

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**Diseño conceptual de sistema automatizado de prueba para ruedas delanteras
de camiones eléctricos de 300 toneladas de carga para minería**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL
GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

AUTOR

Alvaro Javier Balvín Bellido

ASESOR

Daniel Eduardo Domínguez Mostacero

Lima, diciembre del 2020

RESUMEN

El presente trabajo se centró en la necesidad de desarrollar sistemas estándares para la prueba de componentes rotativos pertenecientes a equipos de maquinaria pesada y tuvo como objetivos los de investigar acerca de las necesidades, requerimientos y características necesarias de un sistema de simulación dinámica de funcionamiento de ruedas, para posteriormente plantear y definir un concepto de solución adecuado para un banco de pruebas automatizado de ruedas delanteras de camiones mineros que pueda satisfacer las pautas planteadas y permita comprobar el correcto funcionamiento de estos componentes.

Luego de definir las exigencias del contexto en el que se propuso para el sistema automatizado, se procedió a definir los diferentes conceptos de solución disponibles para la propuesta, para los cuales se realizó primero una definición del estado de las tecnologías relacionadas con las que se cuentan actualmente.

Para el desarrollo de los conceptos de solución y selección del modelo final, se adaptó la metodología de sistemas técnicos y productos (VDI 2221). Finalmente, se realizó un análisis técnico-económico para elegir a la solución que sea la más óptima, siendo esta considerada como la opción que cuente con un balance homogéneo entre beneficios técnicos y económicos

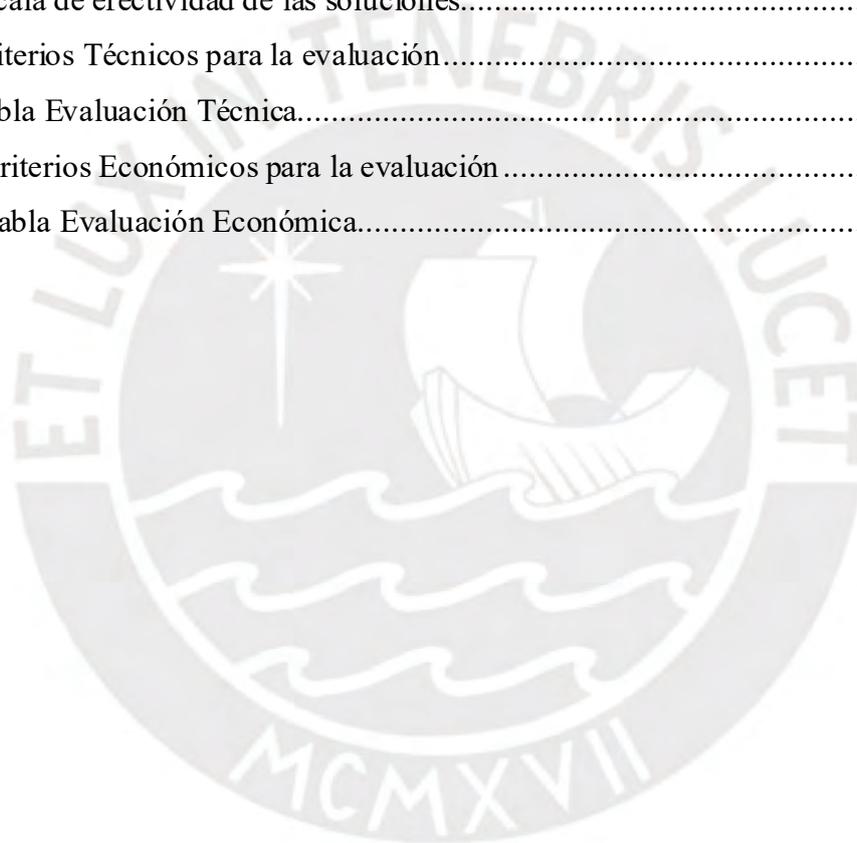
Índice de contenido

	Pág.
RESUMEN	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
INTRODUCCIÓN.....	6
1 MARCO PROBLEMÁTICO.....	8
1.1 PROBLEMÁTICA	8
1.1.1 Fugas de aceite y casos de garantía.....	10
1.1.2 Problemática principal por tratar.....	10
1.2 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	11
1.2.1 Alcance.....	11
1.2.2 Objetivos.....	12
1.2.3 Objetivo General.....	12
1.2.4 Objetivos Específicos.....	12
1.2.5 Identificación de usuarios y grupos de interés	13
1.2.6 Metodología del trabajo a realizar.....	13
2 ESTADO DEL ARTE.....	16
2.1 LA RUEDA DELANTERA DEL CAMIÓN ELÉCTRICO PARA MINERÍA	16
2.1.1 Cámaras dentro del ensamble de rueda delantera.....	18
2.1.2 Sistema de frenos húmedos en ruedas delanteras.....	19
2.2 PROCEDIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES EN PRUEBAS DE RUEDAS.....	21
2.2.1 Pruebas de estanqueidad.....	21
2.2.2 Especificaciones de Prueba de fatiga de rueda SAE.....	22
2.2.3 Requerimientos de desempeño y procedimientos para pruebas de sistemas de frenado (ISO3450).....	23
2.3 ESTADO DE TECNOLOGÍAS.....	25
2.3.1 Biaxial Wheel test machine.....	25
2.3.2 Modelo ZWARP.....	26
2.3.3 Diseño alternativo de evaluación dinámico de ruedas.....	27
2.3.4 Sistema de emergencia ante valores inusuales de vibración	28
2.3.5 Banco de pruebas de frenos húmedos Komatsu-Estados Unidos	28
3 DISEÑO DEL CONCEPTO DE SOLUCIÓN.....	31

3.1	LISTA DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	31
3.1.1	Función Principal.....	31
3.1.2	Exigencias y Deseos	31
3.2	BLACK BOX GENERAL (DIAGRAMA DE CAJA NEGRA).....	33
3.3	ESTRUCTURA DE FUNCIONES.....	36
3.3.1	Dominio Mecánico-Hidráulico.....	36
3.3.2	Lista de funciones del dominio mecánico-hidráulico.....	36
3.3.3	Estructura de Funciones del dominio mecánico-hidráulico	37
3.3.4	Dominio Eléctrico/Electrónico.....	37
3.3.5	Lista de funciones del dominio Eléctrico/Electrónico.....	38
3.3.6	Estructura de Funciones del dominio eléctrico/electrónico.....	38
3.3.7	Dominio de Control.....	39
3.3.8	Lista de funciones del dominio de control.....	39
3.3.9	Estructura de funciones del dominio de control.....	39
3.4	MATRIZ MORFOLÓGICA.....	39
3.4.1	Matriz del Dominio Mecánico.....	40
3.4.2	Matriz del Dominio Eléctrico/Electrónico.....	42
3.4.3	Matriz del dominio de Control.....	43
3.5	CONCEPTOS DE SOLUCIÓN.....	44
3.5.1	Concepto de Solución No1.....	44
3.5.2	Concepto de Solución No2.....	47
3.5.3	Concepto de Solución No3.....	49
3.6	EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA.....	51
3.6.1	Valoración Técnica-económica	51
3.6.2	Puntaje técnico-económico.....	51
3.6.3	Criterios Técnicos.....	52
3.6.4	Criterios Económicos.....	53
3.6.5	Evaluación de concepto Óptimo.....	54
3.7	DIAGRAMA DE OPERACIONES.....	55
	CONCLUSIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 3-1 Lista de Exigencias y Deseos.....	32
Tabla 3-2 Índice de Estructura de Funciones.....	36
Tabla 3-3: Conceptos de Solución del sistema Mecánico.....	40
Tabla 3-4 Matriz morfológica del dominio eléctrico.....	42
Tabla 3-5 Matriz morfológica Dominio de control.....	43
Tabla 3-6 Pesos relativos de la evaluación.....	51
Tabla 3-7 Escala de efectividad de las soluciones.....	51
Tabla 3-8 Criterios Técnicos para la evaluación.....	52
Tabla 3-9 Tabla Evaluación Técnica.....	52
Tabla 3-10 Criterios Económicos para la evaluación.....	53
Tabla 3-11 Tabla Evaluación Económica.....	53



Índice de FIGURAS

	Pág.
Fig 1-1 Diseño del enfoque general para el diseño acorde al VDI-2221	14
Fig 2-1 2 Diagrama descriptivo del sistema de potencia e impulso del camión minero.....	16
Fig 2-2 Modelo 3D del ensamble de rueda del modelo 980E.....	17
Fig 2-3 Conjunto del cubo y husillo de rueda.....	18
Fig 2-4 Imagen descriptiva de los compartimentos dentro de la rueda delantera.....	18
Fig 2-5 Fotogramas de los discos de la cámara de frenos húmedos	19
Fig 2-6 Fotogramas del accionamiento de la cámara pistón	20
Fig 2-7 Fluidos presentes en dentro de la rueda y Descripción de las pruebas.....	21
Fig 2-8 Máquina de prueba radial y realización de la prueba con ángulo de caída.....	22
Fig 2-9 Máquina de prueba rotatoria.....	23
Fig 2-10 Diagrama de la patente Biaxial Wheel test machine	25
Fig 2-11 Biaxial Wheel test machine: Modelo ZWARP, marca MAKRA	26
Fig 2-12 Modelado 3D del modelo ZWARP.....	27
Fig 2-13 Diagrama sobre tipo de carga aplicada en simulación.....	28
Fig 2-14 Instalación de líneas hidráulicas durante prueba en el banco	29
Fig 2-15 Prueba en el banco mientras el eje del motor conectado produce el giro en el cubo de la rueda (Wheel-Hub).....	29
Fig 2-16 Prueba en el banco mientras se enfoca el panel de control	30
Fig 3-1 Diagrama de caja negra del Sistema automatizado	35
Fig 3-2 Estructura de funciones del dominio mecánico.....	37
Fig 3-3 Estructura de funciones del dominio eléctrico	38
Fig 3-4 Estructura de unciones dominio de control.....	39
Fig 3-5 Concepto de solución 1	46
Fig 3-6 Concepto de Solución 2	48
Fig 3-7 Concepto de solución 3.....	50
Fig 3-8 Tabulación de puntaje obtenido por concepto de solución	54
Fig 3-9 Diagrama de Operaciones	56

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se afirma que la minería es la columna vertebral de la economía en el Perú y no con pocas razones. Esta actividad industrial aporta más del 10% del producto bruto interno peruano, generando también mayores divisas e ingresos fiscales por impuestos, creando empleos directos e indirectos, viéndose esto traducido en el crecimiento potencial de la actividad económica en el país (El Peruano, 2018). Dentro de la actividad minera a tajo abierto, los camiones de carga y transporte de minerales son de crucial importancia debido a que, del desempeño de estas flotas, depende también la productividad de procesamiento de minerales en la mina.

Frente a la necesidad de adquisición y mantenimiento de este tipo de equipos, diferentes empresas de maquinaria pesada se presentan al mercado ofreciendo no solo nuevas alternativas y sistemas de última tecnología, sino también servicios post-venta de equipos usados por las minas que necesitan ser reparados o revisados luego de alcanzar cierto número de horas de trabajo, para garantizar su correcto funcionamiento y prevención de fallas. Así también, el consumo del servicio pos-venta o aftermarket es considerado incluso más estable que la venta de la misma maquinaria en algunos tipos de mercado, según se señala en el reporte “Major Activities of Parts sales expansion”, (Komatsu, 2018).

Una inadecuada gestión del mantenimiento puede generar diferentes tipos de consecuencias, como un elevado número de paradas no programadas de los equipos, disminución de los ingresos, entre otros efectos negativos en la productividad de la flota de camiones o maquinaria (Li, C., 2016).

Dentro de los procesos necesarios para la realización de estos servicios de mantenimiento, se encuentran las pruebas y simulaciones del funcionamiento de componentes reparados, para poder verificar la correcta reparación o mantenimiento realizado. En este contexto, este documento se centra en la investigación sobre las tecnologías disponibles en la prueba dinámica de ruedas y el desarrollo de un concepto de solución para el diseño de una máquina para la simulación del funcionamiento de ruedas delanteras de camiones mineros con capacidad de carga de 300 toneladas.

Por motivos de confidencialidad de la información de la empresa a la cual pertenecen este tipo de maquinarias y el taller en donde se necesita de tal equipo de simulación, no se especificará el modelo del camión minero en cuestión, ni la marca del mismo; más si los requerimientos que fuera prudente precisar.

CAPÍTULO 1

1 MARCO PROBLEMÁTICO

En este capítulo se analizan los aspectos a considerar de la problemática relacionada a la necesidad de implementación del sistema automatizado de simulación para las ruedas delanteras de camiones tolva de los modelos previamente referenciados en la introducción. Además, también se delimitan los objetivos del trabajo y la metodología, así como las características a tener en cuenta en el diseño del sistema para cumplir con las necesidades de los usuarios.

1.1 Problemática

Las pruebas de funcionamiento de los sistemas en maquinaria pesada no siempre fueron tan populares como lo son hoy en día, sin embargo, con el paso de los años los diferentes infortunios y accidentes ocurridos por fallas en sus funcionamientos en diferentes partes del mundo, concluyeron en el desarrollo de pruebas y ensayos para la prevención y estudio del estado de funcionamiento de los componentes a ser utilizados en mina. Y así lo mencionan V. E. Dawson y R. H. Heistad en su publicación “Ten Years Experience with Brake Testing of Large Mining Trucks in British Columbia”, que fue a finales de 1960, donde el número de minas a tajo abierto empezó a elevarse de una manera bastante rápida, y con esto, también el número de equipos de movimiento terrestre. Un efecto del incremento en la cantidad de maquinaria fue también el aumento de los accidentes en estos equipos. Se trató de uno de estos accidentes en 1969, con una falla en el sistema de retardo y posterior fallo del sistema de frenado del camión debido a las altas temperaturas experimentadas durante el frenado, por el cual se estimuló la política de pruebas de frenos en camiones mineros de gran calibre, del cual hasta la fecha de esa publicación ya se habrían llevado a cabo más de 10,000 pruebas en

mina de camiones de transporte de modelos desde 35 a 350 toneladas (Dawnson y Heistad, 1986).

Así, dentro del taller de reparaciones donde se estudió la problemática del trabajo de investigación, se identificó que actualmente, como parte del servicio de reparación de componentes que revolucionan durante su operación, se realizan pruebas de simulación de funcionamiento de estos mismos. De esta manera, se pueden corroborar que estos no presenten deficiencias con respecto al giro u otras características propias de los mismos.

Dentro de los componentes que son probados luego de su reparación en estaciones de simulación de giro, se encuentran los motores eléctricos de tracción, alternadores y transmisiones. Para la realización de estas pruebas, se hace uso de bancos hidráulicos o del Banco de pruebas para Alternadores y Motores de Tracción, desarrollado por la compañía Reman Chile, dependiendo del componente a analizar.

A diferencia de los anteriores componentes mencionados, actualmente en el taller en cuestión, no se cuenta con un procedimiento que permita simular el funcionamiento de las ruedas delanteras de los camiones tolva, sino que solo se realizan pruebas de presión a las cámaras hidráulicas de los componentes, mientras se encuentran estáticos. Los ensambles de rueda delantera son sometidos a diferentes presiones durante un tipo de prueba de estanqueidad para asegurar de que no haya filtraciones (Reman Chile, 2012); sin embargo, esto se da cuando los componentes no se encuentran en revolución, por lo tanto, se puede afirmar que el sistema en análisis no se estaría encontrando en una situación similar a la de funcionamiento durante este tipo de pruebas (se puede encontrar más información sobre las pruebas de estanqueidad en la figura 2-7).

Además, no se han encontrado sistemas estandarizados o patentes en el mercado que den una solución a esta necesidad; ya que, a pesar de ser un sistema que ya ha sido implementado en plantas ensambladores en otros países, estas máquinas han sido fabricadas para uso interno y no han sido expuestas al mercado internacional.

1.1.1 Fugas de aceite y casos de garantía

Durante el segundo semestre del 2019, se registraron un numero inusualmente alto de casos de garantía por fallas en los componentes de la rueda delantera de diferentes camiones, lo que puso en evidencia la necesidad de realizar un proceso de mejora al procedimiento de reparación de este tipo de componentes, con énfasis en el proceso de verificación del correcto funcionamiento del componente ensamblado.

Como se describe en el Anexo 1, se recopiló la información sobre los casos de falla de los componentes durante este periodo, identificándose dos tipos de fallas predominantes: Fuga de aceite y mezcla de aceites. Tomando con más relevancia el análisis de los casos de mayor criticidad según el formato AMFE realizado, se definió como una causa recurrente el daño en los sellos del pistón perteneciente al sistema de frenado. Por consiguiente, se definió como tema a solucionar el de comprobar el correcto funcionamiento del sistema de frenado de los componentes antes de su envío a mina.

