los requisitos de potencia del motor del banco de ensayos. $F_{contactomax} = 150\text{N}$
- **Coefficiente de rozamiento:** El coeficiente de fricción entre los materiales utilizados se muestra en la Tabla 1, destacando que el valor más desfavorable es el del cobre sin lubricante, con un valor de 0,76. $\mu_{max} = 0,76$

Tabla 1: Coeficiente de fricción experimental para los diferentes materiales del frotador

Material del frotador	Coefficiente de fricción (valor medio)
Cobre sin lubricante	0,76
Cobre con lubricante	0,21
TAF	0,43
Grafito	0,36
Kasperowski	0,21

- **Eficiencia:** La eficiencia del sistema tiene en cuenta las pérdidas tanto mecánicas como aerodinámicas derivadas de la rotación del anillo, las cuales se estiman en un 10%, resultando en una $E = 90\%$.

Con la determinación de estos parámetros podemos caracterizar la potencia, el par y la velocidad de rotación en condiciones de máxima carga para el banco. A continuación, se visualizan las fórmulas empleadas:

$$P_{max} = \frac{V_{max} \cdot F_{contactomax} \cdot \mu_{max}}{E} = 10,6kW$$

$$T_{max} = \frac{F_{contactomax} \cdot \mu_{max} \cdot \frac{\varnothing_{ext}}{2}}{E} = 156,75Nm$$

$$\omega_{giromax} = \frac{\frac{V_{max}}{\varnothing_{ext}/2}}{2\pi} = 10,61Hz = 636,3rpm$$

Una vez calculados los requisitos del sistema motriz del banco de ensayos, se ha seleccionado un motor trifásico con una potencia superior a la estimada para garantizar un margen de seguridad en su funcionamiento. Asimismo, se ha optado por una transmisión mediante correas trapeciales, que además de transmitir el movimiento, actúa como sistema reductor de la velocidad de giro. Tras varias iteraciones y análisis estructurales, se ha refinado el diseño del banco, el cual se presenta a continuación.

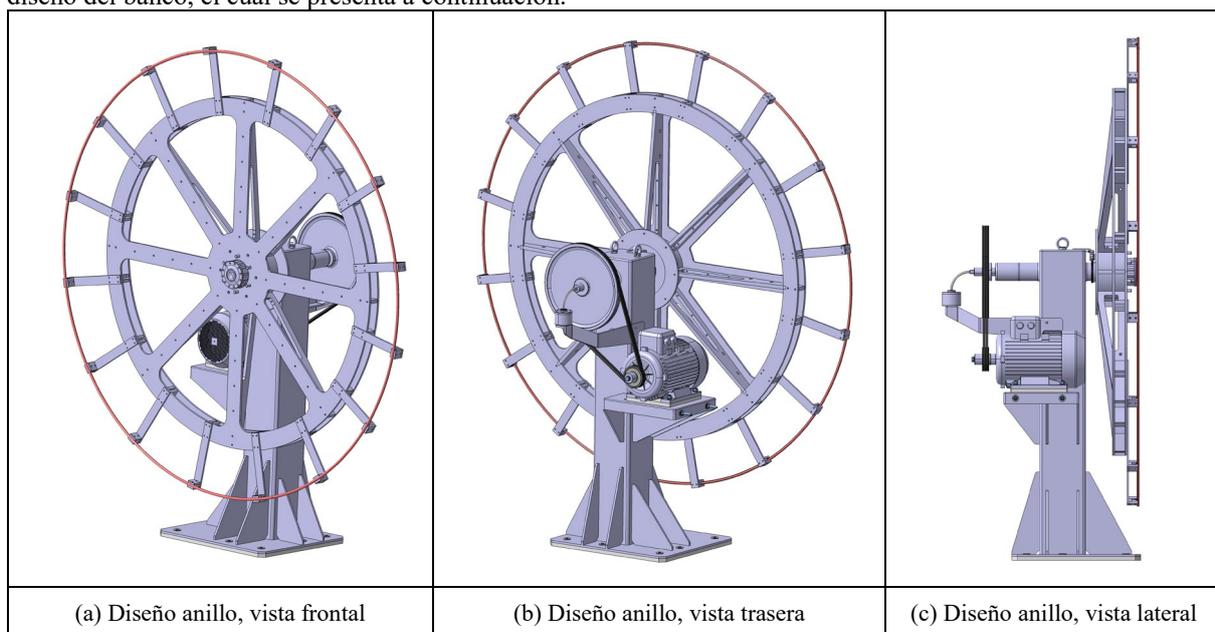


Figura 4: Diseño final, parte del anillo

La Figura 4 muestra el diseño completo de la parte perteneciente al anillo. Este diseño está pensado de forma que la parte frontal de la máquina quede despejada y la máquina ocupe el menor espacio posible. La bancada está formada por un perfil estructural hueco de $250 \times 250 \times 6mm$. Este perfil se une al suelo mediante una base de acero de 12mm de espesor acoplada al perfil mediante unas carteras que rigidizan la estructura. Escoger un perfil estructural como base de la bancada aporta sencillez al diseño y una gran rigidez.

Para conseguir una unión suave y precisa entre el sistema motriz y el elemento rotativo, se ha recurrido a la adaptación del eje de un vehículo pesado asegurando una unión suave precisa y segura. La llanta que forma el anillo giratorio (Figura 5) está fabricada en aluminio y su en su diseño se han seguido las premisas de mínimo peso y máxima rigidez, consiguiendo así que su primera frecuencia natural esté muy alejada de las vibraciones inducidas durante el funcionamiento del banco. En los extremos de la llanta, el hilo de contacto se une con la misma utilizando una serie de flejes calibrados con una rigidez media similar a la que se encuentra en una instalación ferroviaria de catenaria rígida. Estos flejes son intercambiables para poder realizar estudios en otro tipo de instalaciones.

