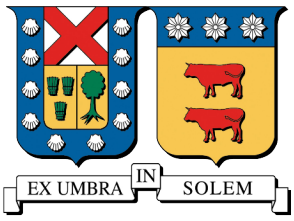
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



“ANÁLISIS DE COMPONENTES CRÍTICOS Y DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA EL CARRO Y EL SUBSISTEMA FRENO DE EMERGENCIA DEL FUNICULAR DEL PARQUE METROPOLITANO DE SANTIAGO”.

JORGE IGNACIO GUTIÉRREZ SAN MARTÍN

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA.

PROFESOR GUÍA: LUIS PÉREZ POZO
PROFESOR CORREFERENTE: UDO RHEINSCHMIDT

Marzo de 2024

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar gracias a mi padres,
por apoyarme en cada paso de la vida,
por nunca dudar de mí y motivarme cada día a más.
A mis hermanos,
por enseñarme que la constancia supera todos los obstáculos.
A mis amigos Matías, Paulo y Luciano,
por acompañarme en todo este proceso.
A Michele,
por acompañarme y ayudarme a terminar esta etapa de la vida,
y en general a cada una de las personas que estuvieron a mi lado.

Dedicatoria

A ese niño que quería entender cómo funciona el mundo,
a ese niño que disfrutaba desarmando cosas,
a ese niño que soñaba con ser ingeniero.
Sólo quiero decir que lo logramos.
Disfruta del proceso.

Resumen

Esta investigación propone el desarrollo de un plan de mantenimiento, diseñado para implementar confiabilidad en el subsistema de freno de emergencia. La metodología adoptada implica un análisis exhaustivo de la incidencia que ocasiona una falla en el sistema, junto con la categorización de los modos de falla conforme a su nivel de criticidad. Se emplea como herramienta la matriz de criticidad desarrollada en el contexto de este documento, la cual ofrece un enfoque sistemático para evaluar y priorizar los riesgos asociados.

Los resultados derivados de esta investigación revelan que cualquier falla vinculada al mecanismo del freno, exhibe una criticidad significativa. Esta conclusión se basa en la comprensión de las fallas funcionales, las cuales pueden desencadenar situaciones extremadamente graves, incluyendo accidentes catastróficos con el potencial de causar daños irreversibles y pérdida de vidas humanas.

El desarrollo de un plan de mantenimiento, basado en los resultados de esta investigación, busca no solo mitigar los riesgos identificados, sino también reducir al mínimo los tiempos de inactividad no programada, mejorar la eficiencia de los recursos y, en última instancia, salvaguardar la integridad de los usuarios y los activos involucrados.

Mediante la aplicación de este enfoque de mantenimiento centrado en la confiabilidad, respaldado por análisis detallados y técnicas rigurosas, se busca garantizar la seguridad y la confiabilidad continua del sistema de freno de emergencia. Este enfoque no solo aborda los desafíos presentes, sino que también sienta las bases para la gestión efectiva de los riesgos futuros y la mejora continua del desempeño del sistema en su totalidad.

Keywords:

Plan de mantenimiento, confiabilidad, análisis de incidencia, modos de falla, criticidad, matriz de impacto, seguridad.

Abstract

This research proposes the development of a maintenance plan designed to implement reliability in the emergency brake subsystem. The adopted methodology involves a comprehensive analysis of the incidence caused by a system failure, along with the categorization of failure modes according to their level of criticality. The developed criticality matrix, utilized as a tool within the context of this document, provides a systematic approach for evaluating and prioritizing associated risks.

The results derived from this research reveal that any failure related to the brake mechanism exhibits significant criticality. This conclusion is based on an understanding of functional failures, which can lead to extremely severe situations, including catastrophic accidents with the potential for irreversible damage and loss of human lives.

The development of a maintenance plan, based on the outcomes of this research, aims not only to mitigate identified risks but also to minimize unplanned downtime, enhance resource efficiency, and ultimately safeguard the integrity of users and involved assets.

By implementing this reliability-centered maintenance approach, supported by detailed analyses and rigorous techniques, the goal is to ensure the safety and continuous reliability of the emergency brake system. This approach not only addresses present challenges but also lays the groundwork for effective management of future risks and continuous improvement of the overall system performance.

Keywords:

Maintenance plan, reliability, incidence analysis, failure modes, criticality, impact matrix, safety.

Índice de contenidos

Agradecimientos.....i
Dedicatoria.....ii
1 Introducción.....x
2 Objetivos.....xii
3 Marco teórico.....1
3.1 Funicular San Cristóbal.....2
3.2 Historia.....2
3.3 Morfología del funicular.....6
3.3.1 Plano de rodadura.....6
3.3.2 Sala de máquinas.....12
3.3.3 Carros.....15
3.4 Problemática.....30
4 Plan de mantenimiento basado en la confiabilidad.....32
4.1 Mantenimiento basado en la confiabilidad.....33
4.2 Aplicación del RCM en el carro y subsistema freno de emergencia.....34
4.3 Proceso del RCM.....35
4.3.1 Etapa 1, identificación de las funciones y contexto operacional.....36
4.3.2 Etapa 2, identificación de las fallas, modos y efectos.....36
4.3.3 Etapa 3, toma de decisiones y análisis de consecuencias.....38
5 Programación y ejecución del plan de mantenimiento.....42
5.1 Plan de mantenimiento.....42
5.2 Programación.....42
5.2.1 Estructura chasis.....43
5.2.2 Estructura carrocería.....44
5.2.3 Elementos de rodadura.....45
5.2.4 Sistema paracaídas (Freno de emergencia).....47
5.3 Ajuste de datos para distribución de Weibull.....50
5.3.1 Determinación de la función de falla acumulada.....52
5.3.2 Determinación de los parámetros de Weibull.....54

6 Análisis de la matriz de criticidad.....55
6.1 Fallas leves.....55
6.2 Fallas moderadas.....56
6.3 Fallas severas.....57
6.4 Fallas catastróficas.....59
7 Conclusiones.....61
7.1 Incorporación de confiabilidad al plan de mantenimiento.....62
7.1.1 Horómetro de funcionamiento.....62
7.1.2 Registro de inspección.....63
7.1.3 Mean time between failure.....65
7.1.4 Registro de intervención.....66
7.2 Mecanismos tribológicos.....69
7.3 Repuestos críticos.....69
Bibliografía.....71
Anexos.....73

Índice de figuras

Figura N.º 3.1: Vista satelital ubicación instalación..... .1
Figura N.º 3.2: Faenas de construcción..... .3
Figura N.º 3.3: Estación Pío Nono año 1925.....3
Figura N.º 3.4: Estación Cumbre año 1925..... .4
Figura N.º 3.5: Sala de máquinas año 1925.....4
Figura N.º 3.6: Salón Tudor año 1925..... .5
Figura N.º 3.7: Plano de rodadura.....6
Figura N.º 3.8: Plano de rodadura tipo A.....7
Figura N.º 3.9: Plano de rodadura tipo B.....8
Figura N.º 3.10: Plano de rodadura tipo C.....9
Figura N.º 3.11: Representación gráfica conjunto riel, brida y perno.....10
Figura N.º 3.12: Conjunto instalado en funicular San Cristóbal..... .10
Figura N.º 3.13: Collera de polines.....11
Figura N.º 3.14: Zona de ingreso al cruce de vías..... .11
Figura N.º 3.15: Polines guía en zona de ingreso/salida cruce de vías.....12
Figura N.º 3.16: Primera reducción, motor - volante de inercia.....12
Figura N.º 3.17: Disposición de componentes en Eje N.º 1..... .13
Figura N.º 3.18: 2a y 3a reducción..... .14
Figura N.º 3.19: Polea de tracción y reenvío, doble garganta.....15
Figura N.º 3.20: Sistema – carrocería año 2022..... .16
Figura N.º 3.21: Sistema - chasis.....17
Figura N.º 3.22: Sistema - chasis desglosado..... .17
Figura N.º 3.23: Vista superior plano horizontal, estructura, chasis.....18
Figura N.º 3.24: Vista principal estructura, chasis.....19
Figura N.º 3.25: Buje y depósito de aceite para lubricación.....20
Figura N.º 3.26: Geometría brazo de suspensión.....21
Figura N.º 3.27: Casquete bipartido.....21
Figura N.° 3.28: Brazo de suspensión - timonería primaria..... .22
Figura N.º 3.29: Mecanismo de amortiguación..... .23