1.1.2 Problemática principal por tratar

Tomando en cuenta los procedimientos actuales que se realizan en el taller en mención, los casos de falla de componentes durante el segundo periodo del 2019 y la ausencia de alternativas de solución en el mercado peruano, se define que este trabajo de investigación plantee una solución ante la problemática de la falta de un procedimiento dinámico de

simulación de funcionamiento de giro y frenado de ensambles de ruedas delanteras de camiones tolva eléctricos para minería.

1.2 Propuesta de Solución

La siguiente investigación estará enfocada en el diseño de un sistema mecatrónico que pueda automatizar el proceso de verificación de funcionamiento de giro y frenado de los tipos de rueda previamente mencionados. Este concepto de solución a la problemática no solo colaborará con las mejoras técnicas y con los nuevos requerimientos del proceso, sino también reducirá la dificultad de estas tareas para los operarios a cargo del procedimiento.

1.2.1 Alcance

El alcance de este proyecto mecatrónico plantea el diseño del concepto de solución óptimo de un banco de pruebas para la evaluación del conjunto de rueda delantera de camiones tolva mineros que posean un sistema de frenos húmedos integrado. El proceso que se piensa poner a disposición del personal permitirá generar un reporte final sobre el estado del ensamble giratorio y el estado de funcionamiento de los frenos al final del procedimiento, basado en los protocolos utilizados actualmente en el taller analizado para el estudio, así también como nuevas partes de procedimientos basados en ensayos de funcionamiento en mina previo inicio de uso del componente.

1.3 Objetivos

En esta sección se presentan el objetivo principal y los objetivos específicos de este proyecto de investigación.

1.3.1 Objetivo General

El objetivo principal del presente trabajo es el de realizar un diseño conceptual de un sistema automatizado de prueba para el giro y frenado de ruedas delanteras de camiones mineros eléctricos de 300 toneladas de carga, evaluando tres diferentes conceptos de solución y seleccionando la opción más adecuada.

1.3.2 Objetivos Específicos

Se investigarán los conceptos relacionados al desarrollo de bancos de prueba de componentes de giro y ruedas, así como de sistemas de sensado, simulación de giro y accionamiento de sistemas hidráulicos. Entre los objetivos específicos del trabajo, se tienen:

- Investigar sobre las tecnologías de sensado en bancos de simulación, así como ensayos y pruebas de simulación de funcionamiento de ruedas.
- Definición del mecanismo impulsivo que simulará de mejor manera el avance del camión girando la rueda durante el estudio.
- Identificar las partes del componente a simular que necesitan ser probadas en funcionamiento con prioridad, analizando los casos que se presentaron dentro de la problemática local.
- Identificar los componentes necesarios para el diseño del sistema hidráulico, electrónico y de control, que se encargarán de estudiar el funcionamiento de los frenos.
- Proponer diferentes conceptos de solución para poder resolver la problemática y cumplir con los requerimientos del sistema.
- Evaluar de manera técnica y económica, los conceptos de solución para el desarrollo del sistema.

1.3.3 Identificación de usuarios y grupos de interés

Se espera que el bando de pruebas a diseñar sea adquirido por empresas del rubro de minería que cuenten con talleres para la reparación de maquinaria pesada, como el taller en donde se realizó la investigación donde es actualmente un proyecto requerido por la misma empresa. Asimismo, se esperará que los usuarios finales sean el personal técnico a cargo de las áreas de pruebas en los talleres de reparación, quienes serán los encargados de probar los componentes una vez que estén ensamblados y listos para ser despachados hacia las minas.

1.3.4 Metodología del trabajo a realizar

En la presente sección se explicará la metodología que se plantea utilizar para poder cumplir con los objetivos del proyecto. En este caso, se empleará una metodología de diseño mecatrónico basada en la norma alemana VDI 2221 para el diseño de sistemas técnicos y productos, usando una aproximación general (Pahl G., Beitz W., Feldhusen, J., & Grote, K.H., 2007). Se plantea bajo estas normas un proceso de diseño iterativo separado en siete fases, las cuales tienen como objetivo el de ir definiendo cada vez con más exactitud el diseño de un producto y los parámetros y consideraciones que sean necesarios establecer para la realización y fabricación de este producto o máquina.

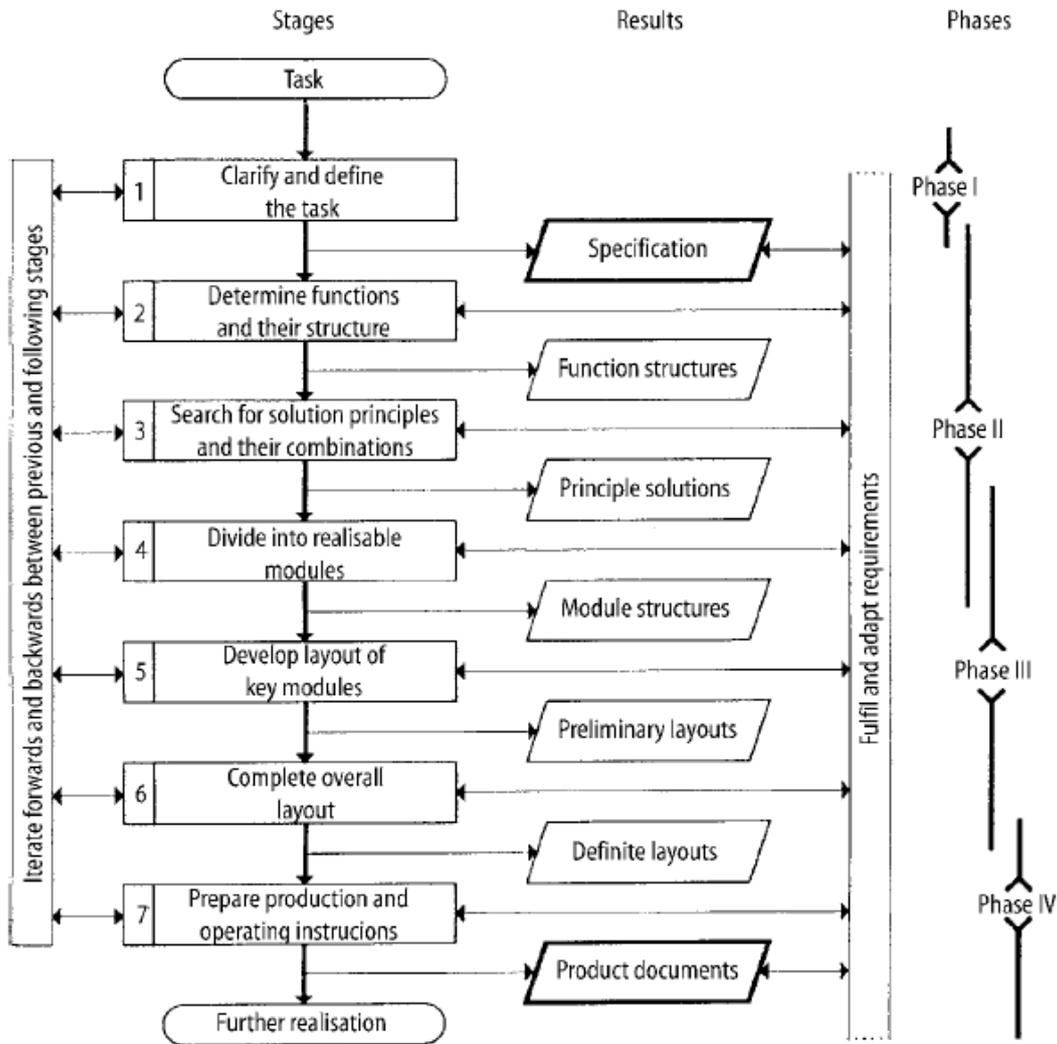


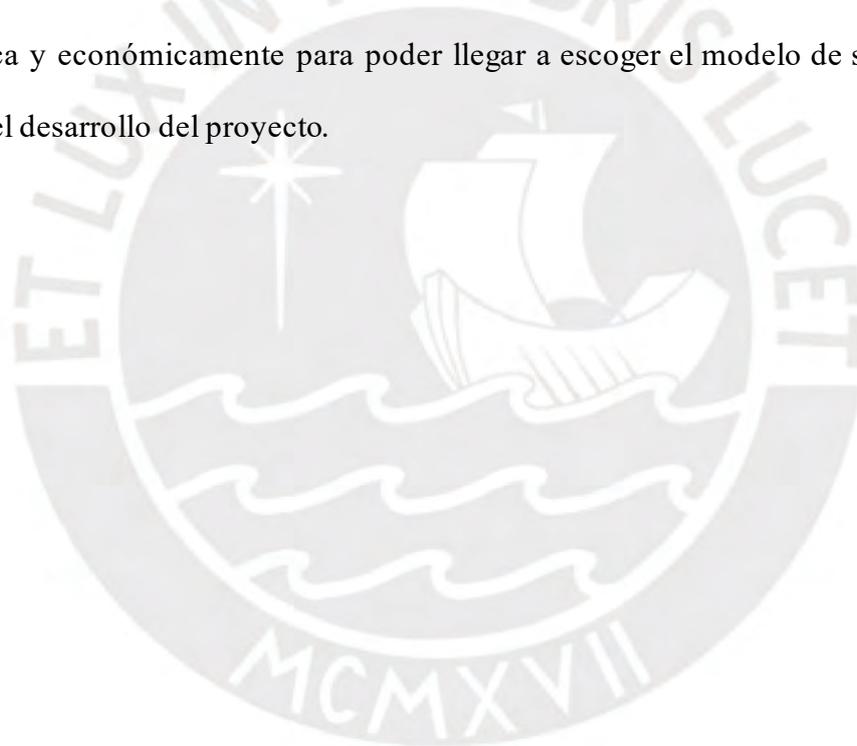
Fig 1-1 Diseño del enfoque general para el diseño acorde al VDI-2221
(Fuente: *Engineering Design, A systematic Approach*, Pahl G., 2007)

Como se muestra en la Figura 1-1, cada fase de la metodología responde a definir y determinar diferentes parámetros para el desarrollo del producto. Así, en el caso de este trabajo de investigación, se abarcarán las tres primeras etapas del método, siendo estas detalladas a continuación:

- **Planeamiento del Producto:** Se define el contexto en donde se desarrollará y la problemática del proyecto, así como el alcance que se busca tener, los objetivos principales y específicos que se plantean y la propuesta de solución del problema.
- **Proyecto Informativo y Desarrollo de estructura de funciones:** Se realiza una investigación sobre las tecnologías actuales relacionadas con las herramientas

necesarias para cumplir con los objetivos del proyecto. Así también, se definen las exigencias del proyecto, para poder seleccionar de forma correcta las funciones y estructura que debe tener la máquina.

- Proyecto Conceptual: Una vez delimitadas las funciones necesarias dentro de la máquina y el flujo de utilización de estas en un diagrama que muestra la estructura de funciones, se buscan alternativas y principios de sistemas que puedan solucionar la problemática planteada, para así poder elaborar una matriz que contenga todas estas opciones de solución: la matriz morfológica, en este caso, separada por dominios mecánico, electrónico y de control. Finalmente, se evalúan las alternativas de solución técnica y económicamente para poder llegar a escoger el modelo de solución ideal para el desarrollo del proyecto.



CAPÍTULO 2

2 ESTADO DEL ARTE

El estado de la tecnología del sistema integrado de prueba de componentes giratorios y funcionamiento de frenos para camiones mineros eléctricos al cual se refiere este documento consta de: información sobre sistemas de análisis y verificación de funcionamiento en sistemas de giro en general, parámetros comunes presentes en este tipo de máquinas, sistema de bancos biaxiales para prueba de ruedas para automóviles, alternativa de diseño para este tipo de máquinas e información sobre el banco de prueba de frenos para ruedas delanteras Komatsu utilizado en la fábrica ensambladora de Chicago, Estados Unidos, además de información sobre el funcionamiento de giro y frenado del ensamble de rueda en cuestión.

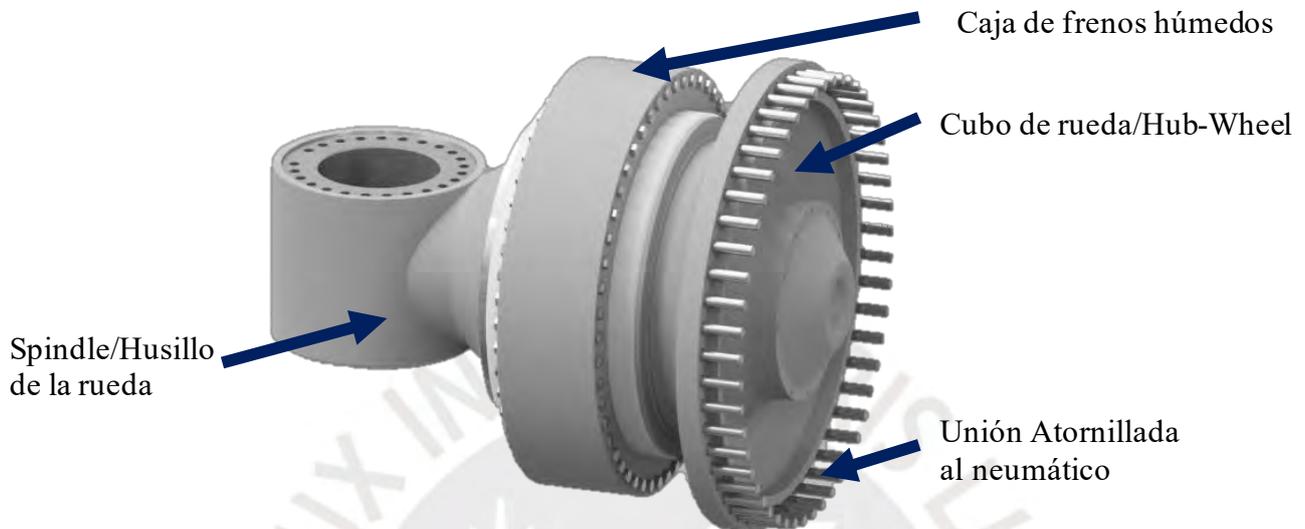
2.1 La rueda delantera del camión eléctrico para minería

Para comprender de mejor manera los siguientes capítulos, no solo los objetivos a alcanzar, sino también los sistemas de solución planteados, se presenta en las siguientes líneas una descripción sobre el funcionamiento de las ruedas delanteras del camión minero de 300 Ton.



*Fig 2-1 2 Diagrama descriptivo del sistema de potencia e impulso del camión minero
(Fuente: Manual del sistema eléctrico de potencia Komatsu 830E-930E)*

Los camiones mineros de este modelo presentan un sistema de tracción trasera, impulsada por dos motores eléctricos que van conectados directamente cada uno a una rueda posterior, restringiendo el giro de estas ruedas para el cambio de dirección del camión.



*Fig 2-2 Modelo 3D del ensamblaje de rueda del modelo 980E
(Fuente: Elaboración propia)*

La rueda y su sistema de giro se conectan al camión a través de la suspensión delantera, por medio del spindle, el cual contiene al eje sobre el cual la rueda y el neumático revolucian para permitir el avance o retroceso del camión. Sobre el spindle, se ubican los rodamientos, los cuales ponen en contacto este componente con el Hub Wheel (pieza que va empernada al aro, neumático y resto de la rueda), el cual gira para transmitir el avance del camión.

Como se muestra en la figura 2-3, este componente posee diferentes conexiones hidráulicas y eléctricas, entre las cuales se encuentran: la entrada aceite de enfriamiento (A), la línea de aplicación de freno(B), la línea de enfriamiento y verificación de desgaste de freno (C), la línea de drenaje de caja de freno (D) y la conexión al sensor de velocidad de la rueda (E), (Komatsu, 2015).