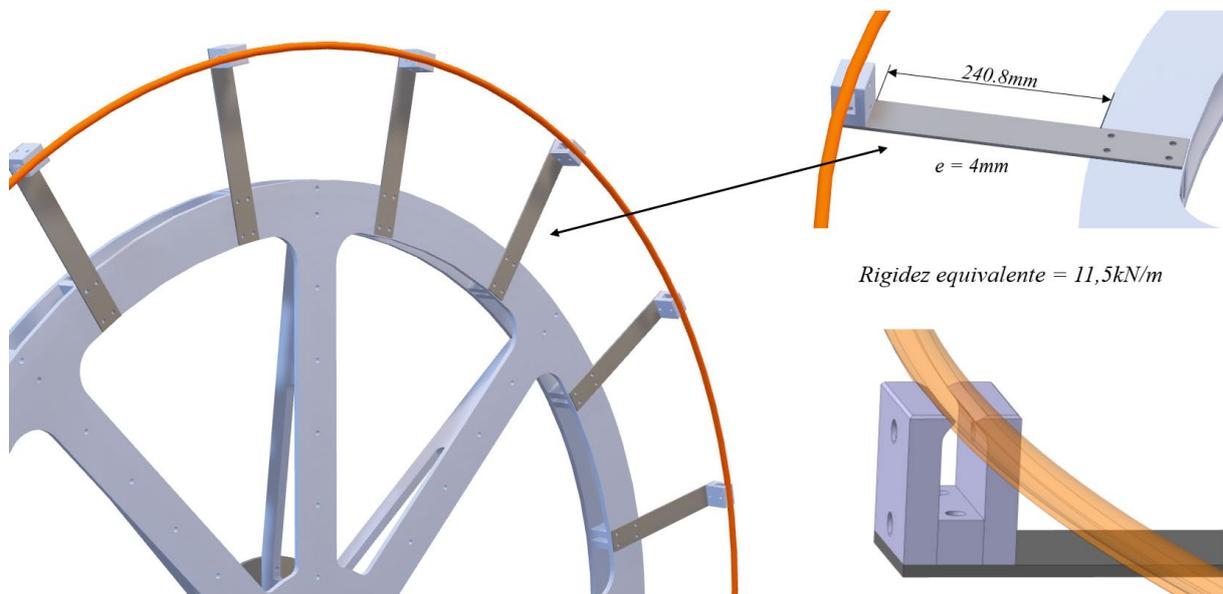


Figura 5: Detalle de llanta, flejes y amarre del hilo

La transmisión se realiza por medio de correas trapeciales, esto se utiliza como fusible mecánico. En caso de fallo del control de velocidad o de un bloqueo inesperado las correas tienen la posibilidad de deslizarse y reducir los daños del error. El motor asíncrono es controlado por medio de un variador de frecuencia y realimentado con un sensor de velocidad. El tensado de las correas se realiza por un mecanismo de corredera y dos varillas que aseguran un tensado progresivo y eficaz. En la Figura 6 se muestra la estructura transparentada para poder visualizar el sistema de transmisión citado, este se encuentra dibujado en rojo. A la derecha en la figura se muestra un detalle de la posición del sensor de velocidad.

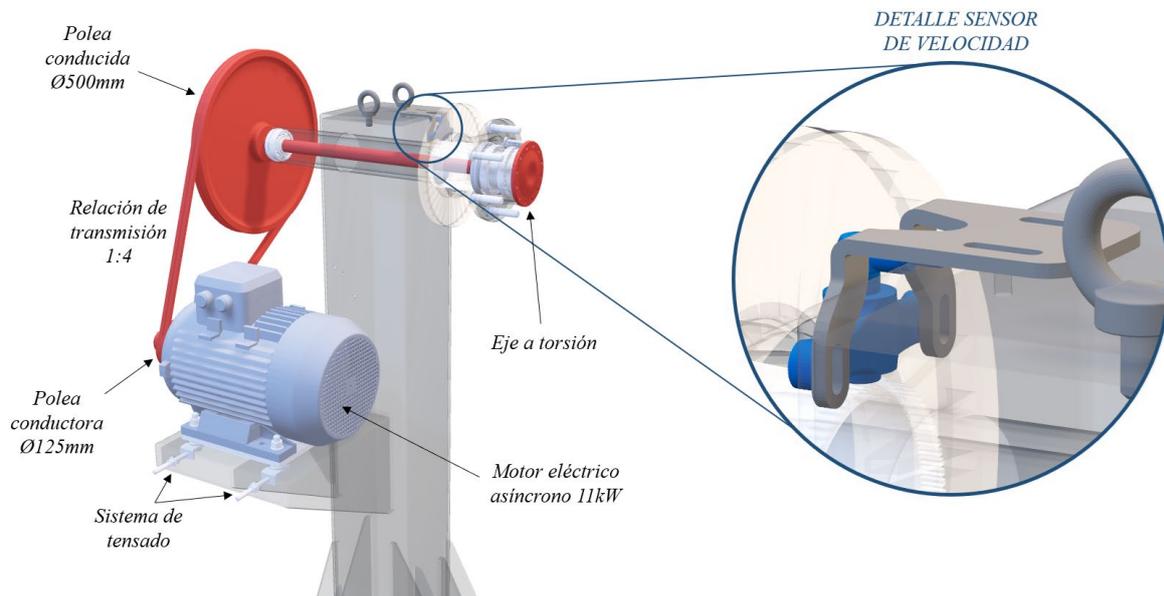


Figura 6: Sistema de transmisión

Uno de los principales desafíos técnicos es la alimentación eléctrica en el contacto entre el frotador y el hilo de contacto, ya que se requiere suministrar energía a un sistema en rotación. Para resolver este problema, se ha diseñado un mecanismo que prioriza la minimización de las pérdidas de tensión asociadas al rozamiento. La solución principal consiste en la incorporación de un depósito de mercurio [1], en el cual un terminal rotativo se sumerge parcialmente, garantizando una caída de tensión mínima y un control preciso de la corriente de entrada. De forma adicional, el sistema utiliza una serie de aisladores que dirigen la corriente eléctrica a través de puntos estratégicos, evitando áreas problemáticas y mejorando la eficiencia del contacto. Esta combinación de tecnologías asegura un suministro eléctrico estable y reduce al mínimo la potencia requerida para el funcionamiento del sistema.

En la siguiente figura (Figura 7) se puede ver el flujo de corriente desde el punto de alimentación hasta la llanta de aluminio. Si se fija con atención, los aisladores eléctricos están situados de manera que la corriente no pueda pasar por los rodamientos, puntos críticos que podrían soldarse debido al paso de grandes intensidades de corriente. También se puede ver el mecanismo con el depósito de mercurio citado anteriormente. El cable que une el depósito de mercurio con el eje de transmisión es un cable flexible que no impide el giro del mismo.