Figura N.º 3.30: Timonería primaria, continuación.....23
Figura N.º 3.31: Biela primaria y eje B.....24
Figura N.º 3.32: Bieleta y barras de accionamiento.....25
Figura N.º 3.33: Timonería Secundaria.....26
Figura N.º 3.34: Freno paracaídas.....27
Figura N.º 3.35: Patín de freno.....27
Figura N.º 3.36: Placa de ajuste y nivelación.....28
Figura N.º 3.37: Garra y patín de freno.....29
Figura N.º 5.1Comportamiento del parámetro beta.....52
Figura N.º 7.1: Registro del horómetro de funcionamiento.....63
Figura N.º 7.2: Formato del registro de inspección.....64
Figura N.º 7.3: Información disponible registro intervención.....64
Figura N.º 7.4: Base de datos.....66
Figura N.º 7.5: Validación de intervención.....67
Figura N.º 7.6: Información disponible en la validación de datos.....67
Figura N.º 7.7: Información validada.....68
Figura N.º 7.8: Registro de intervención.....68

Índice de tablas

Tabla 1: ISO 14224 – Clasificación de consecuencias de falla..... .39
Tabla 2: Matriz de criticidad.....40
Tabla 3: Plan de mantenimiento a estructura chasis..... .43
Tabla 4: Plan de mantenimiento a paredes, piso y recubrimiento exterior.....44
Tabla 5: Plan de mantenimiento a puertas y sistemas mecánicos asociados.....44
Tabla 6: Plan de mantenimiento asociado a ruedas..... .45
Tabla 7: Plan de mantenimiento asociado a ejes.....45
Tabla 8: Plan de mantenimiento a soportes de ejes - chumaceras..... .46
Tabla 9: Plan de mantenimiento al subsistema de disparo por aflojamiento del cable de tracción.....47
Tabla 10: Plan de mantenimiento al subsistema de disparo manual.....48
Tabla 11: Plan de mantenimiento a los subsistemas mecánicos de accionamiento.....48
Tabla 12: Plan de mantenimiento al subsistema de acuñamiento.....48
Tabla 13: Morfología funicular - Parte 1..... .73
Tabla 14: Morfología funicular - Parte 2..... .74
Tabla 15: Morfología funicular - Parte 3..... .76
Tabla 16: Morfología funicular - Parte 4..... .77
Tabla 17: Morfología funicular - Parte 5..... .79

1 Introducción

En el marco del presente trabajo de título, se persigue el objetivo fundamental de diseñar una estrategia integral y desarrollar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad para los carros que componen el sistema del funicular San Cristóbal. Este proyecto se articula en torno a tres fases esenciales, cada una concebida con el propósito de aportar de manera significativa al logro de metas específicas.

En la fase inicial, se lleva a cabo una recopilación de información, centrándose en la morfología precisa del sistema. Esta fase preliminar se erige como piedra angular, proporcionando un entendimiento holístico de los elementos que constituyen el funicular, y sentando así las bases para una evaluación más detallada y contextualizada.

La segunda fase, esencial en la consecución de los objetivos propuestos, se dedica al análisis pormenorizado de las fallas funcionales. Esta etapa incluye la evaluación de la incidencia de estas fallas en los componentes individuales y su repercusión a nivel sistémico. Un elemento central en este análisis consiste en la categorización de las fallas según su criticidad. Esta clasificación estratégica facilita la toma de decisiones informadas y proporciona un marco para la recomendación de tareas específicas. Dichas tareas diseñadas, tienen como finalidad reducir las fallas más críticas, contribuyendo a un aumento sustancial en la confiabilidad del sistema, de acuerdo con el plan de mantenimiento elaborado.

En la fase final, se enfatiza la importancia estratégica de la gestión eficiente de la información en la implementación y ejecución del plan de mantenimiento. Este aspecto crucial no solo permite identificar tendencias y patrones, sino que también la construcción de modelos predictivos. Basados en relaciones entre variables, estos modelos se convierten en una herramienta anticipadora invaluable, permitiendo la prevención de posibles fallas.

En síntesis, esta aproximación integral no solo aspira a asegurar la operatividad eficiente a corto plazo, sino que también establece las bases para la confiabilidad a largo plazo del funicular San Cristóbal. Con ello, se busca contribuir de manera significativa a la sostenibilidad y seguridad continua del sistema, consolidando así los cimientos para el éxito y la eficiencia operativa a lo largo del tiempo.

2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de título, enmarcado en el proyecto de recuperación patrimonial del funicular del Parque Metropolitano de Santiago, es desarrollar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el subsistema denominado freno de emergencia a partir del previo desarrollo de distintos insumos de ingeniería mecánica.

Para llevar a cabo el objetivo presentado, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la morfología del carro, separando sistemas, subsistemas, componentes piezas y partes.
- Realizar un levantamiento al chasis del funicular, así como sus elementos constituyentes.
- Generar un modelo CAD del chasis a partir del levantamiento realizado.
- Establecer el diagrama cinemático del subsistema freno de emergencia.
- Definir y ejecutar matriz de impacto para identificar componentes críticos.
- Proponer un plan de mantenimiento periódico-preventivo añadiendo un registro de data para incorporar confiabilidad en el plan de mantenimiento.

3 Marco teórico

La instalación del funicular así como los antecedentes generales de la instalación, se presentan a continuación:

Nombre de la instalación:	Funicular San Cristóbal
Región:	Metropolitana
Comuna:	Recoleta
Dirección:	Pío Nono 450
Latitud:	-33.43018°
Longitud:	-70.63599°
N.º estaciones:	3 (Pío Nono, Zoológico, Cumbre).
N.° de carros:	2
Cantidad de pasajeros por carro:	35
Pendiente plano inclinado:	30+-5°

En la Figura N.º 3.1 se identifica la estación Pío Nono (1), estación Zoológico (2), estación Cumbre (3) y el recorrido de los carros (4).

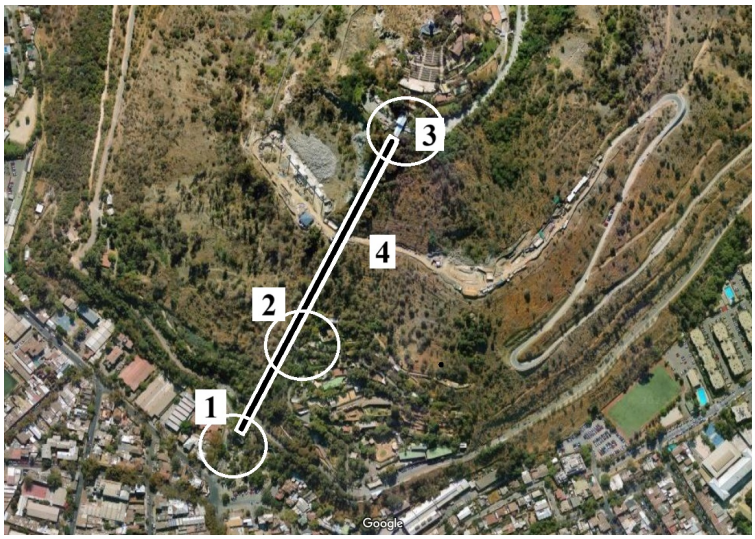


Figura N.º 3.1: Vista satelital ubicación instalación.

3.1 Funicular San Cristóbal

El funicular tiene como objetivo principal el transporte de turistas entre las dos estaciones. La dotación del equipo a cargo del funicular son 14 personas, cuatro de ellos se denominan maquinistas porque son los encargados de operar el movimiento de los carros desde la sala de máquinas mientras que los ocho restantes se encuentran a bordo de los carros comunicándose con el maquinista avisando las detenciones y la reanudación del movimiento de los carros mediante un sistema de timbres en la sala de máquinas. La cantidad de visitantes capaz de transportar es cercana a los 700.000 visitantes anuales con un flujo de aproximadamente 10 minutos entre cada salida desde las estaciones.