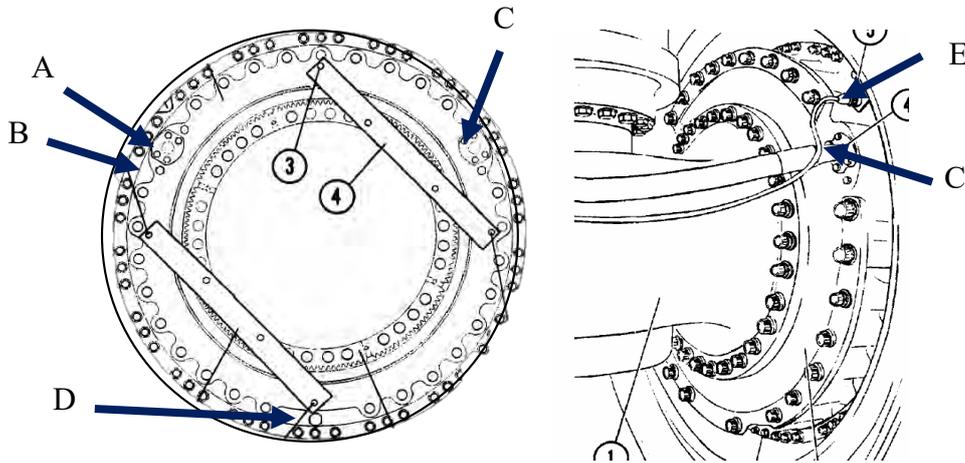


Fig 2-3 Conjunto del cubo y husillo de rueda.
(Fuente: Manual Cubo y Husillo de la rueda delantera Camión Minero 930E-4, 2015).

2.1.1 Cámaras dentro del ensamble de rueda delantera

Dentro del ensamble de rueda, se pueden incluir entre las partes de relevancia a los sellos, los cuales tienen como función conservar la hermeticidad de las cámaras del ensamble con aceite. Se utilizan diferentes compartimientos de aceite y diferentes tipos de fluidos dependiendo de la parte de la rueda. Estos son mostrados a continuación en la Figura 2-4.

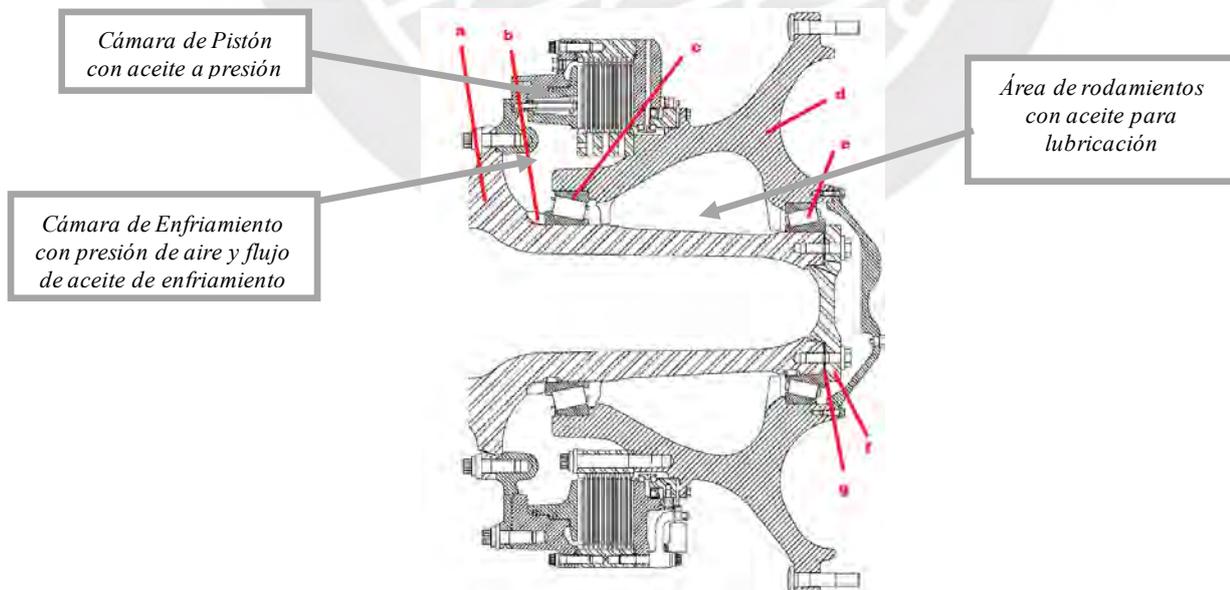


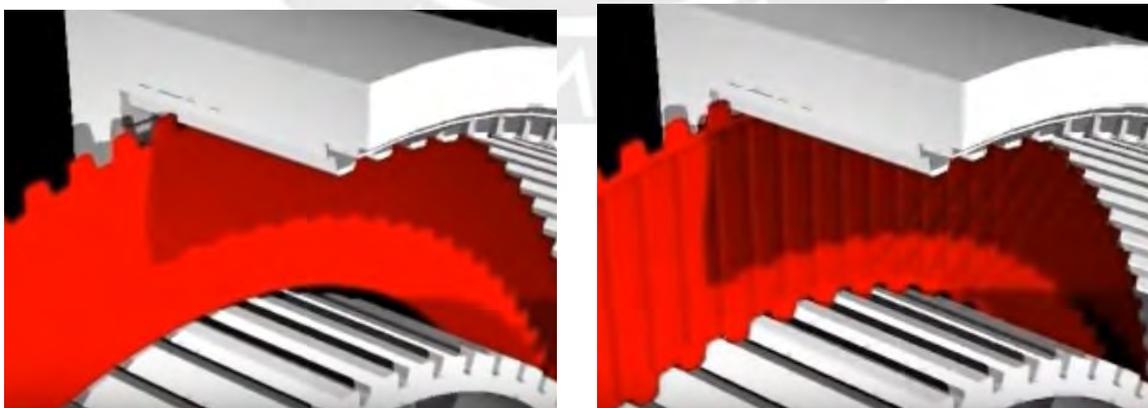
Fig 2-4 Imagen descriptiva de los compartimientos dentro de la rueda delantera.
(Fuente: Hoja de Procedimiento de Desarme Conjunto Masa Camión 960E – Reman Chile, 2012).

2.1.2 Sistema de frenos húmedos en ruedas delanteras

Los sistemas de frenado con discos inmersos en aceite resultan eficaces para este tipo de maquinaria, así como menciona C. Dávila en su informe profesional (2012):

Los frenos delanteros de disco seco y los frenos traseros de discos múltiples CAT, enfriados por aceite, ahora se controlan hidráulicamente, lo que reduce los costos de mantenimiento y mejora el control y modulación del operador. Los frenos proporcionan un frenado excepcional y resistente al desvanecimiento, y retardo para rendimiento y productividad máximos en todas las condiciones de caminos de acarreo (p. 8).

Así, los frenos de la rueda delantera del camión funcionan bajo el sistema de frenos húmedos, sistema que consiste en el uso de una serie de discos de freno inmersos en aceite que, al ser puestos en contacto mediante el movimiento de un pistón hidráulico, obligan al sistema giratorio a detenerse. El aceite utilizado en este entorno –entre los discos- es usado como sistema de enfriamiento, así como de fluido móvil impulsor para la traslación de los discos sobre su eje de revolución para que se pueda establecer fricción entre estos.



*Fig 2-5 Fotogramas de los discos de la cámara de frenos húmedos
(Fuente: Cat® Wet Disk Brakes | How Oil Cooled Hydraulic Brakes Work, Canal: Cat® Products, 2011)*

En la Figura 2-5, se muestran fotogramas en donde se identifican los dos tipos de discos dentro de la cámara de frenado. Uno gira junto con la rueda mientras el otro permanece fijo. Al juntarse, se produce el frenado del camión. Las ranuras ubicadas en los discos tienen como propósito disipar el calor producido por la fricción.

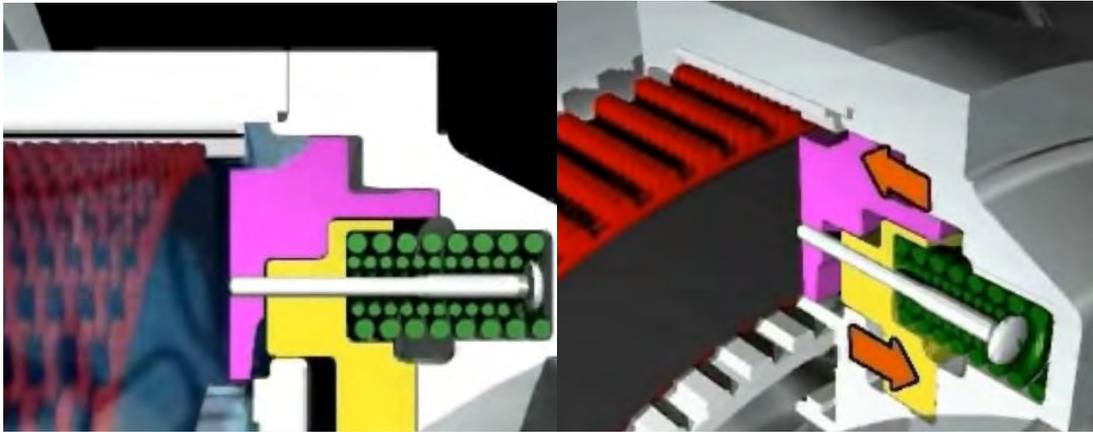


Fig 2-6 Fotogramas del accionamiento de la cámara pistón
(Fuente: Cat® Wet Disk Brakes | How Oil Cooled Hydraulic Brakes Work, Canal: Cat® Products, 2011)

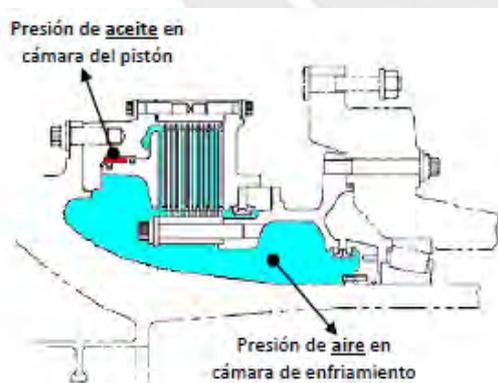
El sobrecalentamiento y elevación de la temperatura dentro de la cámara de frenado por encima de la permitida durante el funcionamiento del camión es una de las posibles causas por las cuales las ruedas delanteras presentan fallas y fugas de aceite en la mina, así como también esto genera el desgaste acelerado de los componentes de soporte, como lo indica Cat® Products: “[...] This friction heats the oil, which lowers the viscosity of the already low viscosity oil, and then leads to accelerated wear in the bearing elements.” [Esta fricción calienta el aceite, lo que reduce la viscosidad del aceite de baja viscosidad, y luego conduce a un desgaste acelerado en los elementos del rodamiento], (Cat® Products, 2011). Este problema se presenta en los frenos cuando el sistema de ventilación y enfriado de la cámara de frenado no funciona de la manera adecuada.

2.2 Procedimientos y Especificaciones en pruebas de ruedas

Debido a que la función del sistema automatizado a diseñar es la de llevar a cabo una prueba de comprobación y calidad de reparación de un componente, en esta sección se estudian los procesos actuales que son llevados a cabo en el sitio de estudio, así como las especificaciones y prácticas determinadas por organizaciones mecánicas ingenieriles en referencia a ensayos parecidos al proceso en estudio.

2.2.1 Pruebas de estanqueidad

Una prueba de estanqueidad consiste en la introducción de un fluido en un compartimiento a determinada presión, para luego monitorear la caída de este valor en un tiempo determinado; esto, con el fin de identificar fugas en los componentes o filtraciones importantes. Este tipo de pruebas es una de las necesarias para llevarse a cabo en las diferentes cámaras del conjunto de rueda. Esto se señala en el procedimiento de desarme de este componente, donde se realizan pruebas de estanqueidad en las cámaras de enfriamiento y de pistón de la rueda. En la figura 2-7, se muestran dichos compartimientos, acompañados de la tabla informativa sobre las pruebas que se realizan en el taller a estos componentes.



Test	Cámara	Presión	Tiempo
1	Pistón	300 psi (2.068 kPa)	20 min
2	Enfriamiento	15 psi (103 kPa)	15 min.

Fig 2-7 Fluidos presentes en dentro de la rueda y Descripción de las pruebas
(Fuente: Hoja de Procedimiento de Desarme Conjunto Masa Camión 960E – Reman Chile, 2012)

No obstante, cabe recalcar que estas presiones son aplicadas al conjunto rueda cuando este se encuentra estático, los frenos no se encuentran en funcionamiento y las temperaturas dentro de la rueda son inferiores a las de funcionamiento.

2.2.2 Especificaciones de Prueba de fatiga de rueda SAE

Dentro del artículo publicado titulado La ciencia y metodología de las especificaciones de la prueba de fatiga en llantas de la SAE, se muestra el desarrollo de dos tipos de procedimientos: la prueba de fatiga radial y la prueba de fatiga rotatoria.

Entre los ejemplos de mecanismos de simulación, se encuentra uno de los primeros modelos llamada máquina de prueba radial, la cual consistía en un tambor externo que permitía la rotación de la rueda de prueba e involucraba el uso del neumático en la rueda. Así es como se simulaba el avance en línea recta. [...] Así también, otro tipo en la que se utilizaba esta misma máquina, consistía en el impulso de giro, pero esta vez con la posición de la rueda inclinada sobre la superficie, para simular el comportamiento durante una curva (Kinstler, 2005). En la figura 2-8 se muestra el uno de los primeros mecanismos de la máquina de prueba radial planteada, así como el funcionamiento de la prueba con ángulo de aplicación.

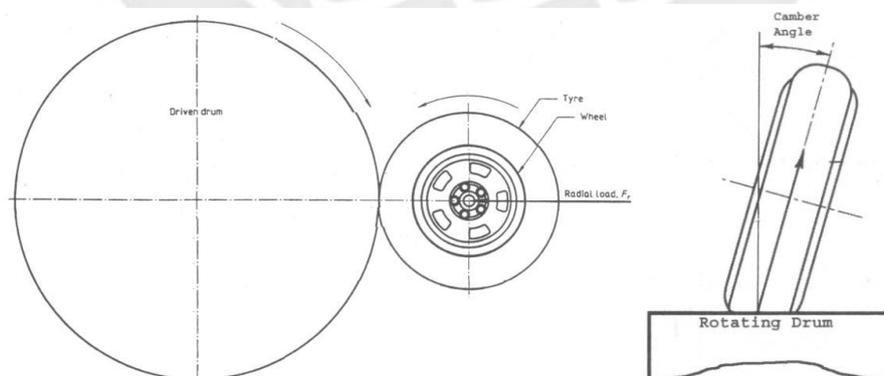


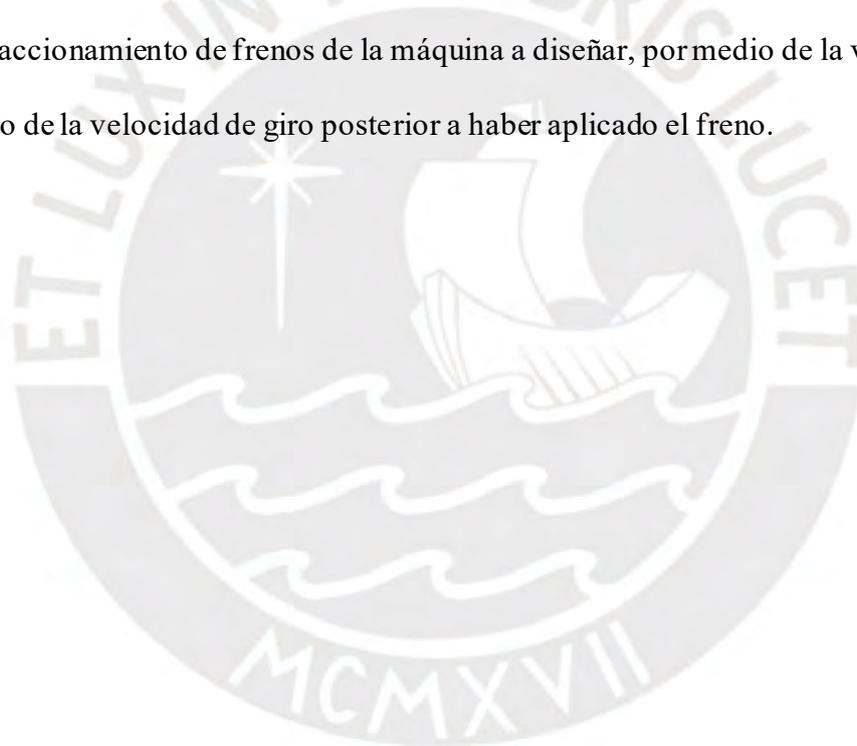
Fig 2-8 Máquina de prueba radial y realización de la prueba con ángulo de caída
(Fuente: Kinstler, J. (2005). *The Science and Methodology of SAE Wheel Fatigue Test Specifications*)

$$BSC = \{[(DR + b) \times MR \times TR] - SR\} \times 100$$

Donde:

DR	Ratio de desaceleración del freno, ratio completa de desarrollo de desaceleración
b	La pendiente donde la maquina está siendo evaluada
MR	Ratio de masa de la maquina acorde al estándar internacional
TR	Ratio del radio del neumático acorde al estándar internacional
SR	Tasa de frenado, de desaceleración deseada (0,06g-0,08g para frenos primarios)

Así, en este caso de estudio, se tomaría el BSC determinado para el modelo (46% acorde a la norma ISO 3450), para poder calcular el ratio de desaceleración del freno (DR) que se necesitaría para cumplir con el BSC ya sabido, comprobando este ratio hallado (DR) durante la prueba de accionamiento de frenos de la máquina a diseñar, por medio de la verificación en el decremento de la velocidad de giro posterior a haber aplicado el freno.