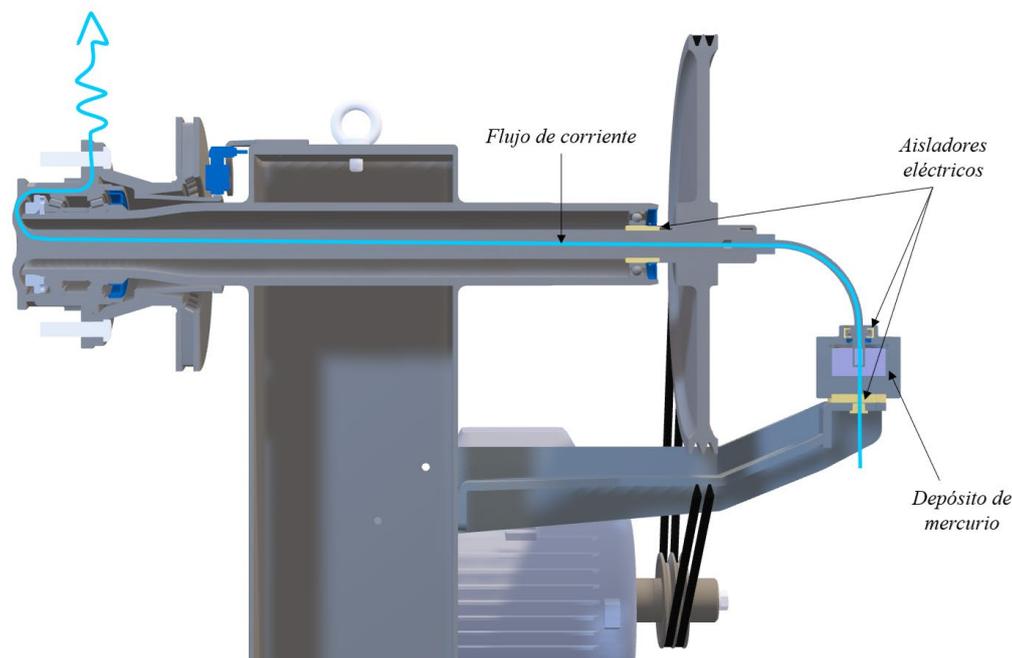


Figura 7: Flujo de corriente

Como resumen se puede indicar que el diseño del anillo rotativo se ha desarrollado cuidadosamente para garantizar su funcionalidad, precisión y durabilidad. Cada elemento, desde la estructura de la bancada hasta el sistema de alimentación eléctrica y la transmisión, ha sido pensado para poder realizar ensayos de gran duración en el tiempo asegurando una velocidad constante y controlada que permitan obtener estudios de desgastes fiables. A continuación, se abordará el diseño detallado de la bancada que acoge el frotador, destacando los mecanismos implementados para reproducir el movimiento de zigzag y su interacción con el anillo rotativo.

2.3. Diseño detallado. Bancada del frotador

Al igual que en el diseño del anillo rotativo, el desarrollo de la bancada y el sistema del frotador comienza con la definición de los mecanismos necesarios para reproducir de forma precisa los movimientos e interacciones clave del sistema frotador-hilo de contacto. En esta parte de la máquina se han identificado dos movimientos fundamentales:

- **Movimiento frontal:** Este movimiento tiene como objetivo principal garantizar el contacto entre el frotador y el hilo de contacto, aplicando una fuerza de interacción entre ambos. Inicialmente, esta fuerza será pasiva y constante, ya que este enfoque facilita su implementación y permite obtener curvas de desgaste bajo diferentes fuerzas de actuación. Sin embargo, el diseño prevé la posibilidad de evolucionar hacia un control de fuerza activa en el futuro, lo que permitiría simular con mayor realismo las condiciones reales del sistema ferroviario, incluyendo los cambios dinámicos de fuerza que se producen debido a las variaciones de altura y las inercias propias del mecanismo del pantógrafo.

Para generar una fuerza constante a lo largo de un rango de desplazamiento, se evaluaron distintas opciones, como mecanismos flexibles con rigidez constante, sistemas de poleas o palancas accionadas por gravedad, entre otros. Finalmente, se optó por la integración de un pistón neumático acoplado a un calderín tarado, el cual asegura una fuerza constante a lo largo del recorrido del pistón. Este sistema, además de ser controlable a través del sistema de gestión de la máquina, presenta alta estabilidad con una mayor inercia al cambio, ya que la fuerza del pistón depende directamente de la presión del calderín y el diámetro del pistón seleccionado.

- **Movimiento lateral:** Este movimiento se encarga de simular la oscilación del cable a lo largo de la vía, replicando el desplazamiento transversal característico de las catenarias en las instalaciones reales. Para este sistema se seleccionó un husillo de bolas acoplado a un motor eléctrico, debido a su fiabilidad, precisión y bajo mantenimiento. Aunque se consideraron alternativas, como un pistón hidráulico que

ofrece una alta velocidad de respuesta, su implementación requeriría un sistema hidráulico completo, el cual es más ruidoso, costoso y complejo en comparación con la solución elegida. El husillo, en cambio, proporciona un movimiento limpio, controlable y adecuado para las necesidades del banco de ensayos.

Una vez definidos los movimientos y sistemas que se emplearán, es necesario calcular los parámetros y dimensiones de cada sistema para integrarlos de forma eficiente en el diseño de la máquina. A continuación, se describen los cálculos detallados para los movimientos frontal y lateral.

- **Cálculos para el Movimiento Frontal:** El sistema frontal tiene como objetivo aplicar una fuerza de interacción constante entre el frotador y el hilo de contacto mediante un pistón neumático. Considerando una presión máxima del compresor de 8 bar (0,8 MPa) y una presión de trabajo máxima estimada de 6 bar (0,6 MPa), se requiere garantizar una fuerza de contacto de al menos 180 N, con un margen superior a los 150 N necesarios para compensar posibles pérdidas por fricción.

La relación entre la presión P , la fuerza F y el área del pistón A está dada por $P = F/A$, de donde se obtiene $A = F/P$. Sustituyendo los valores disponibles, se calcula un área mínima de pistón de $A = 180/0.6 = 300\text{mm}^2$.

Dado que el área y el diámetro D del pistón se relacionan mediante $A = \pi D^2/4$, se despeja D como $D = \sqrt{4A/\pi}$. Al sustituir $A = 300\text{mm}^2$, se obtiene $D = \sqrt{4 \times 300/\pi} = 19.6\text{mm}$.