3.2 Historia

> *"Este cerro sería un orgullo de Santiago y una gloria de Chile. Lo veo como una fuente inagotable de salud y un venero de riqueza para nuestra Capital."* [1]

Éstas fueron las palabras de Alberto Mackenna Subercaseaux en 1916 en el cerro San Cristóbal durante la toma simbólica de los boys scout de Chile, sin conocer el desarrollo tecnológico y urbano que tendría la ciudad de Santiago. Casi parece planificado que hablara del cerro como un espacio para la salud, lugar que hoy es el pulmón verde de la capital, siendo que en aquella época el cerro era un lugar carente de vida. En 1922 concluyen los proyectos de regadío claves para comenzar la reforestación del parque. Con pala, picota y animales es que comienza el retiro de las piedras que luego se transformaron en los cimientos donde se asienta uno de los proyectos más icónicos del parque, en 1923 comienzan las obras para la construcción e instalación del funicular del Parque Metropolitano de Santiago (Figura N.º 3.2).

El 14 de noviembre de 1924 se instala el primer riel y las obras se extienden hasta el 25 de abril de 1925, fecha en la cual el expresidente Arturo Alessandri realiza la ceremonia de inauguración. La estación Pío Nono es uno de los hitos fundamentales del funicular (Figura N.º 3.3), ubicada a un costado de la plaza Caupolicán, tiene forma de torreón medieval.



Figura N.º 3.2: Faenas de construcción.



Figura N.º 3.3: Estación Pío Nono año 1925.

Construida con la misma piedra canteada del cerro, fue obra del arquitecto Luciano Kulczewski. La estación Pío Nono se complementa con la estación Cumbre (Figura N.º 3.4), obra del arquitecto Carlos de Landa.



Figura N.º 3.4: Estación Cumbre año 1925.

En el primer piso se ubica la sala de máquinas (Figura N.º 3.5) mientras que en el segundo nivel está el salón Tudor (Figura N.º 3.6). Detrás de la estación se ubica el santuario a la Virgen de la Inmaculada Concepción.

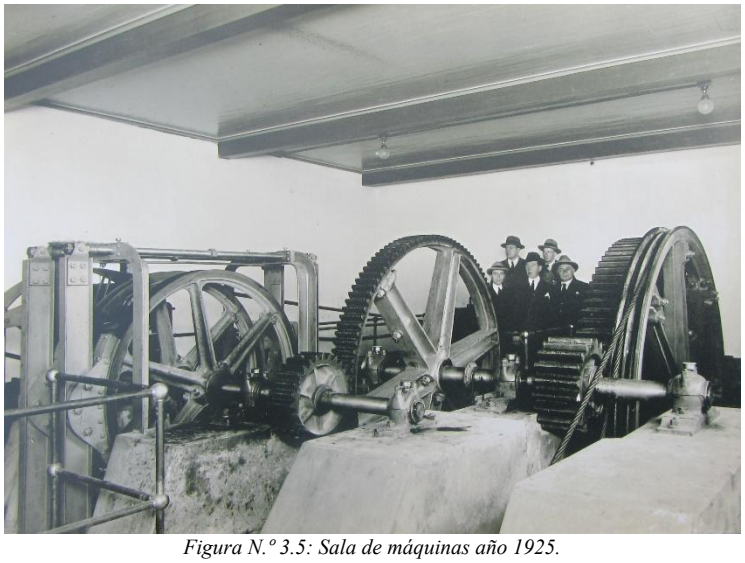


Figura N.º 3.5: Sala de máquinas año 1925.



Figura N.º 3.6: Salón Tudor año 1925.

Los carros y materiales del funicular fueron traídos de la casa Ceretti y Tanfani en Milán. Inicialmente la capacidad fue para 50 personas diferenciadas entre primera clase, ubicada en los módulos intermedios y segunda clase, en los extremos del carro. Los módulos intermedios poseían cortinas además de incluir asientos mientras que los módulos extremos estaban abiertos y los usuarios debían viajar de pie.

Dada la importancia del funicular dentro del proceso de transformación del cerro San Cristóbal y, al ser considerado uno de los principales atractivos de la ciudad, le permite al funicular ser evaluado y eventualmente declarado como monumento histórico nacional el 16 de noviembre del año 2000 [5].

El funicular detuvo su operación en el año 2020 para llevar a cabo la ejecución de obras de mantenimiento y restauración como parte del proyecto *Conservación Funicular Parque Metropolitano de Santiago* Error: no se encontró el origen de la referencia.

3.3 Morfología del funicular

La instalación que contempla el funicular se compone de tres macrosistemas, el primero se denomina como *plano de rodadura* (Figura N.º 3.7), éste permite el desplazamiento de los carros y se conforma por la loza de hormigón (1), los durmientes (2), los rieles (3) y los componentes que controlan el paso del cable de tracción del sistema, presentados en el ítem 3.3.1.



Figura N.º 3.7: Plano de rodadura.

3.3.1 Plano de rodadura

Se conoce como plano de rodadura a la superficie sobre la cual se disponen los elementos indicados en el párrafo anterior. Al ejecutar una comparativa de los contextos operacionales en diferentes instalaciones y, conforme a lo establecido por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones en el documento Términos Ferroviarios [13], los rieles del funicular tienen distintas configuraciones

dependiendo de la cantidad de rieles que se utilizan. Se define en este documento tres categorías detalladas a continuación:

- *Tipo A* (Figura N.º 3.8) con 4 rieles paralelos (1) genera una vía única de movimiento para cada carro. Sobre el eje de cada par de rieles se desplaza el cable (2) permitiendo el movimiento de los carros (3).

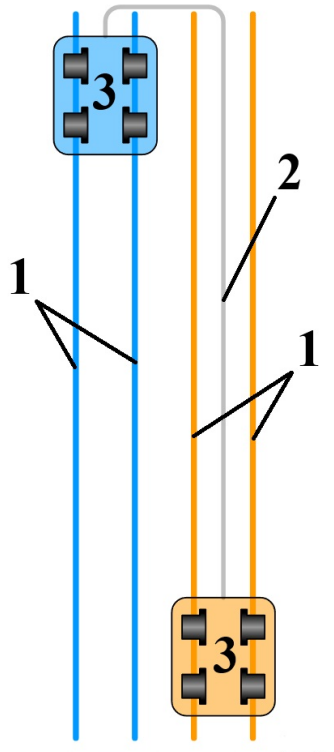


Figura N.º 3.8: Plano de rodadura tipo A.

- *Tipo B* (Figura N.º 3.9) se conforma de 3 rieles que mantienen paralelismo hasta la zona del cruce, el riel interno (2) es compartido por ambos carros. Al llegar al cruce, éste incorpora dos rieles (3) definidos como *aguja curva* [13] los cuales interactúan con la curvatura de los rieles externos (1) permitiendo desplazar la trayectoria de los carros y así evitar colisiones.

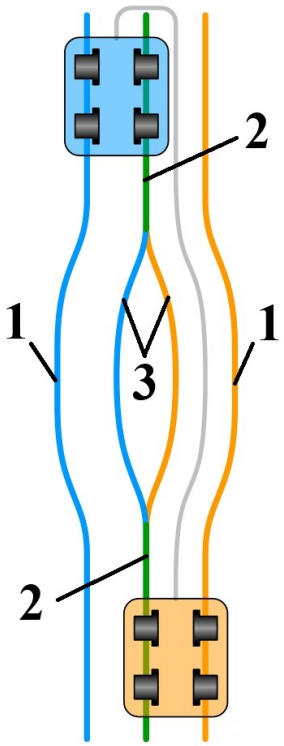


Figura N.° 3.9: Plano de rodadura tipo B.

- *Tipo C* (3.10) también identificado como *paso en bucle*, se conforma de 2 rieles paralelos hasta la zona del cruce, siendo recorridos por ambos carros (1). En la zona del cruce, se incorporan dos rieles (2) definidos como *agujas de desvío* [13]. Éstas agujas permiten, en conjunto con la curvatura de los rieles externos (3), que los carros puedan desviar su trayectoria.