2.3 Estado de Tecnologías

Para poder plantear sistemas que logren simular el funcionamiento de este ensamble, se debe tomar en cuenta modelos de máquinas afines, que permitan identificar las posibles soluciones a las tareas a realizar por el banco de pruebas de rueda delantera. A continuación, se presentan diferentes modelos e información sobre bancos de prueba de funcionamiento de ruedas de otros tipos de vehículos, ya que hasta el momento no se ha realizado una publicación oficial acerca de un banco de pruebas como el que se desea diseñar.

2.3.1 Biaxial Wheel test machine

La máquina (Figura 2-10) con patente WO2001071307A1 muestra un diagrama del diseño de un banco de pruebas biaxial para ruedas de auto para la simulación de esfuerzos dentro de estas durante el giro. Esta máquina incluye un brazo porta rueda el cual también permite girarla y simular el cambio de dirección del automóvil durante su avance para comprobar su correcto funcionamiento y análisis de falla por resistencia. Además, para girar la rueda y así simular el movimiento de esta con respecto al suelo, se hace uso de un tambor giratorio de dimensiones superiores a las de la rueda a probar, el cual es impulsado por un motor para girar, y a su vez, girar la rueda como se muestra en la Figura 2-10. Este tambor aplica sobre la rueda fuerzas laterales normales a la superficie de contacto, así como fuerzas con ángulo de inclinación dependiendo de la orientación del disco de la rueda (Leska et al, 2007).

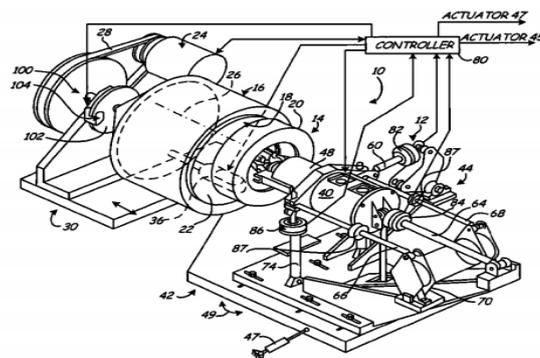


Fig 2-10 Diagrama de la patente Biaxial Wheel test machine
(Fuente: Paul J. Leska, Craig L. Campbell, Erick, W. Young, Bradley C., "Control method for a bi-axial wheel test bench for simulating driving stresses and a bi-axial wheel test bench", 2007)

En la Figura 2-11 se muestra el tambor giratorio de la máquina de pruebas modelo ZWARP, el cual está en contacto con la rueda en evaluación para simular el contacto con el suelo de una rueda en desplazamiento.



*Fig 2-11 Biaxial Wheel test machine: Modelo ZWARP, marca MAKRA
(Fuente: ZWARP - Biaxial wheel test Datasheet, s.f.)*

2.3.2 Modelo ZWARP

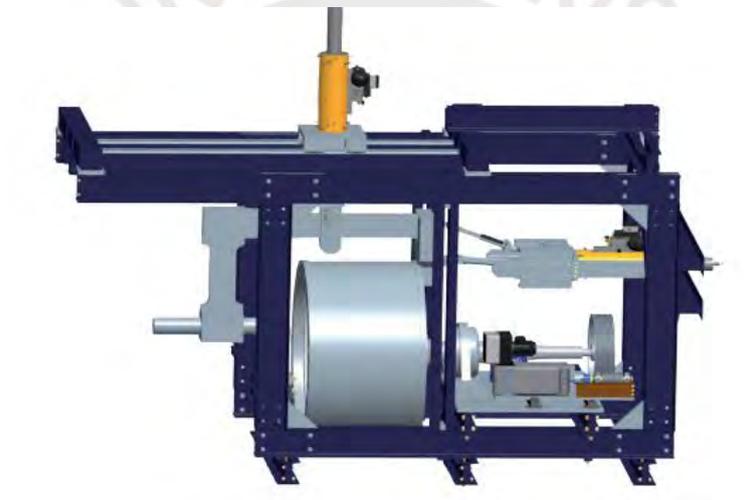
El proceso de prueba en este modelo de sistema es intuitivo y una vez instalada la rueda dentro del banco de pruebas, este generará los ensayos necesarios de manera automática, para luego generar un reporte de las pruebas con resultados sobre esfuerzos producidos, tiempo de testeo, cantidad de carga proporcionada, kilometraje relativo recorrido, entre otros.

De acuerdo al datasheet (hoja de datos), el ángulo máximo de orientación del eje de la rueda con respecto al eje concéntrico con el tambor giratorio, es de 25°, así como la máxima velocidad que se llega a simular en la rueda es de 180km/h.

Cabe resaltar que el objetivo de prueba de este sistema no es el de certificar un correcto ensamble o probar los frenos de las llantas, sino el de comprobar la correcta resistencia mecánica del aro de la rueda de un automóvil frente a los diferentes entornos a los que se pueden ver expuestos. Aun así, se puede rescatar información sobre el sistema impulsivo de rotación del tambor, el cual usa un sistema de reducción por fajas suministrando en el eje

fijado al tambor una potencia de 89kW, así como los sensores que se usan dentro de la máquina para sensado del proceso y seguridad del personal técnico a cargo del ensayo.

Durante el funcionamiento del ensayo, este sistema te permite definir diferentes parámetros a través del interfaz, como la duración del ensayo, la distancia virtual a recorrer, entre otros. Además, el registro del ensayo, permite definir las secuencias de carga sobre el eje de la rueda, así como las diferentes acciones hechas por el operador durante el test, permitiendo al final del proceso, imprimir un documento con toda esta información (Hagenbuch hydraulic Systems, s.f.).



*Fig 2-12 Modelado 3D del modelo ZWARP
(Brochure ZWARP test bench-Hagenbuch hydraulic Systems, s.f.)*

2.3.3 Diseño alternativo de evaluación dinámico de ruedas

En este estudio sobre bancos de prueba para ruedas, se realiza un diseño alternativo para simular el giro de la rueda sobre el pavimento. Para este nuevo diseño planteado, se postula que se puede simular las fuerzas laterales normales al suelo sin necesidad de establecer un contacto con una superficie en revolución -caso que se da en la maquina biaxial de pruebas descrita anteriormente- (Zeljko, S., Dimitrije, K., 2018). El diagrama del diseño descrito en líneas anteriores se muestra en la figura 2-13.

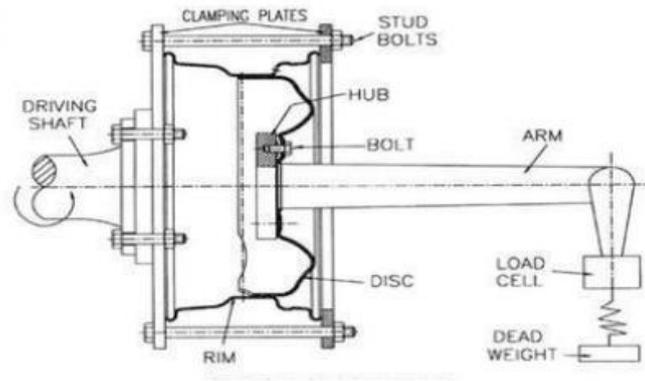


Fig 2-13 Diagrama sobre tipo de carga aplicada en simulación
(Fuente: *An alternative design of testing bench for dynamic wheel cornering fatigue tests*, 2018)

2.3.4 Sistema de emergencia ante valores inusuales de vibración

En el último documento de investigación postulado también se menciona que cuando se aplican soluciones de este tipo, que involucran sistemas influenciados por fuerzas centrífugas, se debe prestar especial atención a los sistemas de seguridad que proveen un paro inmediato del sistema al percibir un incremento pronunciado en las amplitudes de oscilación (Zeljko, S., Dimitrije, K., 2018).

2.3.5 Banco de pruebas de frenos húmedos Komatsu-Estados Unidos

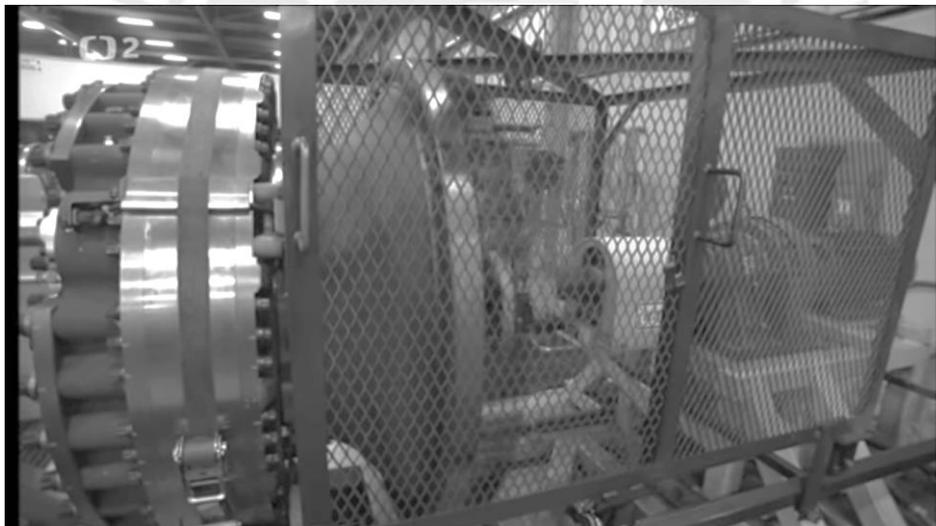
Actualmente, estos sistemas de prueba y simulación de funcionamiento de ruedas para camiones mineros no se encuentran a la venta en el mercado, ni tampoco se les hace referencia en alguna investigación acerca de ruedas mineras. Estos bancos de prueba solo son referenciados como parte del proceso para fabricación de camiones y son incluidos dentro de las características especiales de los camiones Komatsu dentro del criterio de: Operator environment & control.

El banco de pruebas de funcionamiento de frenos y su sistema de ventilación con el cual se cuenta en Komatsu fábrica, funciona acoplando el ensamble completo de rueda delantera de camión a un eje impulsado por un motor de caja de ardilla, mientras los frenos son conectados a una línea de aceite para poder manipular la presión dentro de ellos y así simular

la activación de los frenos. A continuación, se muestran imágenes del banco de pruebas con el que se cuenta en la fábrica ubicada en Estados Unidos.



*Fig 2-14 Instalación de líneas hidráulicas durante prueba en el banco
(Fuente: Documental Camiones Komatsu 2015- <https://www.youtube.com/watch?v=0N5NX8GeBL0>)*



*Fig 2-15 Prueba en el banco mientras el eje del motor conectado produce el giro en el cubo de la rueda (Wheel-Hub)
(Fuente: Documental Camiones Komatsu 2015- <https://www.youtube.com/watch?v=0N5NX8GeBL0>)*

Durante este proceso, se lleva a la rueda a diferentes velocidades rotacionales, para luego probar los frenos y con estos, el sistema de enfriamiento, ya que la falla de este sistema ventilación es una de las causas más usuales de falla en las ruedas delanteras.

Para poder realizar este procedimiento, se hace uso de un sistema hidráulico, electro mecánico, que permita controlar tanto las presiones en los frenos húmedos, así como el torque y velocidad en el motor, para así verificar la funcionalidad de los frenos. Asimismo, en este sistema se mide la temperatura en zonas determinadas para determinar si existe sobre calentamiento en la zona de los frenos.



Fig 2-16 Prueba en el banco mientras se enfoca el panel de control
(Fuente: Documental Camiones Komatsu 2015- <https://www.youtube.com/watch?v=0N5NX8GeBL0>)

MCMXVII

CAPÍTULO 3

3 DISEÑO DEL CONCEPTO DE SOLUCIÓN

En el presente capítulo se presentarán los conceptos de solución ideados como alternativas tentativas para cumplir con los objetivos planteados para la máquina en cuestión en base a la información recolectada de documentos técnicos, científicos, recomendaciones por correo y comentarios del taller, se definen los requerimientos a cumplir por el sistema mecatrónico a diseñar.

3.1 Lista de requerimientos del sistema

Para poder asegurar el correcto diseño que podrá satisfacer las necesidades planteadas previamente en los objetivos del proyecto, se definen las exigencias y deseos para el sistema mecatrónico a diseñar, así como la función principal de este mismo.

3.1.1 Función Principal

Como función principal del proyecto se define el de elaborar un análisis del funcionamiento del componente reparado, verificando el correcto estado del sistema giratorio y del sistema de frenado del componente a analizar.

3.1.2 Exigencias y Deseos

Se plantea una lista de exigencias y deseos, como resultado del proceso de especificación de diseño señalado en el libro *Engineering Design*, en donde se responden diferentes interrogantes como: cuales son los objetivos esperados a satisfacer, que propiedades debe tener la solución y que propiedades debe ignorar (Pahl, G., 2007, p.146).

Dentro de los requerimientos del sistema se tomará en cuenta que el área ocupada por el banco de pruebas no deberá exceder los 16 metros cuadrados, teniendo este espacio 4 metros como medida máxima admisible por lado. Así también, la altura se verá restringida, teniendo

como tope los 2,5 metros, para así no restringir el giro del puente grúa en donde será ubicada la máquina a diseñar.

Tabla 3-1 Lista de Exigencias y Deseos
(Fuente: Elaboración propia)

LISTA DE EXIGENCIAS	
Proyecto	Banco de pruebas para el giro y frenado de rueda delantera de camión eléctrico de 300 toneladas de carga para minería
Deseo o Exigencia	Descripción
E	Función principal: Realizar un análisis del funcionamiento del componente reparado, verificando el correcto estado del sistema giratorio y del sistema de frenado.
E	Geometría: El sistema contará con unas dimensiones máximas de 4 x 4 metros de área con 2,5 metros de altura.
E	Geometría: El sistema contará con una zona donde se ubicará y probará el funcionamiento del componente a analizar.
E	Geometría: Contará con un sistema que permita realizar el ensayo con los dos modelos designados (y dimensiones) de ruedas a analizar.
E	Cinemática: El sistema accionará un eje al cual estará ensamblada la parte giratoria de la rueda a probar.
E	Cinemática: El sistema controlará la velocidad rotacional del componente durante la prueba vibracional.
E	Cinemática: El sistema accionará y controlará los frenos de la rueda delantera durante la prueba, mediante la aplicación de presión dentro de la cámara de aceite del pistón.
E	Cinemática: El sistema podrá parar el giro cuando se necesite una parada de emergencia, incluso estando sin energía.
D	Cinemática: El sistema de graduación de altura del eje impulsor al componente será automático, una vez se haya ubicado este en una posición definida.
E	Energía: Será alimentado con corriente alterna trifásica de 380V.
E	Seguridad: El sistema a diseñar deberá contar con guardas diseñadas especialmente para esta máquina, para prevenir el contacto entre el operario y los sólidos en revolución durante la prueba.
D	Seguridad: El banco de pruebas no presentará ningún elemento que pueda contaminar su área de uso.

Deseo o Exigencia	Descripción
E	Control: El sistema de control deberá controlar las variables de velocidad del motor y presión en la cámara del pistón.
E	Señales: El sistema deberá sensar la temperatura de la cámara de enfriamiento.
E	Señales: El sistema deberá sensar las presiones en los diferentes compartimientos del ensamble.
E	Señales: El sistema deberá recibir datos sobre el movimiento y la velocidad de giro de la rueda durante la prueba.
D	Software: El sistema deberá analizará estos datos y formulará un reporte de la prueba, el cual será proporcionado al operario de la máquina una vez se haya terminado el proceso.
E	Software: El sistema tendrá un interfaz para interactuar con el técnico a cargo de la prueba
D	Software: El tablero en cuestión deberá también mostrar los datos de las variables controladas y las censadas.