Por lo tanto, se requiere un pistón con un diámetro mínimo de $\varnothing 20\text{mm}$ para generar la fuerza deseada.

- **Cálculo del Volumen Mínimo del Calderín Tarado:** Para garantizar que la fuerza de interacción se mantenga constante durante todo el desplazamiento del pistón, el depósito debe ser capaz de compensar cualquier variación de presión. Se establece que la fuerza no debe fluctuar en más de un 1% a lo largo de una carrera de 320mm .

El volumen de la cámara del pistón se obtiene mediante la expresión $v = (\pi D^2/4) \cdot \text{carrera}$. Sustituyendo un diámetro de pistón de 20mm y una carrera de 320mm , se obtiene $v = 0.1\text{litros}$.

Para que la variación de presión no supere el 1%, se debe cumplir la condición $(V + v)/V - 1 < 0.01$. Despejando el volumen mínimo del calderín, se obtiene $V = 10\text{litros}$.

Por lo tanto, el depósito debe tener un volumen mínimo de 10l para asegurar que la fuerza aplicada permanezca constante con una variación menor o igual al 1% a lo largo de toda la carrera del pistón.

- **Cálculos para el Movimiento Lateral:** El movimiento lateral reproduce el zigzag del hilo a lo largo de la vía. Este movimiento debe ser preciso y lo suficientemente rápido para simular las condiciones reales. De acuerdo con la normativa la catenaria se desplaza horizontalmente 40 cm cada 60 m. Para mayor seguridad, se calculará con un desplazamiento de 50 cm cada 50 m, es decir, **1 cm por cada metro recorrido**.

Si el tren se desplaza a una velocidad máxima de 300 km/h (85 m/s), el frotador debe desplazarse lateralmente a: $v_{\text{patinvelcte}} = 85\text{ m/s} \cdot (0.01\text{ m}/1\text{ m}) = 0.85\text{ m/s}$

Dado que el frotador realiza un movimiento de vaivén que simula el perfil de zigzag de la catenaria, el sistema debe ser capaz de acelerar y decelerar rápidamente. El tiempo total que el frotador tarda en recorrer la longitud lateral debe coincidir con el tiempo que tomaría si se mantuviera a una velocidad constante, pero la naturaleza del movimiento de vaivén implica que el frotador debe detenerse en cada extremo del recorrido antes de invertir su dirección. Esto significa que la velocidad máxima durante el trayecto debe ser mayor que la velocidad promedio constante.

En este caso, el perfil de movimiento presenta un patrón triangular simplificado, en el que el frotador acelera desde $v = 0$ hasta una velocidad máxima, mantiene esta velocidad por un tiempo y luego desacelera de nuevo hasta $v = 0$. Este tipo de perfil genera un aumento en la velocidad máxima requerida para cumplir con las restricciones de tiempo, y, por lo tanto, también define las aceleraciones necesarias.

Aunque el control del movimiento del frotador en la máquina real puede utilizar una curva más precisa y continua, esta simplificación es suficiente para calcular la aceleración requerida y, con ella, la potencia necesaria para el motor. Estos valores sirven como una base conservadora, ya que este perfil triangular representa las condiciones más exigentes en términos de aceleración y potencia.

Por lo tanto, aunque la curva real de control no será exactamente la simplificación presentada en la Figura 8, el uso de este modelo se considera válido para obtener una estimación inicial de los requerimientos del motor en términos de aceleración y potencia.

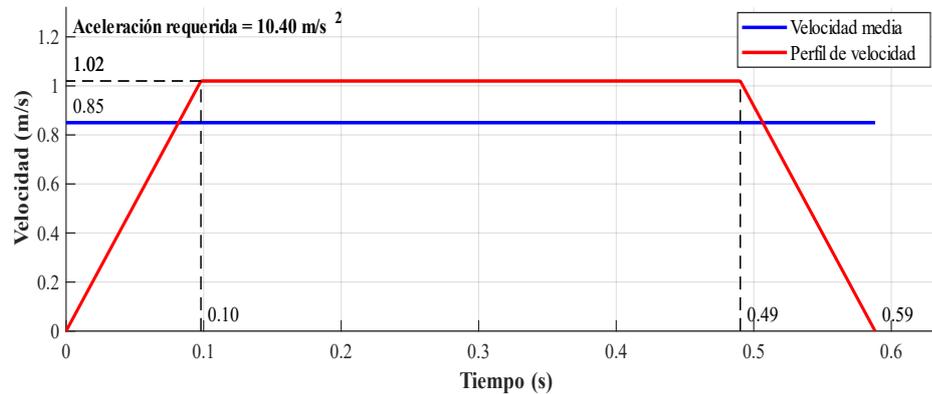


Figura 8: Perfil de velocidad más desfavorable con máxima carga

Si la masa del sistema móvil es de aproximadamente 20 kg, la fuerza necesaria para vencer la inercia será:

$$F_{inercia} = m \times a = 20 \times 10.4 = 208N$$

A esto se suma la fuerza de fricción debido al contacto entre el frotador y el hilo de contacto:

$$F_{fricción} = F_{contacto} \times \mu = 150 \times 0.76 = 114N$$

La fuerza total requerida es:

$$F_{total} = F_{inercia} + F_{fricción} = 208 + 114 = 322N$$

La potencia requerida se calcula como:

$$P = F_{total} \times v_{patín}$$

Sustituyendo:

$$P = 322 \times 1.02 = 328.44W$$

Considerando un 20% de pérdidas por fricción en el husillo y las guías lineales y introduciendo un factor de seguridad de 2:

$$P_{max} = P \times (1 + \text{pérdidas}) \times \text{factordeseguridad} = 328.44 \times 1.2 \times 2 \approx 800W$$

Se requiere un motor con una potencia mínima de 800 W, considerando un margen adicional para garantizar su correcto funcionamiento.

- **Selección del husillo y transmisión:** Una vez seleccionado el motor, se deberá elegir el husillo y el sistema de transmisión (poleas) que permitan alcanzar la velocidad de 1.02 m/s dentro del rango operativo del motor, asegurando precisión y fiabilidad en el movimiento.