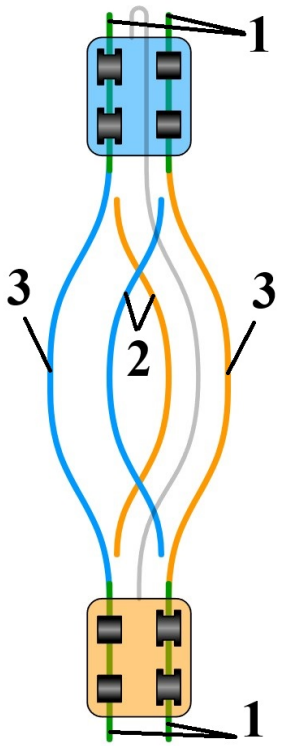


Figura N.º 3.10: Plano de rodadura tipo C.

El funicular San Cristóbal, de acuerdo con las características señaladas, cae dentro de la tipología C, su recorrido es de aproximadamente 480 m y tiene una inclinación nominal de 30° +/-5° por la ladera del cerro. La *trocha* [13] es de 1050 mm y la velocidad promedio de los carros es de 1,5 m/s.

Los rieles, como se menciona en el ítem 3.3, se encuentran asentados sobre durmientes de acero, éstos corresponden a ángulos laminados cuyas dimensiones son 120 mm x 12 mm x 1500 mm. La conexión entre estas dos estructuras se da mediante el uso de bridas de anclaje como se resalta en la Figura N.º 3.11 Error: no se encontró el origen de la referencia, éstas poseen una geometría que les permite cargar la base del riel mediante el uso de pernos tirafondo a la loza del plano de rodadura (Figura N.º 3.12). Entiéndase como loza a los cimientos de hormigón donde se asienta toda la estructura.

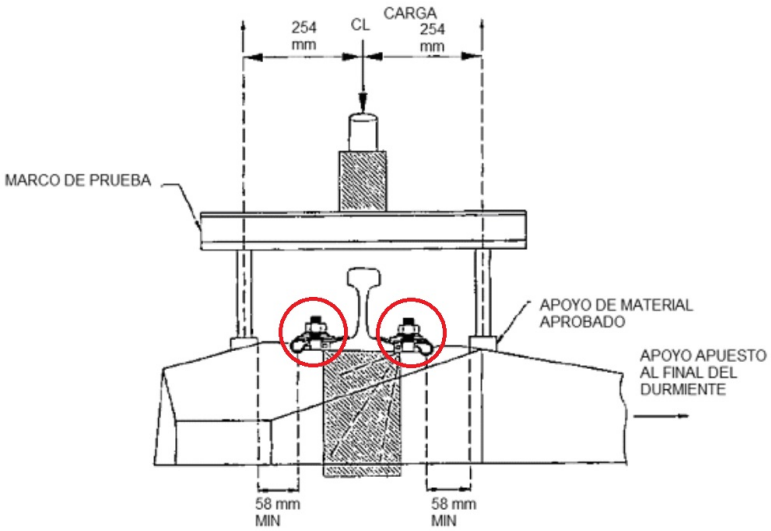


Figura N.º 3.11: Representación gráfica conjunto riel, brida y perno.



Figura N.º 3.12: Conjunto instalado en funicular San Cristóbal.

Dado que el movimiento de los carros se produce por la tracción del cable de acero desde la sala de máquinas, es necesario evitar que, producto de la catenaria del cable, éste llegue a rozar con la loza y produzca un desgaste sobre el mismo. Para ello, el plano de rodadura cuenta con una estructura denominada *colleras de polines* (Figura N.º 3.13), distanciados una cantidad de 10 durmientes entre sí.



Figura N.º 3.13: Collera de polines.

En la zona del cruce de vías, la *collera de polines* pierde efecto debido al desplazamiento de la trayectoria de movimiento (Figura N.º 3.14). Es por esta razón que dos colleras antes y después del ingreso al cruce de vías, se modifica la estructura por un *polín de desvío* o bien, *polín guía* (Figura N.º 3.15). La función de estos polines es permitir el movimiento del carro en la zona curva del riel sin que el cable se salga de los polines, de esta forma se evita el contacto entre el cable y la loza.



Figura N.º 3.14: Zona de ingreso al cruce de vías.



Figura N.º 3.15: Polines guía en zona de ingreso/salida cruce de vías.

3.3.2 Sala de máquinas

El mecanismo de operación del funicular se basa en un sistema alimentado por un motor trifásico cuya potencia nominal de 105 HP permite transmitir la potencia mediante una serie de reducciones hasta la polea de tracción. La primera reducción es la secuencia existente desde el motor (Figura N.º 3.16 - 1) a la *volante de inercia* (Figura N.º 3.16 - 2) por medio de una correa de banda (Figura N.º 3.16 - 3).

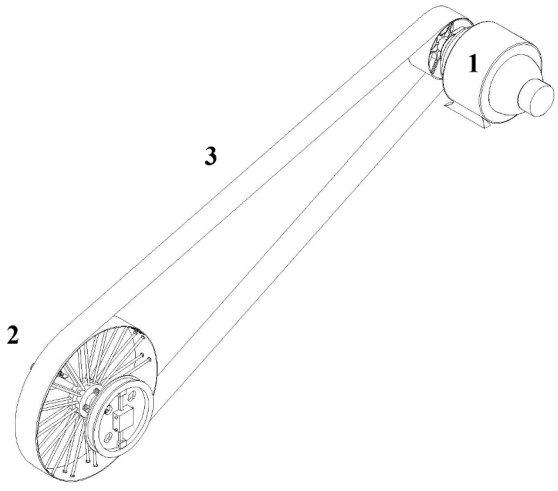


Figura N.º 3.16: Primera reducción, motor - volante de inercia.

La *volante de inercia* se encuentra en uno de los extremos del *eje N.º 1* (Figura N.º 3.17 - 1), sobre éste se acoplan 3 poleas bipartidas además de la ya mencionada. La segunda volante corresponde al *freno de servicio* (Figura N.º 3.17 - 2), el cual es accionado y regulado manualmente por el maquinista desde la sala de control. La tercera y cuarta volante (Figura N.º 3.17 - 3) están relacionadas con el *freno de emergencia*, sistema electromecánico de activación ya sea por el gálibo *de sobrerrecorrido* del andén o por el *dispositivo de presencia* en la sala de control.

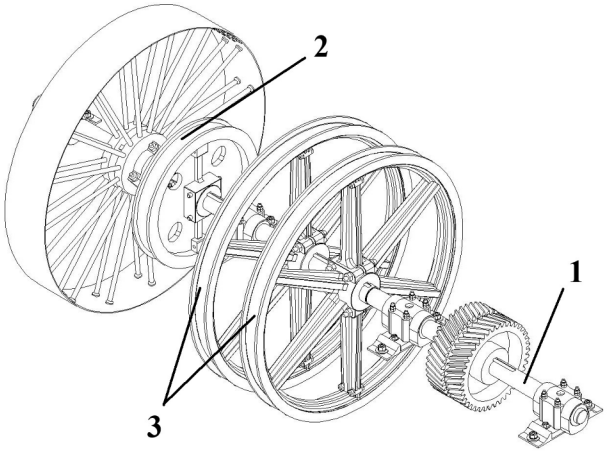


Figura N.º 3.17: Disposición de componentes en Eje N.º 1.

Como se aprecia en la Figura N.º 3.17, la potencia transmitida al eje por la correa de banda llega a la segunda reducción. La secuencia continúa con dos engranajes chevrón (Figura N.º 3.18 - 1), transmitiendo la potencia desde el *eje N.º 1* al *eje N.º 2* (Figura N.º 3.18 - 2).