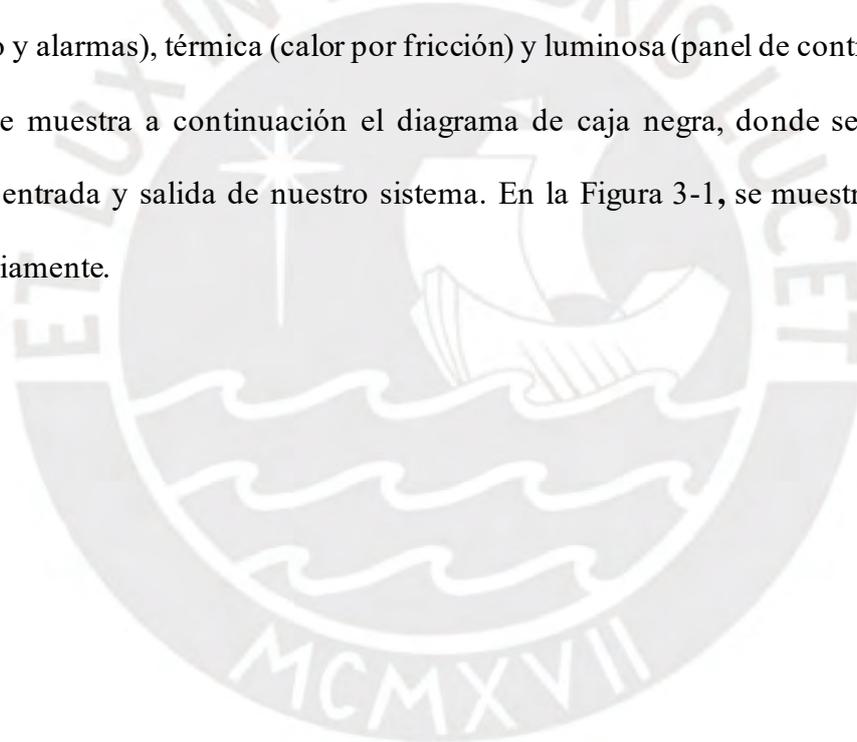
3.2 Black Box General (Diagrama de caja Negra)

El sistema propuesto elabora un reporte del funcionamiento del componente reparado (la rueda delantera de los camiones), verificando el correcto estado del sistema giratorio y del sistema de frenado, emitiendo un reporte final del estado del sistema.

Este centro de simulación se deberá energizar con corriente eléctrica trifásica de 380V. Además, este recibirá también energía hidráulica para poder operar de manera correcta los sistemas de control de presión para los sistemas de esta naturaleza dentro del conjunto de rueda delantera. Asimismo, al sistema ingresará el componente a evaluar, aparte de fluidos como aceites para la cámara pistón y la cámara de enfriamiento, los cuales serán controlados para la realización de la prueba. Dentro de los parámetros de entrada para el proceso, se encuentran las señales de Inicio, Activación de Energización, Modelo de rueda, Inicio de

prueba de frenos húmedos, Inicio de pruebas de vibraciones y Generar Reporte. El sistema contará también con una señal de entrada que indique una emergencia, la cual se traducirá en el bloqueo de giro de la máquina, así como la desenergización de los sistemas hidráulicos.

Entre las señales de salida, se encuentran las que muestran el estado del proceso, el indicador de máquina energizada, el indicador de instalación mecánica incorrecta y las señales de finalización de procesos. Como resultado de la prueba, se espera obtener al mismo ensamble de rueda evaluado, el informe de evaluación y residuos de fluidos como parte del aceite usado en la prueba. Se conoce también que esta operación disipará durante su realización energía sonora (ruido y alarmas), térmica (calor por fricción) y luminosa (panel de control y señales de salida). Se muestra a continuación el diagrama de caja negra, donde se muestran las variables de entrada y salida de nuestro sistema. En la Figura 3-1, se muestra el diagrama descrito previamente.



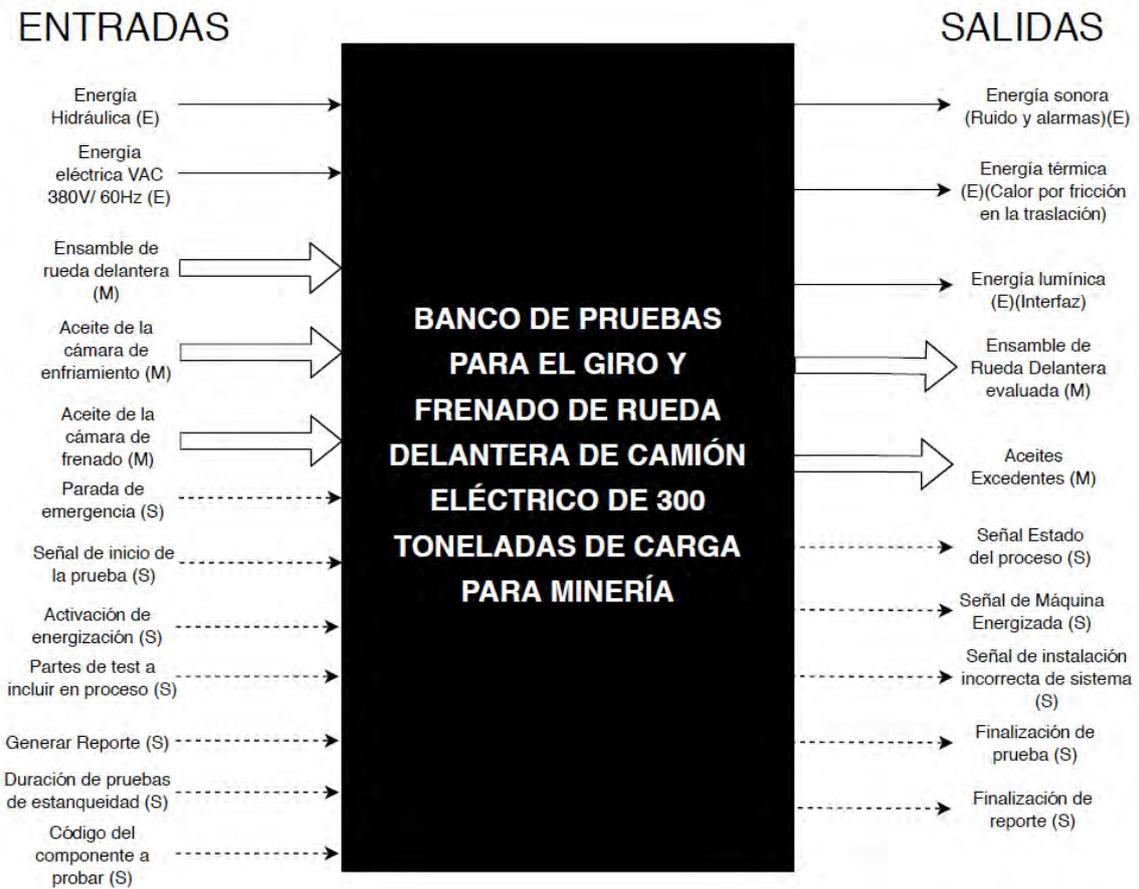


Fig 3-1 Diagrama de caja negra del Sistema automatizado
(Fuente: Elaboración propia)

3.3 Estructura de funciones

La estructura de funciones general es la conexión de señales, materia y energía entre la entrada y la salida de la caja negra del sistema. En este caso se ha determinado los subsistemas de dominio mecánico, dominio electrónico y dominio de control.

Tabla 3-2 Índice de Estructura de Funciones
(Fuente: Elaboración propia)

	Materia
	
	Energía
	Señal

3.3.1 Dominio Mecánico-Hidráulico

Este dominio incluye los mecanismos que permiten el movimiento y fijación del componente a evaluar. Así también, este comprende los sistemas a utilizar para garantizar la seguridad del usuario al momento de trabajar con los componentes durante el giro y la protección de componentes electrónicos de las condiciones de trabajo. Por último, también están incluidos los sistemas hidráulicos para el funcionamiento de la cámara de frenado (pistón) y la cámara de refrigeración (enfriamiento).

3.3.2 Lista de funciones del dominio mecánico-hidráulico

Entre las funciones dentro de este subsistema se encuentran:

- Aislar el entorno de giro del componente
- Modular altura relativa del eje impulsor
- Conectar el eje impulsor con el Hub-Wheel
- Reducir la velocidad de revolución del eje impulsor
- Regular la velocidad de revolución del motor
- Realizar movimiento de giro del eje impulsor
- Regular la presión de aceite de la cámara pistón
- Sistema de filtrado/limpieza de aceite luego de su uso en el proceso
- Sistema de reserva de aceite
- Conexiones hidráulicas

Como el sistema automatizado no incluirá dentro de su alcance una de las pruebas de estanqueidad en la que se requiere una presión de aire determinada en la cámara de enfriamiento, no se incluye entre las funciones de este dominio a los subsistemas neumáticos necesarios para esta tarea.

3.3.3 Estructura de Funciones del dominio mecánico-hidráulico

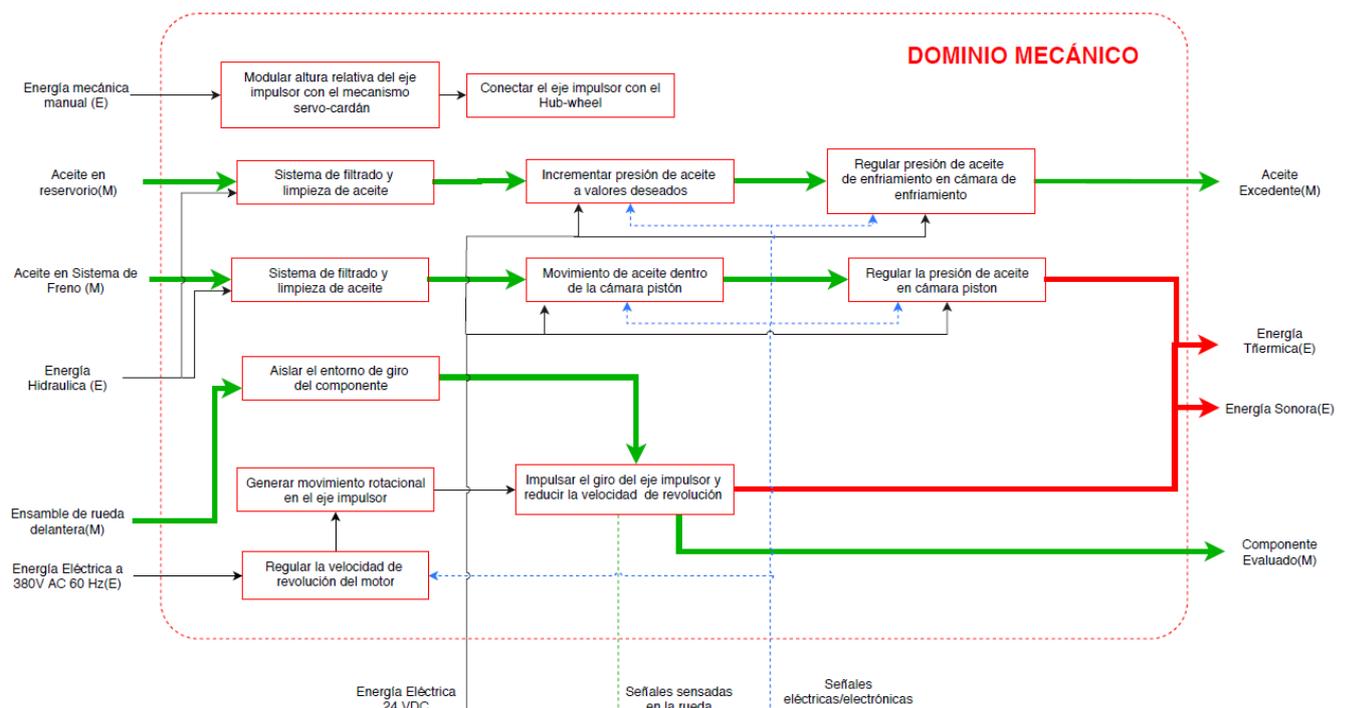


Fig 3-2 Estructura de funciones del dominio mecánico
(Fuente: Elaboración propia)

3.3.4 Dominio Eléctrico/Electrónico

Este grupo de funciones contemplan los sistemas de acondicionamiento de energía eléctrica para los diferentes dispositivos, sensores y actuadores del sistema automatizado, así como los mismos dispositivos electrónicos para estas funciones. La energía proporcionada por la línea de corriente es acondicionada a determinados voltajes a corriente continua para permitir el funcionamiento de diferentes dispositivos electrónicos, mientras que el flujo de información es emitido desde los sensores hacia el sistema de control y del sistema de control hacia los actuadores del sistema.

3.3.5 Lista de funciones del dominio Eléctrico/Electrónico

Entre las funciones dentro de este subsistema se encuentran:

- Acondicionar energía al sistema completo (AC/DC) //Energizar componentes
- Acondicionar energía al sistema de interacción con el usuario y el de control
- Acondicionar energía a los sensores (DC/DC)
- Sensar vibraciones axiales y radiales
- Sensar velocidad rotacional del Hub-Wheel
- Sensar temperatura en cámara de enfriamiento
- Sensar presión del aceite de cámara pistón
- Recepción de parámetros de trabajo
- Indicar estado de funcionamiento e información del proceso
- Definir la presión de trabajo
- Modular valor de presión en cámara pistón
- Señalizar Emergencia

3.3.6 Estructura de Funciones del dominio eléctrico/electrónico

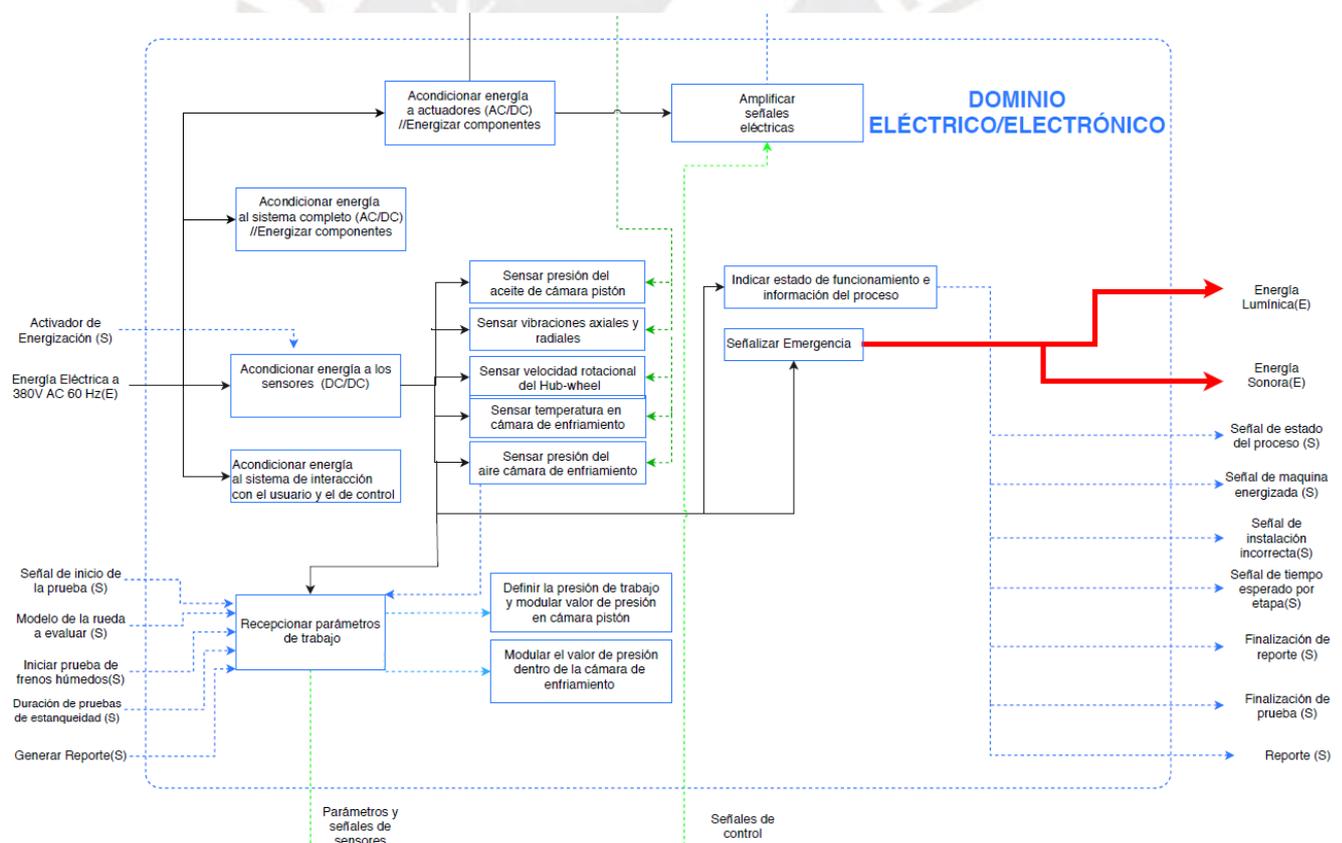


Fig 3-3 Estructura de funciones del dominio eléctrico
(Fuente: Elaboración propia)

3.3.7 Dominio de Control

El dominio en mención tiene como funciones las de energizar al sistema mecatrónico para su correcto funcionamiento. Asimismo, se encargará de la recepción de las señales de entrada brindadas por el usuario encargado del proceso y de la comunicación entre el dominio mecánico-hidráulico y el de control.