Con estos cálculos, se han establecido las especificaciones para los sistemas de movimiento frontal y lateral, asegurando su correcta integración en el diseño global. Se han definido las características de los componentes comerciales necesarios para esta parte de la máquina, aunque los modelos específicos de estos componentes no se discutirán en este artículo. El objetivo aquí ha sido presentar los cálculos más relevantes para ilustrar el proceso general de selección de estos elementos.

Una vez que los componentes comerciales estén seleccionados, se podrá avanzar con el diseño detallado. A partir de este punto, el proceso de diseño continuará con varias iteraciones, realizando cálculos de tensiones y optimización, hasta llegar al diseño final que se presenta a continuación.

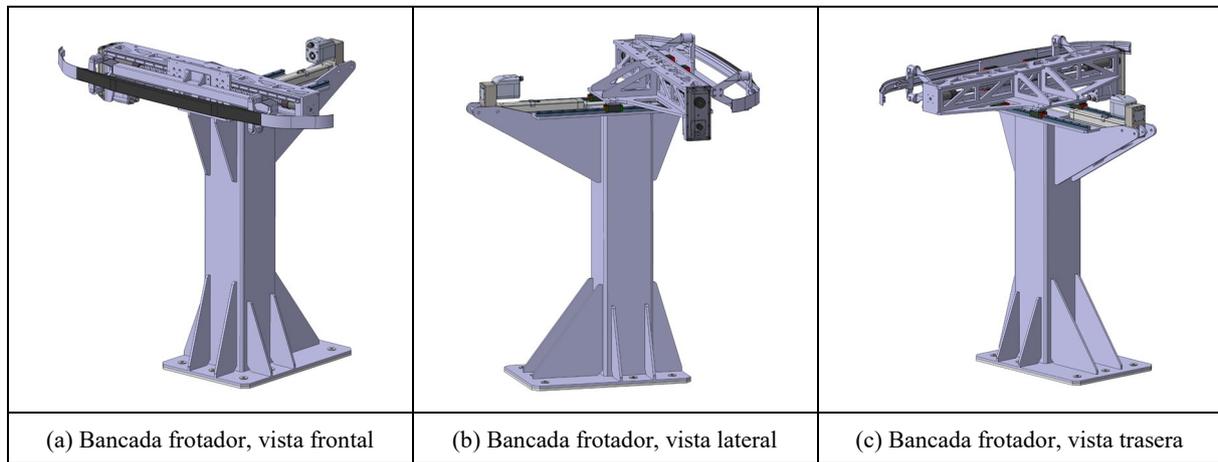


Figura 9: Diseño final, bancada frotador

En la Figura 9 se pueden observar las soluciones adoptadas para la bancada que soporta el frotador y proporciona todos los movimientos necesarios para realizar una simulación correcta del contacto. El diseño de la bancada se basa en un perfil estructural hueco de 250x250x6mm, el mismo perfil que se utiliza como base para el anillo rotativo, este garantiza consistencia, robustez y hace que el diseño de la máquina completa sea más elegante y sencillo. En la parte superior de este perfil se encuentran dos guías lineales de gran tamaño, responsables de permitir el movimiento en la dirección frontal, que es el encargado de acercar el frotador al hilo de contacto y mantener el contacto.

La parte móvil asociada a este sistema está fabricada en aluminio para reducir su inercia, permitiendo una respuesta más rápida y mejorando el comportamiento dinámico de la máquina. Este diseño móvil no solo facilita el movimiento frontal, sino que también sirve de base para un segundo eje que habilita el movimiento lateral, el cual reproduce el zigzag característico del cable en las vías.

En conjunto, el sistema se divide en tres partes principales:

- **La bancada fija:** Anclada al suelo, actúa como la estructura base que soporta y transmite todas las fuerzas generadas durante la operación.
- **El primer carro móvil:** Unido a las guías lineales de la bancada, realiza el movimiento en la dirección frontal y sirve como soporte para el eje lateral.
- **El segundo carro móvil:** Montado sobre el eje lateral, se desplaza mediante un husillo de bolas que genera el movimiento de zigzag del cable.

En la siguiente figura (Figura 10) se pueden apreciar las diferentes partes de la bancada.

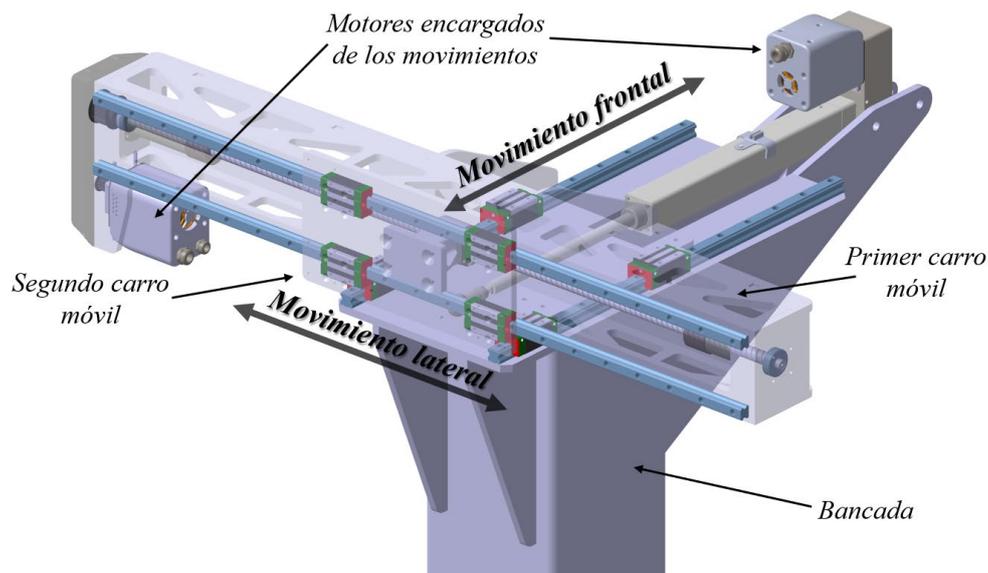


Figura 10: Vista detallada, movimientos del frotador

En el segundo carro móvil se instala el frotador de estudio, que está soportado por cuatro células de carga triaxiales. Estas células permiten monitorizar en tiempo real la fuerza de contacto en las tres direcciones. Además, la placa

que conecta el frotador con el sistema está diseñada para alojar tanto frotadores reales completos como muestras más pequeñas del material del frotador, proporcionando flexibilidad para diversos estudios y pruebas (Figura 11).