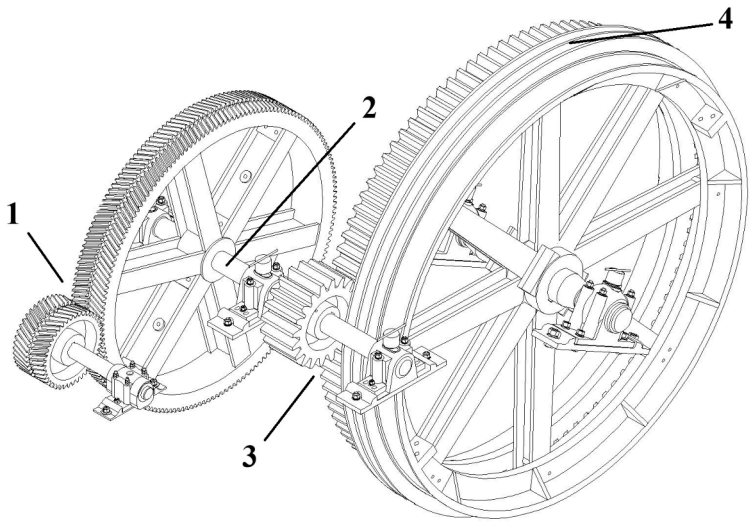


Figura N.º 3.18: 2ª y 3ª reducción.

La última reducción del sistema se debe a los engranajes rectos en relación 20:104 que conectan el *eje N.º 2* con el *eje N.º 3* (Figura N.º 3.18 - 3). Sobre este último está montada la *polea de tracción*, una polea bipartida de aproximadamente 5 metros de diámetro de doble garganta adosada al engranaje (Figura N.º 3.18 - 4). La transmisión de potencia, sin embargo, no termina en la polea de tracción ya que el funicular posee un único cable de acero el cual ingresa a la sala de máquinas, rodea la primera garganta para luego bajar al pozo [13] (situado en un sótano bajo los pies del maquinista) donde se ubica la *polea de reenvío* (Figura N.º 3.19 – 1). Esta polea es también de doble garganta, por lo que la trayectoria del cable entre ambas poleas proyecta una geometría similar al número 8 (Figura N.º 3.19 - 2).

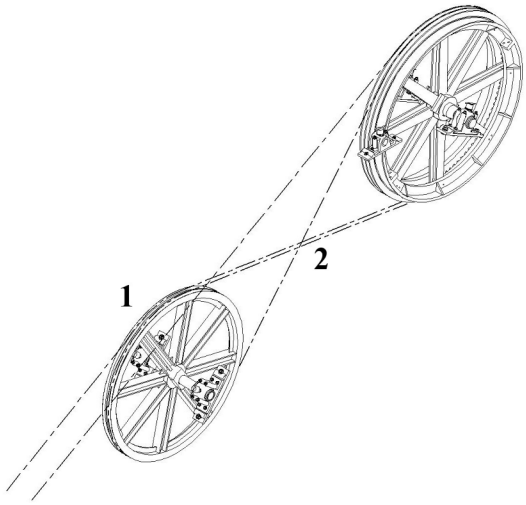


Figura N.º 3.19: Polea de tracción y reenvío, doble garganta.

3.3.3 Carros

La estructura de los carros presenta quiralidad, es decir, que no se pueden superponer con su imagen reflejada en un espejo (carro N.º 1 quiral del carro N.º 2), además, se puede considerar a los carros como un nuevo macrosistema dividido entre la carrocería y el chasis detallados a continuación.

- Carrocería

La carrocería se conforma de 5 módulos o espacios a los cuales pueden acceder los visitantes, enumerados en forma sucesiva y ascendente. El quinto módulo es el que posee la mayor superficie, siendo éste el que se utiliza como acceso universal para personas con movilidad reducida. Otra característica del carro es que los módulos extremos (primer y quinto módulo), poseen una panorámica libre otorgando una vista libre de obstáculos tanto de Santiago como del trayecto. Los módulos intermedios (dos, tres y cuatro) poseen una dimensión menor, pero incorporan asientos y una cubierta vidriada para disfrutar del viaje (Figura N.º 3.20).



Figura N.º 3.20: Sistema – carrocería año 2022.

- Chasis

El chasis es la parte inferior del carro, lo que no se puede ver a simple vista pero que soporta sobre sí la carrocería completa e integra los mecanismos de rodaje. Si bien la carrocería incorpora una gran cantidad de aspectos de ingeniería, es en el chasis donde interactúan todos los sistemas que permiten el movimiento controlado del carro (Figura N.º 3.21). Desglosando la morfología de los carros, se presenta una gran cantidad de piezas y mecanismos que a primera vista no son sencillos de comprender, por lo que el sistema chasis se subdivide en tres: *estructura* (Figura N.º 3.22 - 1), *freno de emergencia* (Figura N.º 3.22 - 2) y *sistema de rodado* (Figura N.º 3.22 - 3).

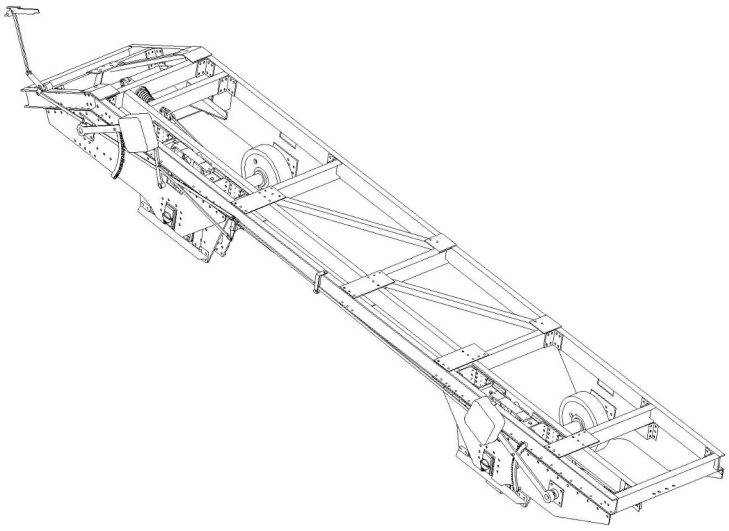


Figura N.º 3.21: Sistema - chasis.

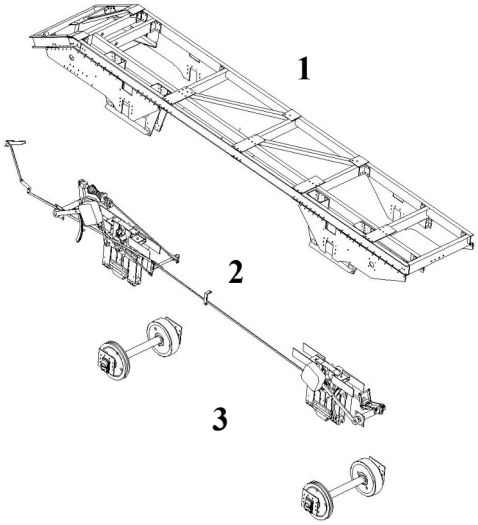


Figura N.º 3.22: Sistema - chasis desglosado.

- Estructura

La estructura del chasis se compone de vigas UPN 180 y UPN 220, ángulos laminados 70x70 mm y 60x60 mm además de planchas de acero con 12 mm de espesor. Esto otorga una adecuada rigidez estructural además de distribuir las cargas y permitir la integración entre los subsistemas. La *estructura* se descompone entre un plano horizontal de 1.115 mm de longitud (Figura N.º 3.23 - 1) y plano inclinado de 30° respecto a la horizontal (Figura N.º 3.23 - 2), con una longitud total de 7.825 mm.

El ancho de los carros es de 1.517 mm y no presenta cambios a lo largo de la estructura. Dada la fecha de fabricación del funicular, el empalme o traslape de componentes es por medio de uniones remachadas o bien apernadas como se observa en la Figura N.º 3.23.