3.3.8 Lista de funciones del dominio de control

Entre las funciones dentro de este subsistema se encuentran:

- Procesamiento de datos
- Generación de acciones control

3.3.9 Estructura de funciones del dominio de control



Fig 3-4 Estructura de funciones dominio de control
(Fuente: Elaboración propia)

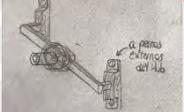
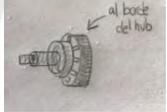
3.4 Matriz Morfológica

Dentro de la tercera etapa de la metodología de diseño precisada por la VDI 2221, se definen los diferentes principios de solución para las funciones listadas anteriormente, pertenecientes a los dominios del sistema automatizado. Luego de determinar las opciones disponibles para estas funciones, estas se combinan de manera que se definen conceptos de solución diferentes para que pueda ser escogido de entre estos el que cumpla de mejor manera con los requerimientos definidos. En las tablas 3-3, 3-4 y 3-4 se representan los tres conceptos de solución mediante el uso de flechas de tres diferentes colores.

3.4.1 Matriz del Dominio Mecánico

La matriz de dominio mecánico incluye funciones que son necesarias tanto para el accionamiento dinámico de la rueda al momento de la rotación inducida por la máquina, así como las funciones necesarias para poner en funcionamiento los sistemas hidráulicos del conjunto de rueda, como son el sistema de frenado y refrigeración de los discos de freno.

Tabla 3-3: Conceptos de Solución del sistema Mecánico
(Fuente: Elaboración Propia)

Subsistema	Función Principal	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Dominio Mecánico	Aislar el entorno de giro del componente	 Caja-reja desplegable en sentido de eje	 Cabinas semi herméticas	
Dominio Mecánico	Modular altura relativa del eje impulsor	 Mesa hidráulica	 Uso de cardán para acople a diferentes alturas del eje impulsor	 Mesa gradual con tornillo sin fin
Dominio Mecánico	Conectar el eje impulsor con el Hub-wheel	 Conexión atornillada a la tapa del Hub	 Conexión atornillada a pernos externos del Hub	 Rozamiento con superficie externa
Dominio Mecánico	Impulsar el giro y reducir la velocidad de revolución del eje impulsor	 Cyclo-Reductor coaxial	 Reductor de ejes paralelos	 Reductor de sin fin
Dominio Mecánico	Regular la velocidad de revolución del motor	 Motor AC Asíncrono trifásico	 Motor AC Síncrono trifásico	 Motor DC Síncrono

Subsistema	Función Principal	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3
Dominio Mecánico	Realizar movimiento de giro del eje impulsor	 Variador de frecuencia		
Dominio Mecánico	Regular la presión de aceite de la cámara pistón	 Válvula PDM, PDMP	 Válvula VDM	 Válvula CDK
Dominio Mecánico	Incrementar la presión de aceite a valores deseados para su regulación	 Bomba centrífuga de aceite	 Bomba eléctrica de aceite de membrana	 Bomba axial de pistón
Dominio Mecánico	Sistema de filtrado/limpieza de aceite luego de su uso en el proceso	 Filtros en línea del proceso	 Carro de filtración de aceite externo	 Filtros bypass
Dominio Mecánico	Sistema de reserva de aceite	 Tanque reservorio hidráulico		
Dominio Mecánico	Conexiones Hidráulicas	 Mangueras hidráulicas	 Tuberías hidráulicas	

3.4.2 Matriz del Dominio Eléctrico/Electrónico

La matriz de domino eléctrico, contiene a los dispositivos necesarios para la energización, sensado y operación de la máquina. A continuación, se muestran las combinaciones para los tres conceptos de solución a evaluar.

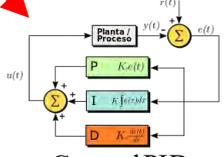
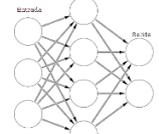
Tabla 3-4 Matriz morfológica del dominio eléctrico
Fuente: Elaboración propia

Sub-sistema	Función Principal	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3
Dominio Eléctrico	Acondicionar energía al sistema completo (AC/DC) //Energizar componentes	 Fuente switching	 Baterías	
Dominio Eléctrico	Sensar vibraciones axiales y radiales	 Acelerómetro biaxial	 Strain gauge	 Sensor capacitivo de desplazamiento
Dominio Eléctrico	Sensar velocidad rotacional del Hub-Wheel	 Hall Effect Sensor con rueda dentada	 Sensor inductivo con rueda dentada	NO REQUIERE (datos del variador de frecuencia y del sensor de la rueda incorporado)
Dominio Eléctrico	Sensar temperatura en cámara de enfriamiento	 Sensor de temperatura de aceite	 Termistor industrial	 Termopar
Dominio Eléctrico	Sensar presión del aceite de cámara pistón	 Sensor de presión diferencial	 Transductor de presión	 Manómetro con salida digital
Dominio Eléctrico	Recepcionar parámetros de trabajo	 Tablero de control	 HMI	 Computadora

Dominio Eléctrico	Función Principal	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3
Dominio Eléctrico	Indicar estado de funcionamiento e información del proceso	 HMI	 Pilot lights(LED's)	 Pantalla LCD
Dominio Eléctrico	Definir la presión de trabajo	 Perilla conectada a potenciómetro	Control automático predeterminado (Controlado por proceso elegido y modelo de componente)	 HMI
Dominio Eléctrico	Modular valor de presión en cámara pistón	 Perilla conectada a potenciómetro	Control automático predeterminado (Controlado por proceso elegido y modelo de componente)	 HMI
Dominio Eléctrico	Señalizar Emergencia	 Led de alarma	 Sirena	

3.4.3 Matriz del dominio de Control

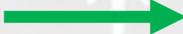
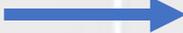
Tabla 3-5 Matriz morfológica Dominio de control (Fuente: Elaboración propia)

Subsistema	Función Principal	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3
Dominio de Control	Procesamiento de datos	 PLC	 Raspberry Pi3	 MyRIO
Dominio de Control	Generación de acciones control	 Modelo de control lineal predictivo	 Control PID	 Redes neuronales

3.5 Conceptos de Solución

Para lograr encontrar una solución óptima del sistema mecatrónico a diseñar, se combinaron los diferentes dispositivos considerados en la matriz morfológica para poder obtener tres alternativas diferentes para el diseño. Así, los dispositivos que se encuentran dentro del flujo de la línea roja, representarán la opción de solución número 1. Posteriormente, las opciones de componentes dentro del flujo de las líneas anaranjado y azul representarán las opciones de solución 2 y 3 respectivamente. A continuación, se describirán cada una de las opciones con más detalle.

*Tabla 3-6 Leyenda de Conceptos de Solución
(Fuente: Elaboración Propia)*

Línea indicadora	Concepto de Solución
	Concepto de solución 1
	Concepto de solución 2
	Concepto de solución 3

3.5.1 Concepto de Solución No-1

En el primer concepto de solución se plantea el uso de una base gradual no automática, en donde se podrá definir la altura de la base, dependiendo del modelo de componente que se desee evaluar. Esto se lograría con posiciones determinadas al momento de diseñar la base. Como este sistema no sería tan preciso, se complementaría con un sistema de regulación fina de la altura relativa del motor con respecto a la masa giratoria, haciendo uso de servos y tornillos sin fin, para lograr el movimiento exacto necesario. La pieza de sujeción estará fijada a los orificios externos del cubo rueda, necesitando así menos torque impulsivo del motor-reductor coaxial escogido. Este sistema dinámico será cubierto por una reja desplegable hacia la dirección del eje de la rueda delantera.

Dentro de los dispositivos de sensado, se seleccionaron manómetros con salida de señal con valor digital, para el registro de las presiones en la cámara pistón, así como del aire en la cámara de enfriamiento. Para la prueba de vibraciones se seleccionó el acelerómetro biaxial y en este caso para determinar la frecuencia rotacional se utilizará los datos indicados en el variador de frecuencia.

Para el sistema hidráulico, se plantea usar un reservorio para el aceite, el cual será extraído por medio de una bomba eléctrica de aceite tipo membrana, para pasar por una válvula VDM para regular la presión, así como los filtros que serán ubicados al final de la línea del proceso. Para todas las opciones de solución, se consideran las válvulas de alivio entre otros accesorios necesarios para todos los sistemas hidráulicos. Para el sistema neumático, se planea usar un compresor de aire de pequeñas dimensiones, junto con una válvula proporcional eléctrica como componentes más importantes dentro de la línea de aire. Para el sistema de control se estaría considerando el uso de un PLC, junto con un algoritmo de control PID para la regulación de los valores a controlar en la planta. Diagrama expuesto en la figura 3-5.

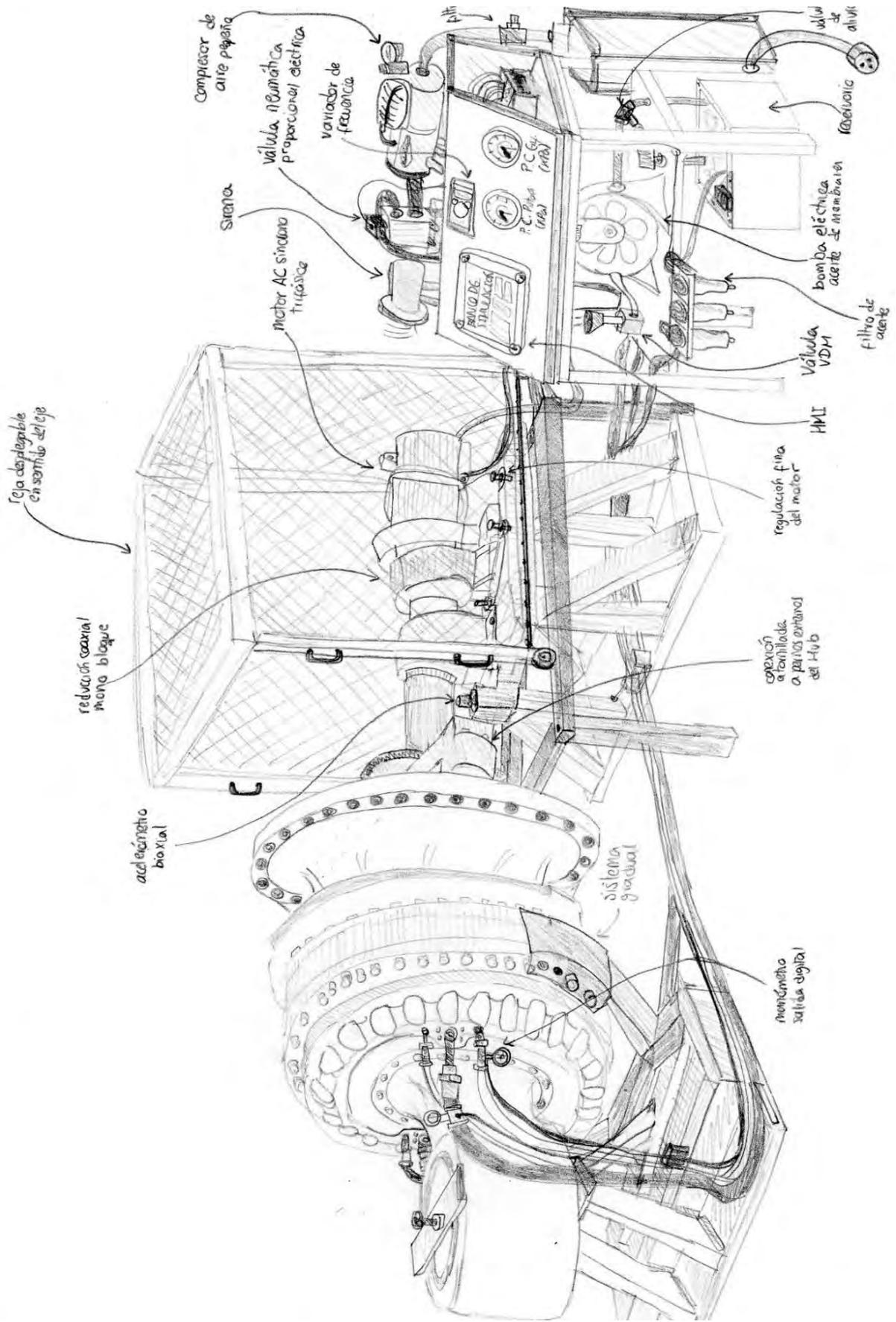


Fig 3-5 Concepto de solución 1
(Fuente: Elaboración propia)

3.5.2 Concepto de Solución No-2

Para la segunda alternativa de solución, se propone utilizar una mesa graduada por un tornillo sin fin que mueve a todo el componente antes de empezar el ensayo. Para el accionamiento del giro se moverá el cubo rueda con una conexión atornillada a los orificios centrales de la tapa del cubo, que a su vez estará impulsada por un motorreductor de ejes paralelos conectados a un motor AC asíncrono trifásico. Se plantea el uso de una cabina semi hermética para aislar al componente de los usuarios durante el giro.

Dentro de los dispositivos de sensado, se seleccionaron un transductor de presión y uno de control diferencial conectados con salidas de señal con un valor digital, para el registro de las presiones en la cámara pistón, así como del aire en la cámara de enfriamiento respectivamente. Para la prueba de vibraciones se seleccionó un strain gauge y en este caso para determinar la frecuencia rotacional se utilizará un sensor inductivo, el cual necesita de una rueda dentada fija al eje rotatorio para poder registrar las RPMs.

Para el sistema hidráulico, se plantea usar un reservorio para el aceite, el cual será extraído por medio de una bomba eléctrica de aceite, para pasar por una válvula de presión para regular la presión, así como los filtros que serán ubicados al final de la línea del proceso. Para todas las opciones de solución, se consideran las válvulas de alivio entre otros accesorios necesarios para todos los sistemas hidráulicos. Para el sistema neumático, se planea usar un compresor de aire de pequeñas dimensiones, junto con una válvula proporcional eléctrica como componentes más importantes dentro de la línea de aire. Para el sistema de control se estaría considerando el uso de un PLC, junto con un algoritmo de control lineal predictivo para la regulación de los valores a controlar en la planta. Diagrama expuesto en la figura 3-6.