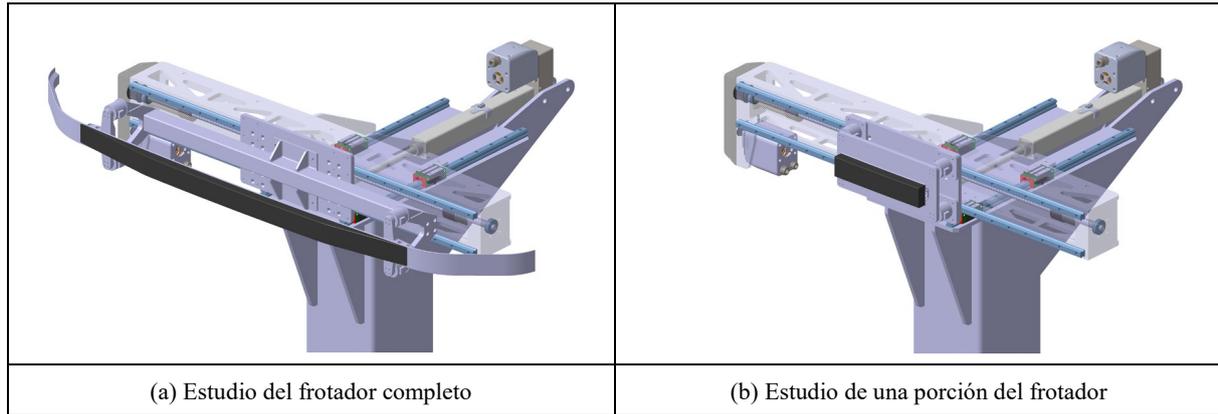


Figura 11: Diferentes configuraciones de estudio

El diseño mostrado corresponde al sistema con pistón de husillo, que es el más avanzado y versátil para los ensayos a largo plazo. Sin embargo, para los primeros ensayos, se utilizará el pistón neumático calculado anteriormente debido a su facilidad de control y mayor seguridad. Este enfoque inicial permitirá realizar pruebas con mayor flexibilidad, mientras que el pistón de husillo se implementará en fases posteriores, cuando se busquen datos teniendo en cuenta más variables del sistema.

2.4. Diseño completo

En este apartado se presentan dos imágenes (Figuras 12 y 13) que muestran el ensamblaje de las estructuras, situando la bancada del frotador en su posición de trabajo. En la primera imagen se representa la máquina vista desde el frente, permitiendo apreciar la disposición de los elementos principales, mientras que en la segunda se muestra la parte trasera, proporcionando una visión completa del sistema. Ambos módulos están diseñados para ser anclados firmemente al suelo mediante tornillos de gran envergadura, asegurando una correcta disipación de vibraciones y esfuerzos, lo que contribuye a la estabilidad y precisión del ensayo.