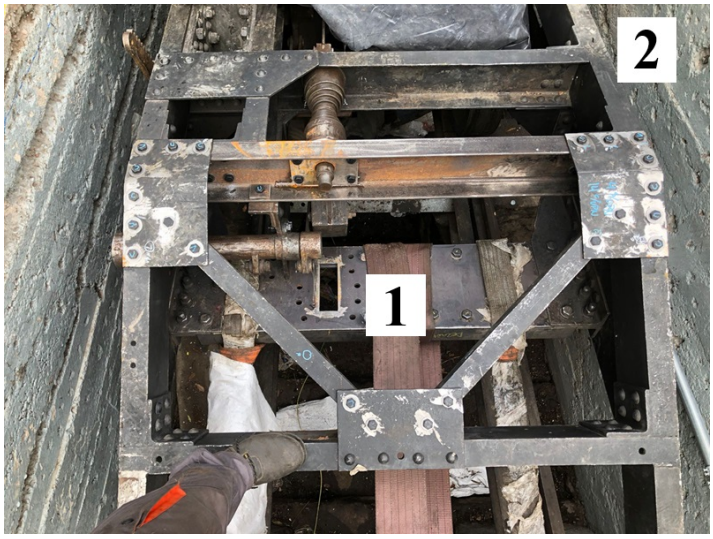


Figura N.º 3.23: Vista superior plano horizontal, estructura, chasis.

En la Figura N.º 3.24 - 1 se observa el eje delantero del carro N.º 2 además de la rueda plana (Figura N.º 3.24 - 2). Para diferenciar los carros observando los chasis, debe identificarse la ubicación de la rueda plana, si ésta se encuentra hacia el oriente de Santiago, implica que el carro observado es el N.º 2, de lo contrario, es decir, la rueda plana hacia el poniente, el usuario está observando el carro N.º 1. Como no es posible identificar el oriente del poniente en las imágenes, se debe analizar la inclinación del carro respecto a las escaleras de la Figura N.º 3.24, al compararla con la Figura N.º 3.1, se concluye que la derecha de las imágenes representa el oriente.

Al otro lado del eje se encuentra la rueda guía, debajo de los componentes indicados en la Figura N.º 3.24 - 3, su perfil es igual a la rueda plana con la diferencia de que posee una pestaña o labio cuyo diámetro es mayor al de la rueda plana con un espesor de 12 mm la cual le permite al carro deslizar esta pestaña por el borde de la cabeza del riel y, de esta forma, poder ingresar en la zona curva del cruce.

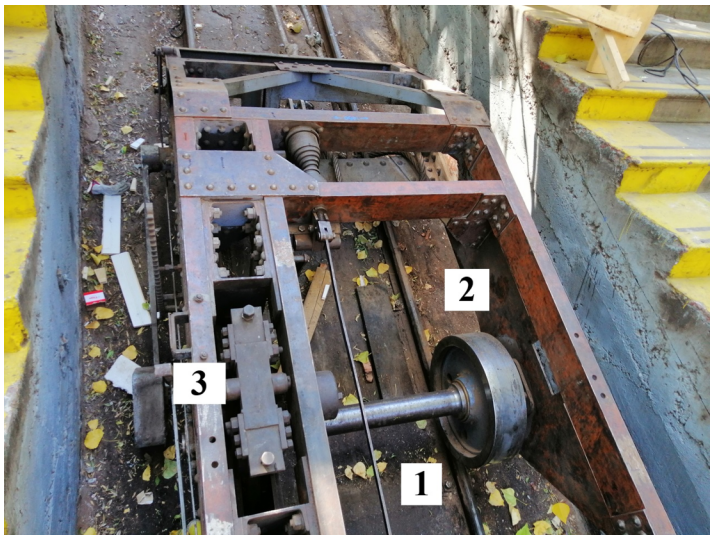


Figura N.º 3.24: Vista principal estructura, chasis.

- Sistema de rodado

El sistema de rodado permite el movimiento al carro, consta de dos ejes compuestos por una rueda guía y uno plano. Como su nombre lo indica la rueda guía es la encargada de dirigir el movimiento del carro ya que tiene una pestaña que le permite deslizar por el costado del riel mientras que la rueda plana únicamente rueda por sobre la cabeza del riel. En cada extremo del eje, por la parte exterior del carro, se ubica un buje el cual soporta las cargas radiales del eje, este buje tiene un habitáculo en el cual se deposita el aceite utilizado para lubricar la zona y así reducir el desgaste del mismo (Figura N.º 3.25).



Figura N.º 3.25: Buje y depósito de aceite para lubricación.

- Freno de emergencia

Este subsistema consta de una gran cantidad de componentes los cuales poseen una cadena cinemática compleja que se explica a continuación. El primero de estos mecanismos se denomina *timonería primaria*, y su componente inicial corresponde al *brazo de suspensión* (Figura N.º 3.26). Éste posee en uno de los extremos un casquete bipartido el cual actúa como mordaza sobre el cable (Figura N.º 3.27). Esta pieza contempla una perforación pasante en su centro con un pasador para actuar como pivote (Figura N.° 3.28), por lo que al considerar el diagrama de fuerzas bajo el cual se encuentra sometido, la tracción que genera el cable al sostener el peso del carro provoca un momento sobre la pieza proyectando la carga sobre la *horquilla A*.



Figura N.º 3.26: Geometría brazo de suspensión.



Figura N.º 3.27: Casquete bipartido.

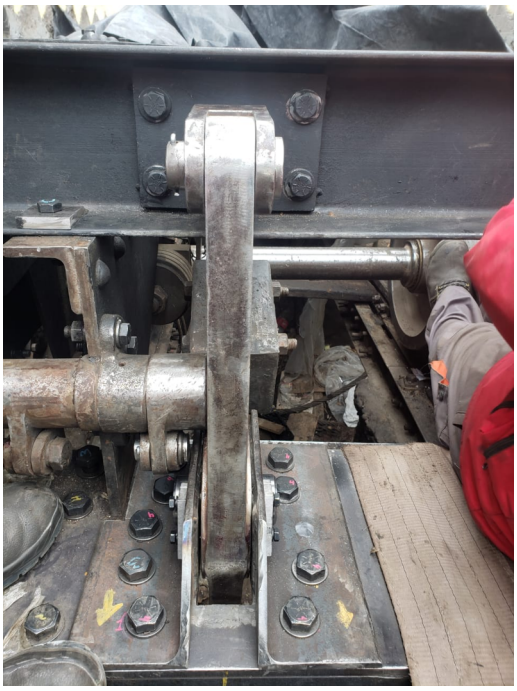


Figura N.° 3.28: Brazo de suspensión - timonería primaria.

Sobre el *eje A* se ubica el *mecanismo de amortiguación*, compuesto por dos separadores de goma, dos tapas y un par de *resortes planos helicoidales cónicos* encontrados en el punto medio por medio de un anillo metálico que actúa de tope, permitiendo que los resortes se mantengan efectuando carga uno sobre el otro. Ese mecanismo asegura la cadena cinemática ya que, al liberarse la tensión del cable, los resortes aseguran el desplazamiento del eje desde una posición x_0 a una posición x_1 "abriendo" el circuito (Figura N.º 3.29).

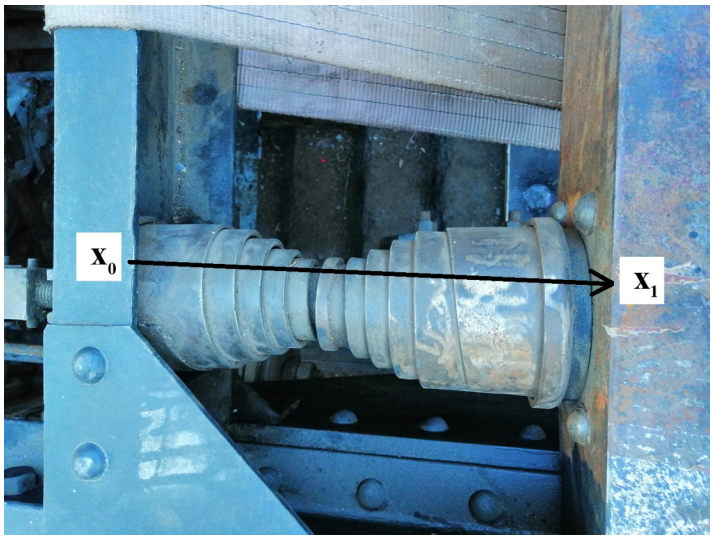


Figura N.º 3.29: Mecanismo de amortiguación.