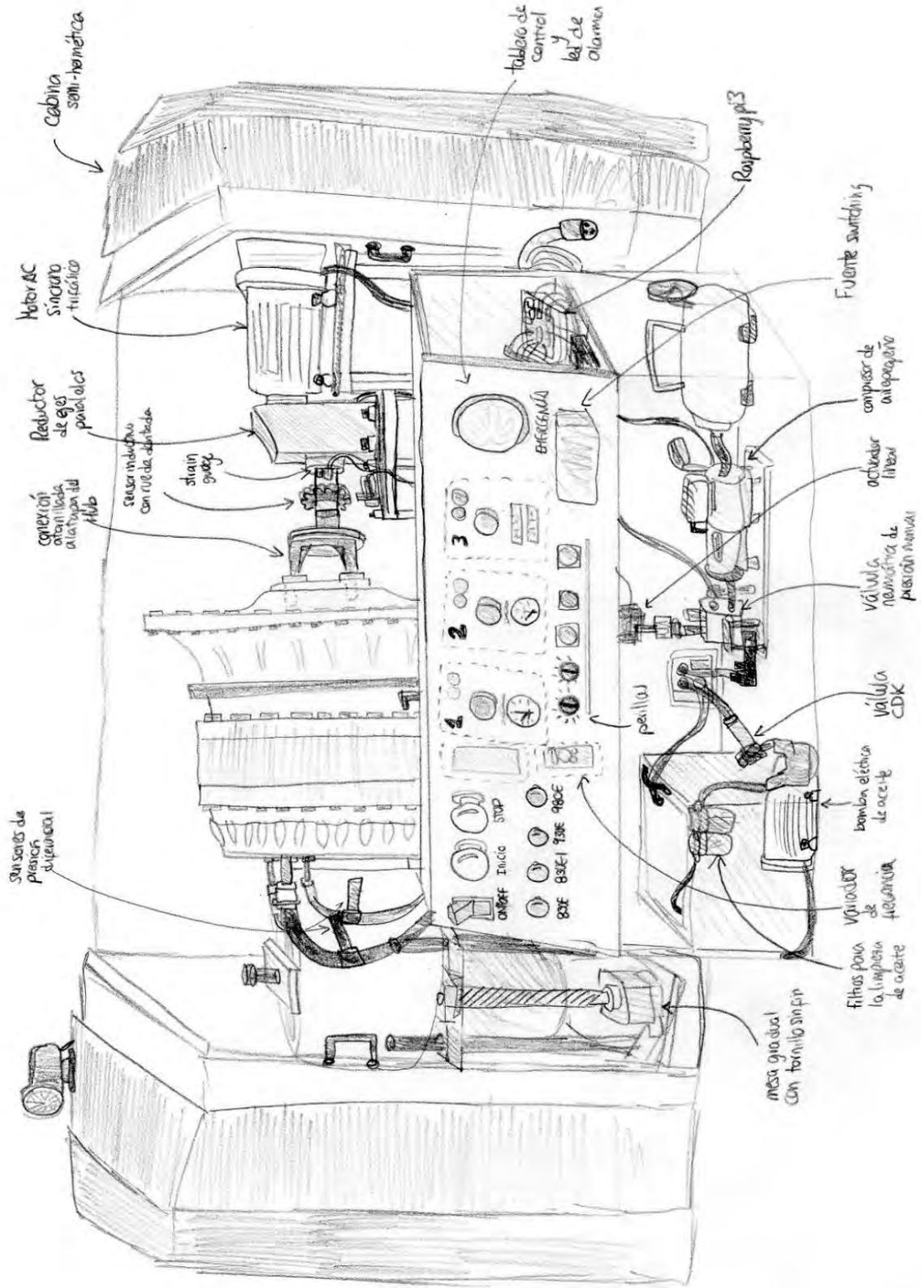


Fig 3-6 Concepto de Solución 2
(Fuente: Elaboración propia)

3.5.3 Concepto de Solución No-3

Como tercera alternativa de solución, se propone utilizar una mesa graduada por medio de actuadores hidráulicos de la mesa sin fin que mueve a todo el componente antes de empezar el ensayo. Para el accionamiento del giro se moverá el cubo rueda con una conexión atornillada a los orificios centrales de la tapa del cubo, que a su vez estará impulsada por un motor reductor con tornillo sin fin a un motor AC asíncrono trifásico. Se plantea ubicar pequeñas guardas para cuando este encendido.

Dentro de los dispositivos de sensado, se seleccionaron un transductor de presión y uno de control diferencial conectados con salidas de señal con valor digital, para el registro de las presiones en la cámara pistón, así como del aire en la cámara de enfriamiento. Para la prueba de vibraciones se seleccionó un hall effect sensor con rueda dentada para poder realizar un seguimiento a las RPM.

Para el sistema hidráulico, se plantea usar un reservorio para el aceite, el cual será extraído por medio de una bomba eléctrica de aceite, para pasar por una válvula eléctrica para regular la presión, así como los filtros que serán ubicados al final de la línea del proceso. Para todas las opciones de solución, se consideran las válvulas de alivio entre otros accesorios necesarios para todos los sistemas hidráulicos. Para el sistema neumático, se planea usar un compresor de aire de pequeñas dimensiones, junto con una válvula proporcional eléctrica como componentes más importantes dentro de la línea de aire. Para el sistema de control se estaría considerando el uso de un My Rio, junto con un algoritmo de control lineal predictivo para la regulación de los valores a controlar en la planta. Diagrama expuesto en la figura 3-7.

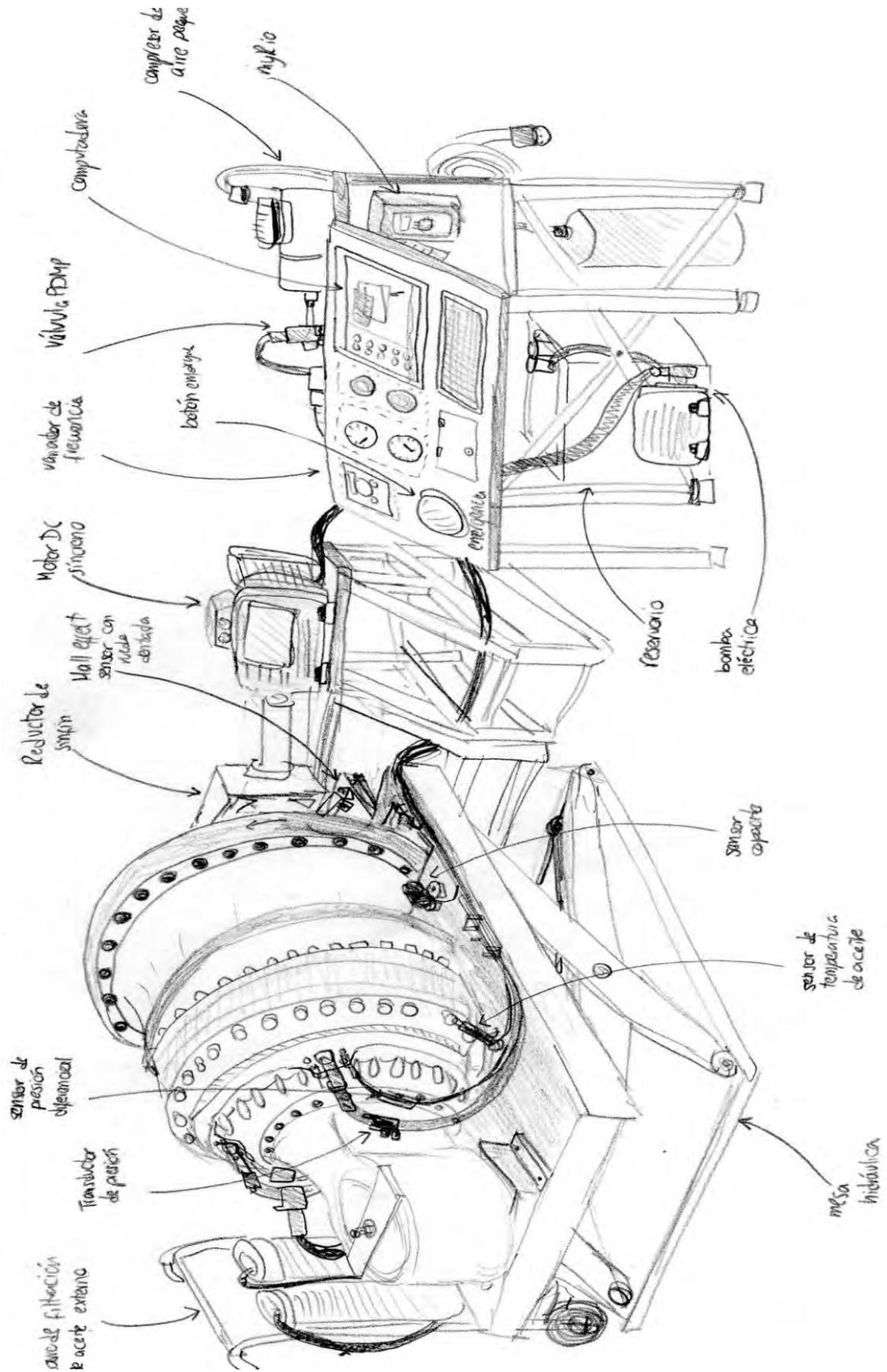


Fig 3-7 Concepto de solución 3
(Fuente: Elaboración Propia)

3.6 Evaluación Técnico-Económica

Con el objetivo de poder definir cuál de los conceptos de solución es el óptimo y satisface de mejor manera los requerimientos de diseño, se comparan estas alternativas mediante puntajes asignados a características cualitativas de cada uno con respecto a criterios tanto técnicos como económicos.

3.6.1 Valoración Técnica-económica

En la evaluación del proyecto, se considerarán tanto criterios técnicos como económicos para poder sustentar la elección de un concepto de solución sobre los otros. Así, para los criterios de ambos ámbitos se ha asignado un peso relativo como se muestra en la tabla X, para definir la relevancia de cada uno y, por lo tanto, que tan decisivo es cada criterio para la elección final.

*Tabla 3-7 Pesos relativos de la evaluación
(Fuente: Elaboración propia)*

Valor (g) → Significado
0 → Nada importante
1 → Poco importante
2 → Importante
3 → Muy Importante
4 → Bastante Importante

3.6.2 Puntaje técnico-económico

Así, para cada criterio definido por opción de concepto de solución, se definirá el grado de aceptación que tiene cada opción por medio de puntajes, en una escala del 0 al 4, como se muestra en la tabla a continuación.

*Tabla 3-8 Escala de efectividad de las soluciones
(Fuente: Elaboración propia)*

Valor (p) → Significado
0 → No satisface
1 → Mínimamente aceptable
2 → Suficiente
3 → Bien
4 → Muy bien (Solución ideal)

3.6.3 Criterios Técnicos

Los criterios técnicos escogidos para la evaluación son: complejidad, precisión, dimensiones, rapidez y fácil manipulación. A continuación, se explica cada criterio técnico, para su siguiente aplicación en la tabla comparativa.

Tabla 3-9 Criterios Técnicos para la evaluación
(Fuente: Elaboración propia)

Criterio Técnico	Descripción
Complejidad	La complejidad de un sistema incide en la manera en la cual los componentes están distribuidos dentro de la máquina, así como la cantidad de elementos.
Precisión	La precisión de los componentes, su efectividad para el entorno y efectividad para medir la variable deseada, además de los tipos de movimientos de los mecanismos, son factores que influyen en que tan preciso va a lograr ser el sistema de simulación.
Dimensiones	Un aspecto a considerar en la adquisición del nuevo sistema mecatrónico es el tamaño que ocuparía una vez sea instalado. En cualquier taller, la disposición de la maquinaria es un tema sumamente importante debido a que este influye al flujo de los procesos realizados dentro de una planta.
Rapidez	Si bien no es prioritario, es necesario tomar la rapidez del proceso como criterio para evaluar al sistema ya que este tiempo se agregará al tiempo total de reparación por rueda delantera. Este tiempo dependerá de la facilidad de acople de la rueda, así como el tiempo que tomaría el procedimiento mismo del ensayo.
Fácil manipulación	Se evaluará la complejidad del sistema al momento de interactuar con el interfaz. Si hay más probabilidades de equivocarse por parte del operario durante la prueba, se considerará un sistema de difícil manipulación.

En la tabla de evaluación técnica, se ponderan los criterios seleccionados utilizando los pesos relativos asignados y luego son multiplicados con el puntaje de cada solución.

Tabla 3-10 Tabla Evaluación Técnica
(Fuente: Elaboración propia)

Criterio		Solución 1			Solución 2		Solución 3		Solución Ideal	
Nro	Técnico	g	p	pxg	p	pxg	P	pxg	p	pxg
1	Complejidad	2	3	6	2	4	2	4	4	8
2	Precisión	4	3	12	3	12	2	8	4	16
3	Dimensiones	3	2	6	2	6	2	6	4	12
4	Rapidez	1	1	1	3	3	3	3	4	4
5	Fácil manipulación	3	3	9	2	6	3	9	4	12
Suma			12	34	12	31	12	30	20	52
Promedio ponderado			0.60	0.65	0.60	0.60	0.60	0.58	1,00	1,00

3.6.4 Criterios Económicos

En este rubro se ha decidido elegir los siguientes criterios: costo de la tecnología, número de piezas, desperdicios, fácil adquisición de los componentes y fácil mantenimiento. Cada criterio es explicado en la Tabla 3-10.

Tabla 3-11 Criterios Económicos para la evaluación
(Fuente: Elaboración propia)

Criterio Técnico	Descripción
Costo de la tecnología	Se evaluará el costo que tiene cada solución. Este costo puede significar no solo que por motivos de presupuesto el sistema sea menos atractivo para posibles compradores interesados, sino que también posiblemente esté relacionado a la complejidad tecnológica del sistema.
Número de piezas	La cantidad de componentes puede disminuir o aumentar considerablemente los precios de fabricación y mantenimiento. Un componente de mayor precio suele simplificar tareas.
Desperdicios	Para garantizar el buen uso de las entradas como energía o materia, se debe considerar los desperdicios que se pueden apreciar en las pérdidas por energía calorífica, energía lumínica, energía sonora, excedentes de fluidos con los que se trabaja, etc.
Fácil adquisición de los componentes	En base a los componentes seleccionados en cada solución se puede apreciar si dichos componentes son comunes en el mercado peruano.
Fácil mantenimiento	El mantenimiento de las partes de las soluciones será cada dos años, por ende, deben tener un periodo de vida mayor y que permita realizar el mantenimiento según los costos necesarios para reemplazar, reparar, corregir, etc.

En las tablas 3-9 y 3-11, se muestra cómo se obtienen los puntajes ponderados de las tres soluciones contempladas. La última columna de cada tabla representa el puntaje ideal para cada característica.

Tabla 3-12 Tabla Evaluación Económica
(Fuente: Elaboración Propia)

Criterio			Solución 1			Solución 2		Solución 3		Solución Ideal	
Nro	Técnico	g	p	pxg	p	pxg	P	pxg	p	pxg	
1	C. Tecnología	4	3	12	2	8	2	8	4	16	
2	N. de piezas	2	3	6	2	4	3	6	4	8	
3	Desperdicios	2	2	4	3	6	1	2	4	8	
4	Fa. Adquisición	3	2	6	1	3	2	6	4	12	
5	Fa. Mantenimiento	4	3	12	3	12	2	8	4	16	
Suma			13	40	11	33	10	30	20	60	
Promedio ponderado			0.65	0.67	0.55	0.55	0.50	0.50	1,00	1,00	

3.6.5 Evaluación de concepto Óptimo

Después de realizar una valoración de tanto los criterios técnicos, como económicos, la siguiente etapa es realizar un gráfico donde se intersecan los valores finales de los promedios ponderados y luego se compare la distancia de cada punto a la recta ideal, siendo la alternativa a elegir, la que esté más próxima a dicha línea. (Figura 3-8).

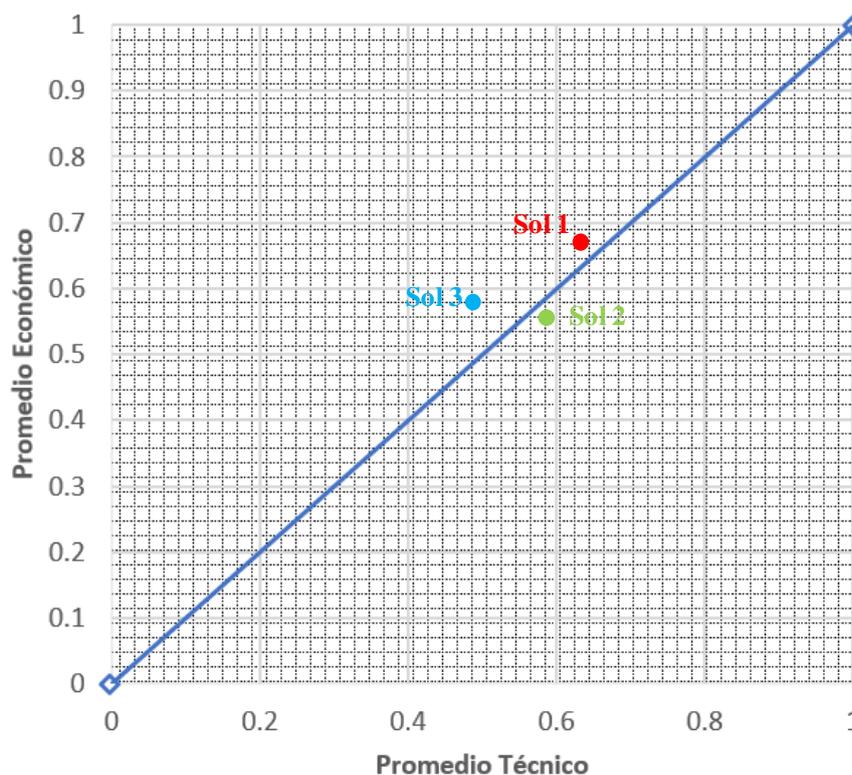


Fig 3-8 Tabulación de puntaje obtenido por concepto de solución
(Fuente: Elaboración propia)

Después de realizar el análisis técnico-económico se concluye que la menor distancia (Figura X) se da para el concepto de solución N° 1, es decir, la más óptima entre los tres conceptos de solución. Consecuentemente, se elige realizar el diseño de Banco de pruebas para el giro y frenado de rueda delantera de un camión eléctrico para minería bajo el concepto de solución N° 1. Parte de la confirmación de la elección se muestra en el mismo gráfico donde se evidencia que la Solución 1 se encuentra más cerca en si al puntaje de solución ideal. Es decir, a parte de estar balanceada, sus atributos comprueban que es una solución comparable con el caso ejemplar.