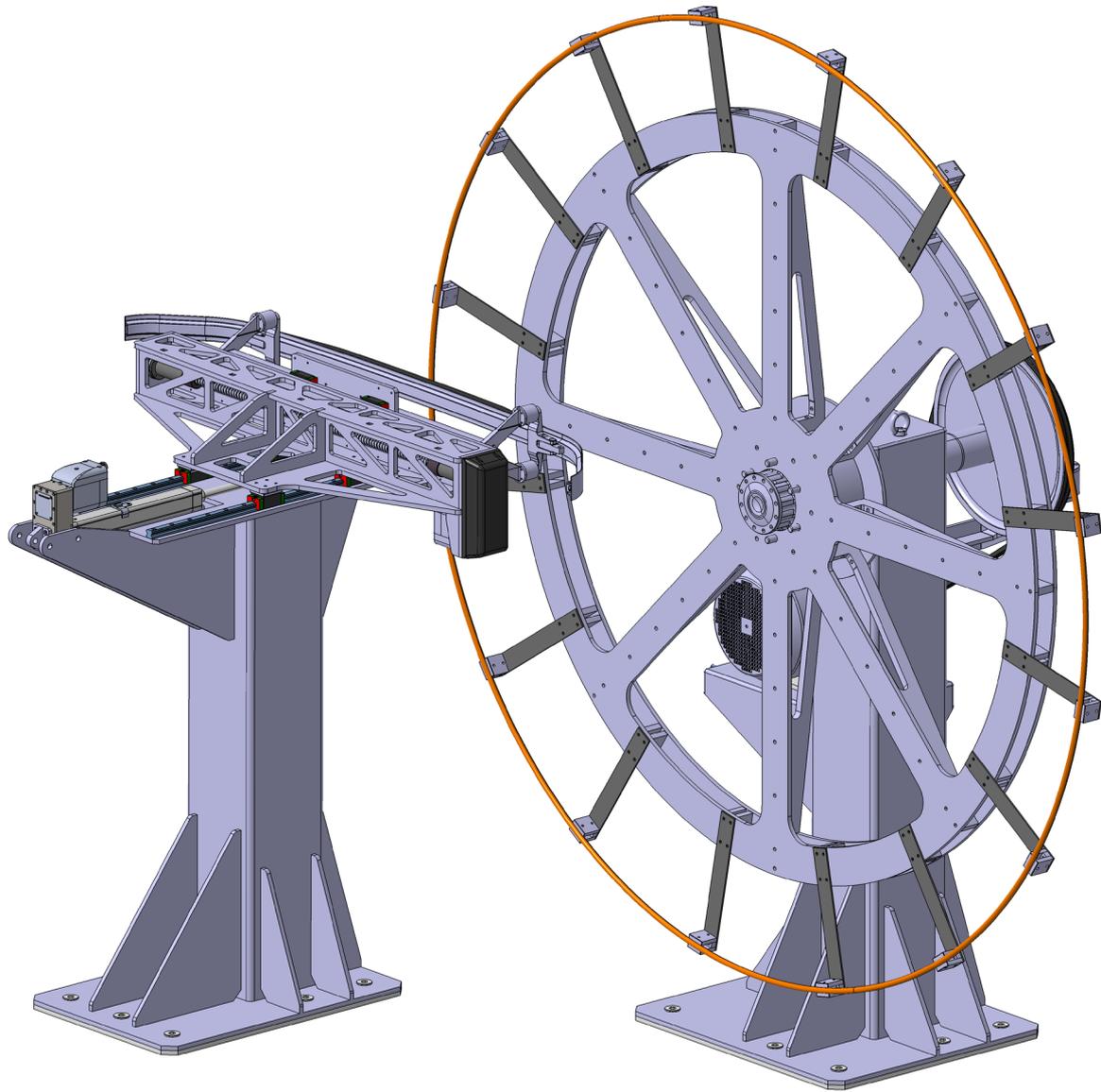


Figura 12: Banco de ensayos, vista frontal

Dado que la máquina alcanza una altura total de 2,8 metros y que el anillo rotativo puede girar a una velocidad máxima de 600 rpm, la seguridad es un aspecto primordial en su diseño. Para garantizar un entorno seguro tanto para los operadores como para la integridad del equipo, se ha previsto la construcción de una sala aislada que envuelva completamente la máquina. Esta sala no solo servirá como barrera de protección, sino que también contribuirá a reducir el nivel de ruido generado durante los ensayos y a contener las partículas residuales derivadas del desgaste de los materiales en estudio.

El diseño de la sala incluirá una gran ventana de cristal reforzado, lo que permitirá una observación clara y segura del ensayo sin comprometer la protección del operador. Los estudios de desgaste requieren ensayos prolongados, en los que el contacto entre los elementos debe mantenerse durante horas, e incluso días, para apreciar diferencias significativas en la muestra, la fiabilidad y robustez de todo el sistema resultan fundamentales. Por ello, cada componente ha sido diseñado y seleccionado cuidadosamente para garantizar un funcionamiento continuo, minimizando las interrupciones y optimizando la calidad de los resultados obtenidos.

Además de garantizar la seguridad y el aislamiento acústico, la sala de ensayos estará equipada con un sistema de ventilación y filtrado de partículas. Durante los ensayos prolongados, el desgaste del frotador y del hilo de contacto genera residuos en forma de polvo y partículas metálicas que, si no se controlan, podrían afectar tanto a la exactitud de las mediciones como a la vida útil de los componentes. Para evitarlo, se integrará un sistema de extracción que capture estas partículas y mantenga un ambiente limpio dentro de la sala.

Asimismo, se ha considerado la instalación de sensores y cámaras de monitoreo que permitan un seguimiento remoto del ensayo. Esto facilitará la recopilación de datos en tiempo real sin necesidad de acceso físico constante, optimizando la seguridad y reduciendo la exposición del operador a condiciones de trabajo prolongadas. Estos elementos, junto con una iluminación adecuada dentro de la sala, permitirán una observación clara del ensayo en curso y contribuirán a la eficiencia general del sistema.

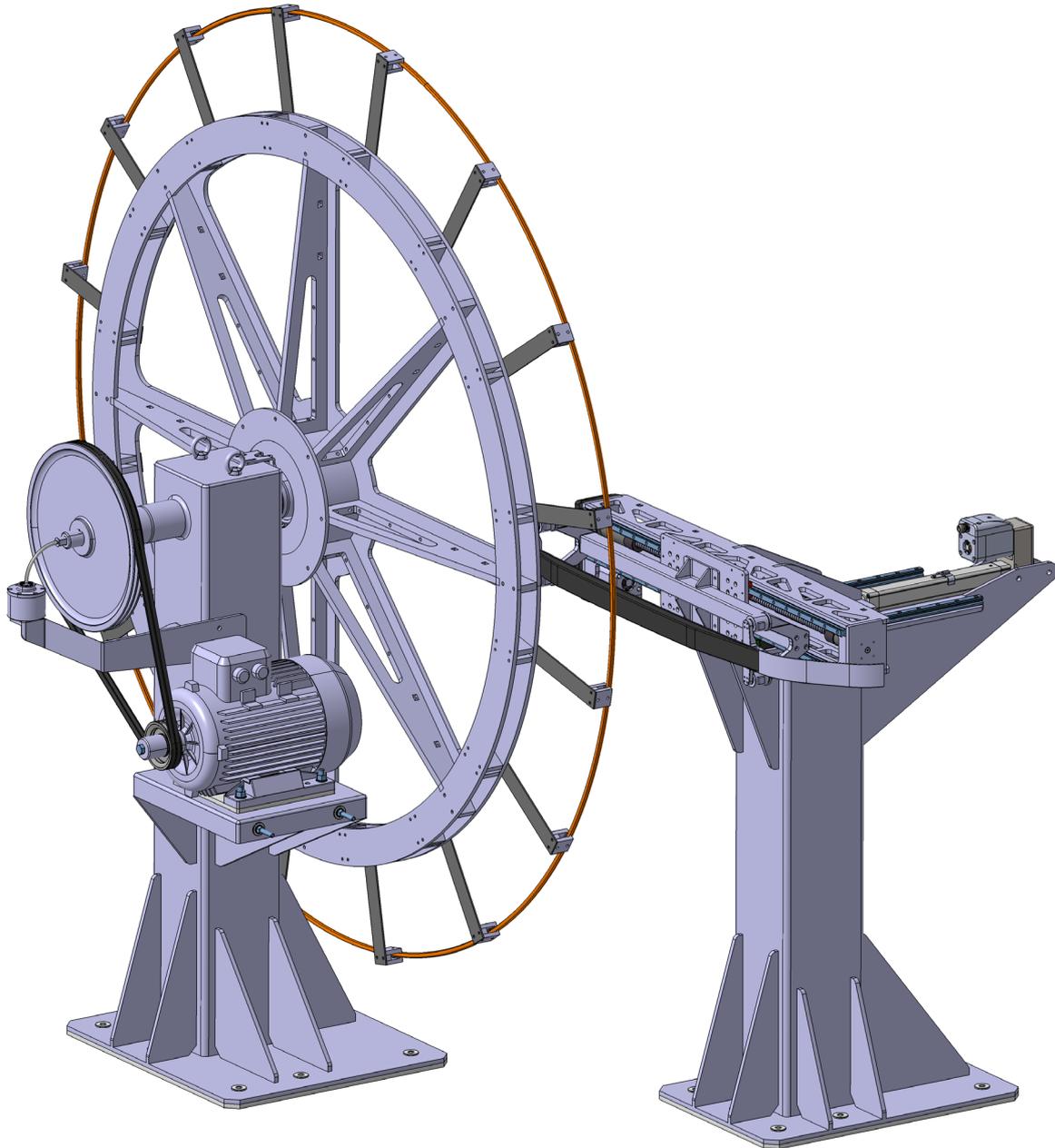


Figura 13: Banco de ensayos, vista trasera

3. Desafíos futuros

A pesar de haber definido y desarrollado un diseño funcional para el banco de ensayos, aún existen varios desafíos técnicos que deberán abordarse en el futuro para optimizar el rendimiento, la seguridad y la fiabilidad del sistema. Entre los aspectos clave a mejorar se encuentran el equilibrado del anillo, la refrigeración del hilo de catenaria y el control robusto y preciso de la máquina.