En el otro extremo del e*je A* se acopla un *anillo roscado* cuya función es actuar como regulador de posición y limitar el movimiento del eje, cuenta además con una segunda horquilla denominada *horquilla B* (Figura N.º 3.30 - 1). Sobre el *anillo roscado* se asientan dos *escuadras*, una a cada lado del eje A, mediante un pasador a los *soportes tipo P* (Figura N.º 3.30 - 2). Las escuadras mencionadas se encuentran apernadas a una barra en cuyo extremo se encuentra el *plomo interno* (Figura N.º 3.30 – 3) el cual cae por efecto de la gravedad y permite la rotación de las escuadras.

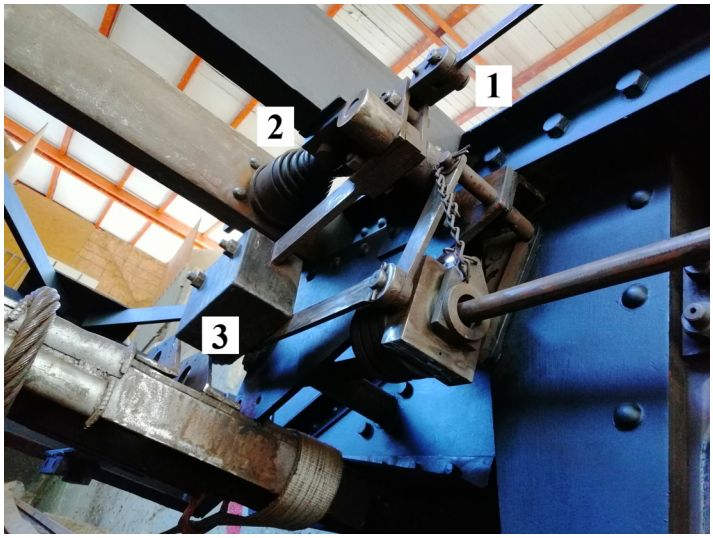


Figura N.º 3.30: Timonería primaria, continuación.

Apernada a la *horquilla B* se encuentra la *barra de accionamiento* la cual conecta la horquilla con la *biela primaria* (Figura N.º 3.31 - 1). Ésta, al ser traccionada, permite la rotación del *eje B* (Figura N.º 3.31 – 2) al cual se encuentra acoplada mediante el uso de una chaveta de cuña con cabeza. La disminución de diámetro del *eje B* permite el acoplamiento al componente denominado *bieleta*, cuya geometría es simétrica con respecto a su eje central. En sus dos extremos cuenta con dos perforaciones pasantes en donde, mediante uniones empernadas, se conectan tres nuevas barras por la parte exterior del carro.

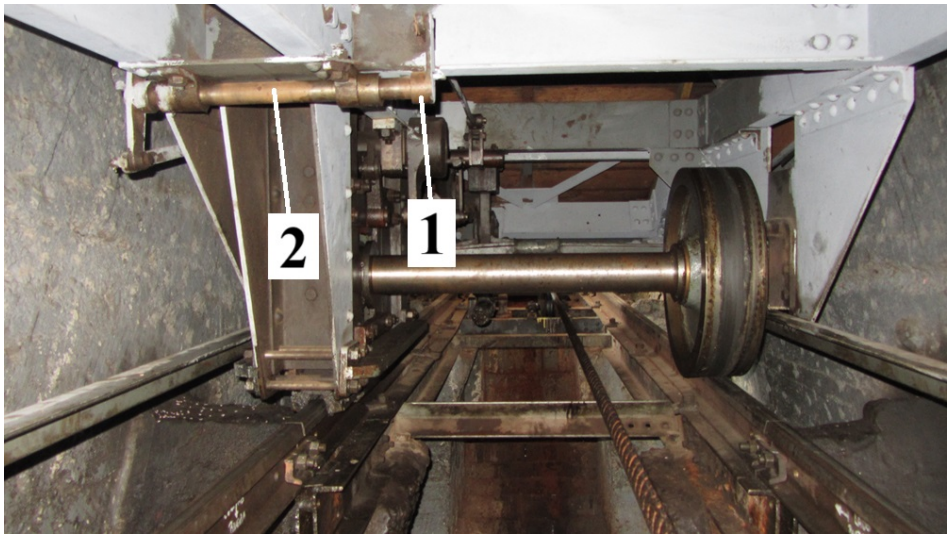


Figura N.º 3.31: Biela primaria y eje B.

En la perforación superior de la *bieleta* interactúan dos de las 3 barras mencionadas, una corresponde a la *barra de accionamiento simultáneo* (Figura N.º 3.32 - 1), cuya función es propagar la cadena cinemática desde el eje delantero hacia el eje trasero. La otra corresponde a la *barra de accionamiento manual* (Figura N.º 3.32 - 2) accionada directamente por el conductor del carro desde el módulo N.º 5. En la perforación inferior se encuentra la *barra de tracción* (Figura N.º 3.32 - 3) la cual se encarga de liberar el soporte del *plomo exterior* (Figura N.º 3.32 - 4).

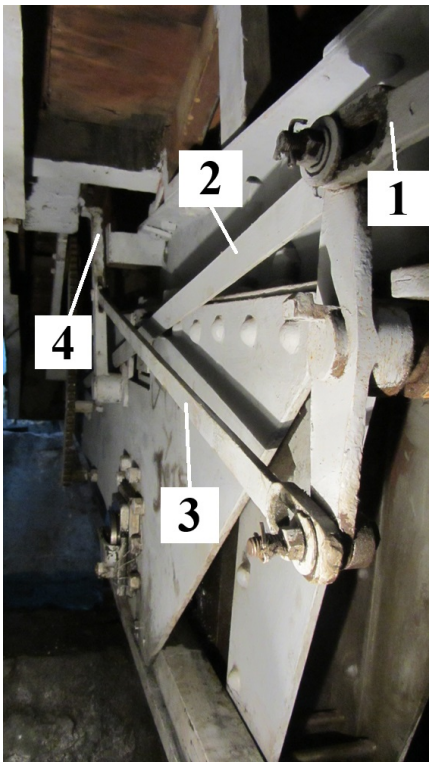


Figura N.º 3.32: Bieleta y barras de accionamiento.

Al ser accionada la *timonería primaria*, se libera el plomo exterior cayendo por efecto de la gravedad, provocando la rotación del eje sobre el cual está montado. Esta acción sitúa el inicio del siguiente mecanismo en la cadena cinemática, la *timonería secundaria*.

Al rotar el *eje C* (Figura N.º 3.33 - 1) por accionamiento del *plomo exterior,* provoca el giro de la *biela secundaria* (Figura N.º 3.33 - 2) y las dos barras de acople situadas en ambos costados de un dado metálico (Figura N.º 3.33 - 3) generan la tracción del *eje D*. En el otro extremo del eje, se encuentra roscada la *horquilla C* la cual interactúa con la *biela terciara* (Figura N.º 3.33 - 4), provocando un movimiento rotacional de ésta sobre su propio eje dando paso al último mecanismo del freno denominado *freno paracaídas*.

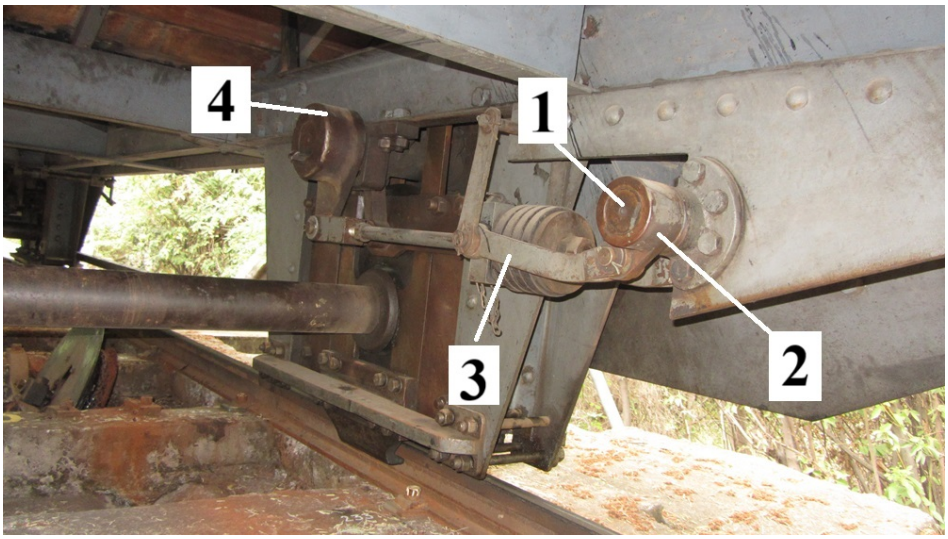


Figura N.º 3.33: Timonería Secundaria.