3.7 Diagrama de Operaciones

La máquina necesita de un operario para la puesta en funcionamiento del ensayo. El operario debe seguir una secuencia de operaciones y verificaciones a considerar para la correcta realización de la prueba.

Antes de inicializar al sistema electrónico, se ubica al componente giratorio en la zona del ensayo y se fija el agujero del *spindle* a la base fija al suelo. Posteriormente se energiza la maquina y ubica la altura del eje rotatorio del sistema de manera concéntrica a la rueda. Seguidamente, se fija el brazo de la maquina a 4 espárragos de la parte externa de la rueda para terminar con el proceso de instalación.

Para iniciar el proceso de simulación, se debe energizar la máquina, conectando el cable de suministro de energía a un puerto de corriente eléctrica trifásica de 380V. Luego de esto, se presiona el botón que permite el paso de la corriente a la máquina. Una vez prendida, el operador seleccionará el modelo de rueda delantera a probar, de esta manera se seleccionan automáticamente algunos parámetros como la presión a aplicar a la cámara pistón durante la prueba de estanqueidad. Posteriormente, para comenzar con el proceso se procederá a elegir la prueba a realizar primero. Luego de haber realizado alguna de las pruebas y observar sus resultados se puede optar por realizar otra prueba de diferente tipo o del mismo. Para el caso de la prueba hidráulica dinámica, se deberá indicar los rangos de RPM con los cuales se quiere trabajar durante la simulación. Una vez avanzada la prueba, se deberá iniciar el escalamiento de presiones en la cámara pistón con el uso de perillas digitales en el HMI, y luego esperar a los resultados luego del término de la prueba.

Una vez completos los tres procesos de simulación, el sistema elaborará un informe final con los datos tomados de las pruebas previas. Luego de su revisión en pantalla, se selecciona la confirmación para guardar o enviar este documento a alguna computadora.

El proceso descrito se muestra en el diagrama presentado en la figura 3-9.

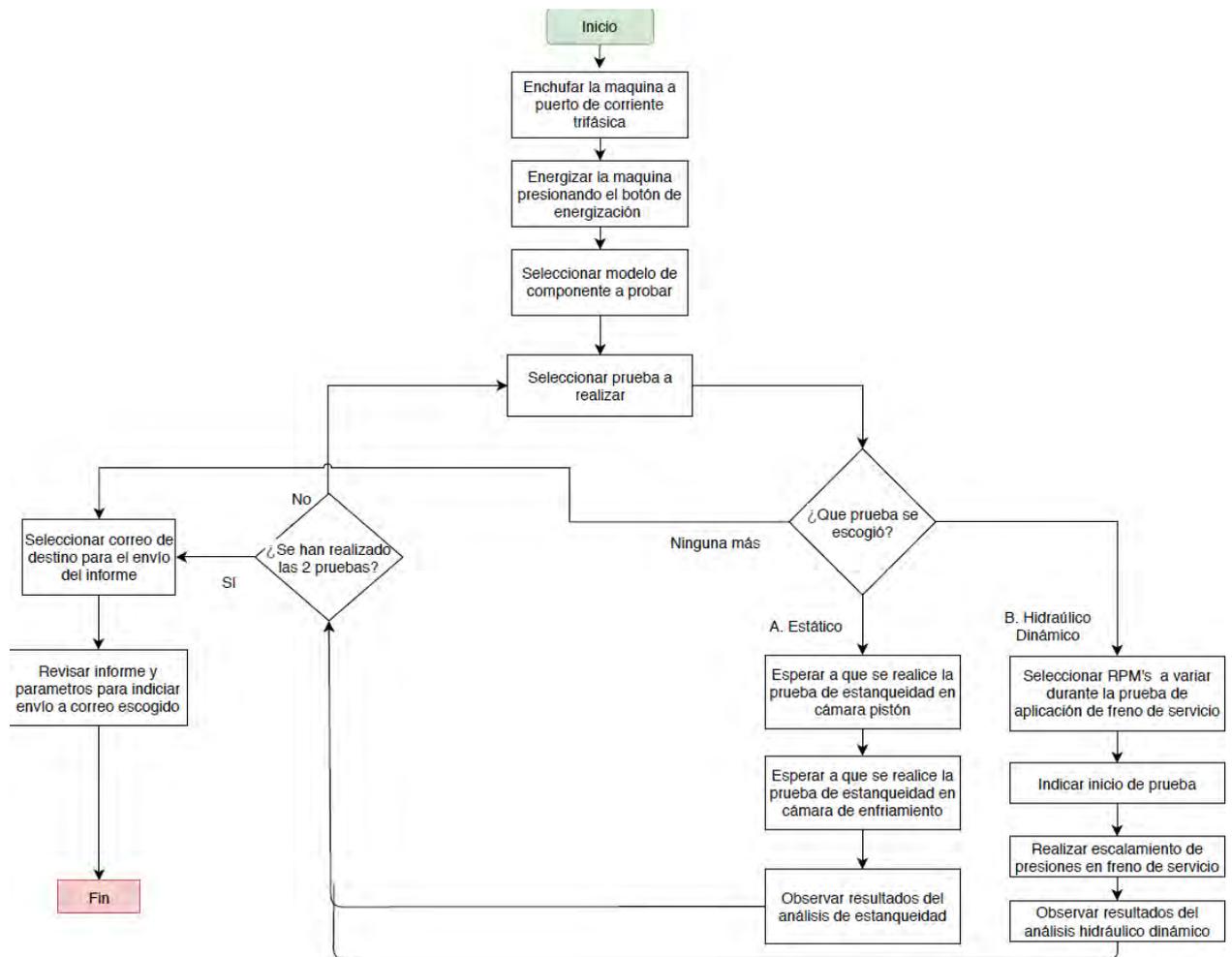


Fig 3-9 Diagrama de Operaciones
(Fuente: Elaboración Propia)

CONCLUSIONES

- Se pudo llegar a evaluar y definir el diseño conceptual del sistema automatizado para la prueba de giro y frenado de ruedas delanteras de camiones eléctricos de 300 ton, cumpliendo este concepto de solución con los requerimientos del sistema definidos en el proyecto, y este también, presentando un índice óptimo en la evaluación técnico-económica realizada en el presente trabajo.
- Se investigó sobre las diferentes tecnologías utilizadas en bancos de simulación, obteniendo entre las mas destacadas, el uso del método alternativo de prueba de giro y fatiga sin neumático explicado por Sakota Zeljko, en donde se utiliza una masa externa en el mismo eje de giro para poder simular diferentes cargas excéntricas durante el proceso de prueba de giro de ruedas; concepto con el cual se pudo basar el concepto de solución propuesto en el presente trabajo.
- Se pudo definir de entre las opciones de mecanismos presentados para el impulso de la rueda del camión, un diseño de mecanismo que permitía este movimiento, utilizando los espárragos del cubo de rueda en donde estaría fijado el neumático, permitiendo esto un agarre más eficiente y eficaz. Consecuentemente, se definieron los componentes necesarios, tanto mecánicos, electrónicos e hidráulicos, como de control, necesarios para el funcionamiento del sistema automatizado de prueba.
- Así también, se pudo concluir que revisar el correcto funcionamiento de la cámara de enfriamiento es de vital importancia, ya que una deficiencia en este sistema representaría un peligro latente para la integridad de los discos del freno húmedo, y en el resto del funcionamiento, siendo este tipo de problema uno de los más recurrentes en los casos presentados y con consecuencias más graves. Asimismo, se pudo definir que es prudente realizar pruebas de aplicación de presión en el freno de servicio

cuando el cubo rueda está en movimiento, porque de esta manera se podrá simular un comportamiento más cercano a la realidad ya que el movimiento en el Hub presentaría resistencia y fricción en los frenos húmedos, mientras que en una prueba de estanqueidad no se lograría una aproximación nada cercana.



BIBLIOGRAFÍA

Aporte de la minería al PBI. (19 de Abril del 2018). El Peruano, p. 10

Recuperado de <https://www.ipe.org.pe/portal/wp-content/uploads/2018/04/2018-04-19-Aporte-de-la-miner%C3%ADa-al-PBI-El-Peruano.pdf>

Cat® Products. (2011, Agosto 18). Cat® Wet Disk Brakes | How Oil Cooled Hydraulic Brakes Work [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=dvCYBUOtKrk>

Dávila, C., (2012). Gestión del mantenimiento de los camiones mineros CAT modelo 777F en mina La Arena. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Dawson, V., & Heistad, R. (1986). Ten Years Experience with Brake Testing of Large Mining Trucks in British Columbia. SAE Transactions, 95, 79-95. Retrieved October 28, 2020, from <http://www.jstor.org/stable/44469021>

Hoff, M., Ferrick, R., Mora, C., Nelson, J., Sharkey, R. (productores). (2015). Camiones Komatsu [documental]. EU: Hoff Productions. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=0N5NX8GeBL0>

Hagenbuch hydraulic Systems, (s.f.) ZWARP - biaxial wheel test bench. Recuperado de <http://www.hagenbuch.ch/en/produkte/pruefstaende/ZWARP>

Komatsu. (2018). Major Activities of Parts sales expansion (IR-DAY2018). Recuperado de https://home.komatsu/en/ir/library/results/03_Major%20Activities%20of%20Parts%20Sales%20Expansion.pdf

Kinstler, J. (2005). The Science and Methodology of SAE Wheel Fatigue Test Specifications. SAE Transactions, 114, 816-826. Retrieved October 28, 2020, from <http://www.jstor.org/stable/44718964>

Komatsu. (2015). Manual Cubo y Husillo de la Rueda Delantera Camión Minero 930E-4 (G03028). Recuperado de <https://www.maquinariaspesadas.org/blog/2059-manual-cubo-husillo-rueda-delantera-camion-930e4-komatsu>

- Komatsu. (2014). Manual del Conjunto del freno de disco húmedo del camión 930E-4 Komatsu (G03028). Recuperado de <https://www.maquinariaspesadas.org/blog/1232-manual-conjunto-freno-disco-humedo-camion-930e4-komatsu>
- Li, C., & Mescua, R. (2016). Propuesta de plan de Mantenimiento entrado en la confiabilidad aplicado a una flota de camiones fuera de carretera en una mina de tajo abierto. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). Engineering Design (3.a ed.). <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2>
- Paul J. Lesca, Craig L. Campell, Erick, W. Young, Bradley C. (Achorn, 2007). "Control method for a bi-axial wheel test bench for simulating driving stresses and a bi-axial wheel test bench". Recuperado de <https://www.google.com/patents/WO2001071307A1?cl=zh>
- Reman Chile. (2012). Hoja de Procedimiento de Desarme Conjunto Masa Camión 960E (PTT-HID-353).
- Riba, C., (2002), *Diseño concurrente*, Barcelona, España: Fondo editorial de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- Sakota Zeljko PhD., Kostic Dimitrije, (2018). An alternative design of testing bench for dynamic wheel cornering fatigue tests. Recuperado de <https://stumejournals.com/journals/tm/2018/3/110/pdf>
- ZWARP Biaxial Wheel Test Machine Data Sheet (2019). [Hoja de datos técnicos] Recuperado de https://www.alpinemetaltech.com/fileadmin/user_upload/Bilder/Produkte/2_Automotive/Datenblaetter/Datasheet_ZWARP_inner.pdf.

ANEXO 1: Matriz AMFE y Análisis

La matriz AMFE o matriz de Análisis modal de fallos y efectos, en este caso se utiliza para el análisis de equipos, para poder mejorar su eficacia y calidad, identificando las causas de las diferentes fallas, mientras que son ordenadas en prioridad para la empresa, dependiendo de la Severidad, Ocurrencia y Detectabilidad de los incidentes o fallas en componentes luego de ser reparados, siendo el puntaje máximo a poder obtener el de 1000 NPR, como consecuencia de la multiplicación de los 3 criterios mencionados anteriormente. De los puntajes NPR obtenidos, se pueden observar que los casos más críticos y recomendables como oportunidades de mejora presentan dos tipos de causas raíz, siendo estas, el daño en los sellos del pistón de frenado y el daño por mala instalación de los sellos de anillo en el ensamble de rueda (O-ring).

Analizando los efectos que tienen los casos de falla identificados, estos se manifiestan mayoritariamente en fugas de aceite (todos los casos en diferentes formas) y mezcla de los aceites de refrigeración y accionamiento de freno (presentes en 5 de los 9 casos, y en 3 de los 4 casos seleccionados como críticos en la matriz AMFE). Es por eso, que se señala que las pruebas y simulación de estos componentes deben incluir el uso de ambos de estos fluidos, para corroborar que no existan filtraciones en los componentes luego de su reparación y ensamble. Así, entre las pruebas planificadas para la solución, se incluirá el accionamiento del freno con la aplicación de presión en la caja pistón, así como la circulación del aceite refrigerante dentro de la caja de frenos en simultáneo, para luego verificar los niveles de aceite y su presión, así como la temperatura de estos fluidos durante y luego del funcionamiento. Estas consideraciones se tendrán en cuenta para la definición del objetivo general y los específicos, así como para la identificación de sistemas específicos dentro de la estructura de funciones del sistema a diseñar.

CUADRO FORMATO AMFE												
SMR(Horas)	FECHA	INFORME O FORMATO AFA	ELEMENTO EMPIEZA FALLA	FALLA DE QUE PIEZA	MODO DE FALLA	EFEECTO EN EL ENSAMBLE	CAUSA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	NPR	ACCIÓN
11239.1	18/09/2018	FA 01-180072	Sellos de Piston del Freno	ENSAMBLE RUEDA	Fuga de aceite y partículas oxidadas	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	O-ring fracturado debido a un giro repentino del camión y posterior fuga. Las partículas vinieron del hub, el cual tiene contacto con el carrier de sellos del hub	8	8	7	448	Enviar el componente a reparar a KRCP
2792.7	20/06/2017	FA 01-17023	Sellos de Piston del Freno	SPINDLE	Fuga de aceite y mezcla de aceites	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	Daño en los sellos del pistón del sistema de frenado	6	8	6	288	Enviar el componente a reparar a KRCP
2792.7	20/06/2017	FA 01-17042	Sellos de Piston del Freno	SPINDLE	Fuga de aceite y mezcla de aceites	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	Daño en los sellos del pistón del sistema de frenado	6	8	6	288	Enviar el componente a reparar a KRCP
5160	17/04/2018	FA 01-18034	Sellos de Piston del Freno	ENSAMBLE RUEDA	Fuga de aceite y mezcla de aceites	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	El O-ring del ensamble de sellos se encontraba en una posición incorrecta, dañando el sello del pistón	6	8	6	288	Enviar el componente a reparar a KRCP
7262	20/07/2019	fa 01-18064	Falla en los sellos	SPINDLE, HUB & FRENO	Fuga de alto ratio en la parte de la rueda y bajo en la válvula de spindle	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	Mala condición de los sellos	8	4	8	256	Enviar el componente a reparar a KRCP
2348	17/04/2019	FA 01-19019	Dual cone seal	SPINDLE, HUB & FRENO	Fuga de aceite y mezcla de aceites	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	El sello como presenta un desalineamiento con los anillos tóricos, los cuales presentan una condición de giro y poseen diferentes signos de daño	6	6	6	216	Enviar el componente a reparar a KRCP
4300	8/04/2019	FA 01-19028	Dual cone seal	SPINDLE, HUB & FRENO	Fuga de aceite y mezcla de aceites	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	El sello como presenta un desalineamiento con los anillos tóricos, los cuales presentan una condición de giro y poseen diferentes signos de daño	6	6	6	216	Enviar el componente a reparar a KRCP
9878	28/08/2019	FA 01-19064	Dual cone seal	SPINDLE, HUB & FRENO	Fuga interna de aceite	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	El sello como presenta un desalineamiento con los anillos tóricos, los cuales presentan una condición de giro y poseen diferentes signos de daño	7	6	2	84	Enviar el componente a reparar a KRCP
4028	29/11/2019	FA 01-18031	Ensamble de sellos	ENSAMBLE RUEDA	Fuga interna de aceite	Baja el nivel de aceite estandarizado en el ensamble	Falta de hermeticidad en el ensamble de sellos	7	4	2	56	Enviar el componente a reparar a KRCP

Tabla 0-1 Matriz AMFE desarrollada para los casos de garantía