3.1. Equilibrado del Anillo

El anillo giratorio es una de las partes más críticas del sistema, ya que su correcta operación influye directamente en la estabilidad del sistema. Debido a su alta velocidad de rotación, que puede alcanzar las 600rpm, cualquier pequeña desviación en su masa o geometría puede generar vibraciones indeseadas, afectando la calidad de la simulación y comprometiendo la seguridad del sistema.

Para mitigar este problema, será necesario llevar a cabo un proceso de equilibrado dinámico del anillo, asegurando que su masa esté distribuida de manera uniforme y que las fuerzas centrífugas no generen oscilaciones significativas. Se evaluará el uso de contrapesos estratégicamente colocados y la implementación de sensores de vibración para monitorear el comportamiento del anillo en tiempo real. En caso de detectar desequilibrios, se podrán realizar ajustes para minimizar las vibraciones y garantizar un funcionamiento estable y fiable.

3.2. Refrigeración del Hilo de Catenaria

A diferencia de una instalación ferroviaria real, donde el hilo de catenaria se enfría de manera natural debido a la baja frecuencia de contacto entre el pantógrafo y cada punto del hilo, en nuestro banco de ensayos la situación es muy distinta. Aquí, el mismo segmento del hilo de catenaria está en contacto continuo con el frotador, lo que genera un calentamiento excesivo debido a la fricción constante. Este aumento de temperatura puede alterar el comportamiento del material, modificar las tasas de desgaste y comprometer la representatividad de los ensayos.

Para abordar este desafío, se estudiará la importancia de incorporar un sistema de refrigeración que permita disipar el calor generado y evitar fluctuaciones térmicas que puedan afectar los resultados. Una opción viable sería la implementación de un sistema de refrigeración por aire forzado, utilizando bocas de aire a presión estratégicamente ubicadas para mejorar la convección térmica y mantener la temperatura dentro de un rango controlado.

La elección final del sistema de refrigeración dependerá del impacto térmico observado en los primeros ensayos, así como de la viabilidad técnica y económica de las posibles soluciones.

3.3. Control Robusto y Preciso de la Máquina

El correcto funcionamiento del banco de ensayos depende en gran medida del control preciso de todos los movimientos involucrados. El sistema debe ser capaz de regular de manera estable la fuerza de interacción entre el frotador y el hilo de catenaria, garantizar un desplazamiento lateral exacto que reproduzca fielmente el zigzag de la vía, y mantener la velocidad de rotación del anillo con gran precisión.

En los primeros ensayos, se utilizará un control relativamente sencillo basado en la regulación de presión para el pistón neumático y en el control de velocidad y posición del motor del movimiento lateral. Sin embargo, en futuras iteraciones se explorará la implementación de un control más avanzado, basado en estrategias de control adaptativo o robusto, que permita realizar variaciones en las condiciones de ensayo, como la fuerza de interacción entre el frotador y el hilo de contacto o incorporar perfiles de desplazamiento lateral complejos unidos a cambios de corriente cambiantes.

4. Conclusiones

El presente trabajo ha abordado parte del problema de desgaste en la interacción entre el frotador del pantógrafo y el hilo de contacto, una cuestión crítica en la transmisión de energía en sistemas ferroviarios. A partir del análisis de casos reales, como los observados en Metro Málaga, se ha identificado la necesidad de una herramienta que permita estudiar en detalle los factores que influyen en este fenómeno, con el fin de optimizar la disposición de la catenaria y mejorar la eficiencia de los componentes involucrados.

Como principal contribución, se ha diseñado y desarrollado un banco de ensayos que simula con precisión las condiciones operativas reales, permitiendo la evaluación del desgaste bajo diferentes velocidades, cargas y corrientes aplicadas. La implementación de un anillo de hilo de contacto de gran diámetro capaz de alcanzar grandes velocidades angulares, junto con un sistema de husillo que reproduce el zigzag del hilo de contacto, garantiza la representación fiel de los ensayos con la realidad y la obtención de datos experimentales relevantes.

El diseño del banco de ensayos ha contemplado múltiples desafíos técnicos, tales como el equilibrado del anillo giratorio, la refrigeración del hilo de contacto y la correcta aplicación de corriente a un sistema rotativo. Asimismo, se ha previsto la posibilidad de realizar ensayos tanto con un pistón neumático como con un sistema de pistón eléctrico para la aplicación de la carga de interacción, lo que aporta flexibilidad y permite adaptar el equipo a futuros estudios más exigentes.

Los resultados obtenidos de este banco de ensayos contribuirán a una mejor comprensión de los mecanismos de desgaste en la interfaz frotador-hilo de contacto, proporcionando información clave para optimizar los parámetros de operación y reducir los costos de mantenimiento en redes ferroviarias. A largo plazo, esta investigación permitirá mejorar la sostenibilidad y eficiencia del sistema ferroviario, asegurando una mayor fiabilidad y durabilidad de sus componentes esenciales.

Actualmente, la máquina se encuentra en fase de construcción. Al momento de la entrega de este artículo, la fabricación del anillo está por finalizar, y se ha iniciado la construcción del sistema correspondiente al frotador. Se espera que, en un plazo de tiempo relativamente corto, se de inicio a los primeros ensayos, cuyos resultados permitirán obtener conclusiones preliminares sobre el comportamiento del desgaste en la interfaz frotador-hilo de contacto.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible de implementar gracias a la colaboración de Metro de Málaga S.A.

6. Referencias

- [1] G Bucca, A Collina, R Manigrasso, F Mapelli, and D Tarsitano, “Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph–catenary interaction”, DOI: 10.1177/0954409710396786 (2010).
- [2] Norma Adif 018NAE107, Información técnica Guías lineales HIWIN, Manual técnico husillos de bolas Tecnopower, Manual técnico Optibelt.