El *eje de bielas* posee cuatro *bielas de accionamiento* dispuestas sobre sí que, por efecto de la rotación del eje, permite que actúen de a pares. El primer par reciben el nombre de *bielas inferiores* (Figura N.º 3.34 - 1), las cuales actúan en compresión desplazando las *ménsulas* (Figura N.º 3.34 - 2) cuya geometría permite el accionamiento simultáneo de dos *placas de compresión* (Figura N.º 3.34 - 3) dispuestas verticalmente y perpendiculares al *plano de rodadura*. En la parte inferior de las placas, justo por sobre el riel se encuentra el último componente de esta cadena el cual corresponde al *patín de freno* señalado en la Figura N.º 3.36. Esta pieza utiliza dos placas de bronce las cuales entran en contacto con el riel al momento de ser accionado el sistema.

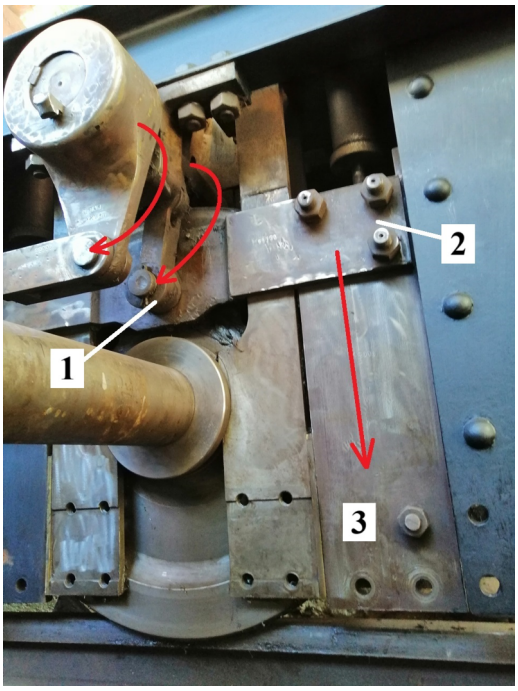


Figura N.º 3.34: Freno paracaídas.



Figura N.º 3.35: Patín de freno.

El par de bielas superiores desplazan la *placa de ajuste y nivelación* (Figura N.º 3.36 - 1) que se encuentra en la parte superior del mecanismo del *freno paracaídas*. Esta placa de accionamiento cuenta con tornillos en los extremos (Figura N.º 3.36 - 2) cuya función es ajustar la posición de la *garra* (Figura N.º 3.37 - 1) con tal de que, al momento de accionar el *freno paracaídas*, ésta entre en contacto con la parte inferior de la cabeza del riel.

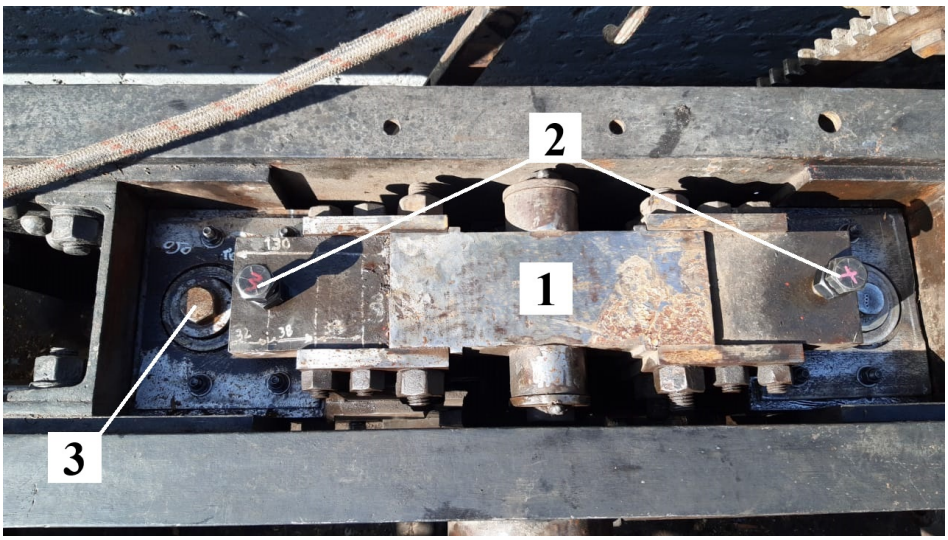


Figura N.º 3.36: Placa de ajuste y nivelación.

Al igual que con la ménsula, la *placa de ajuste y nivelación* utiliza ejes roscados para posicionar cuatro *placas de tracción* desde la parte superior del mecanismo hasta la cota inferior de la rueda, esto permite ajustar la posición de la *garra* para que, al momento de ser accionado el sistema, ésta entre en contacto de forma paralela con el riel (Figura N.º 3.37). Como los componentes actúan de a pares y, considerando la simetría entre el eje delantero y trasero, los carros cuentan con cuatro patines con ocho placas de bronce distribuidas entre sí y un par de garras por rueda.

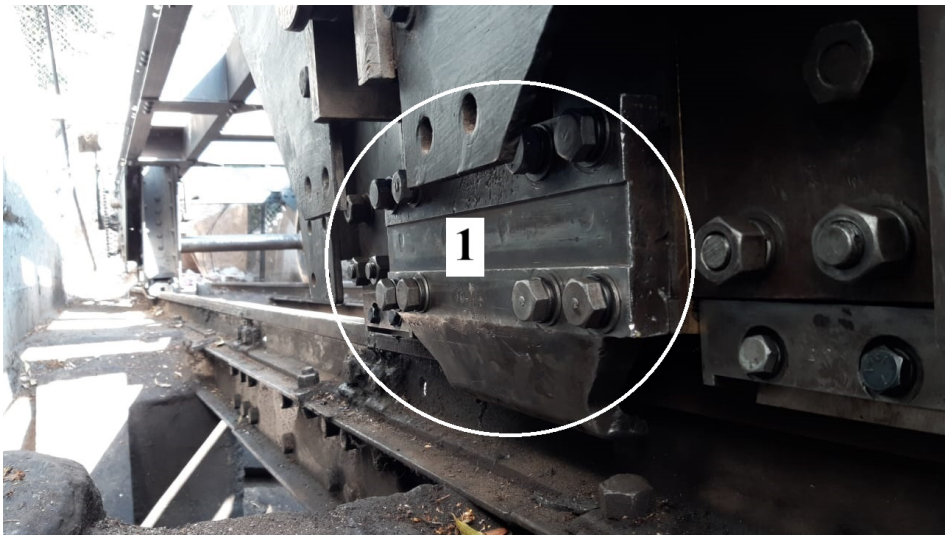


Figura N.º 3.37: Garra y patín de freno.

Una de las funciones de la *placa de ajuste y nivelación* es corregir la posición de la *garra* mediante el posicionamiento vertical de los *patines de freno* para que las placas de bronce no tengan contacto con el riel durante el desplazamiento del carro. Esto se logra al ajustar los pernos señalados en la Figura N.º 3.36 - 3.

El ajuste de los componentes es de suma relevancia para la seguridad operacional del sistema debido a que, una mala regulación de los componentes se traduce en un aumento de roce reduciendo la vida útil de las piezas. Como el sistema funciona con un motor eléctrico, el roce provoca un incremento en la aguja del amperímetro análogo que está ubicado en la sala de control. Estas condiciones pueden ocasionar un cortocircuito o bien, desgaste acelerado de componentes por lo que ante una emergencia o falla, al accionar los mecanismos de seguridad, éstos actúen de manera deficiente sin lograr detener el carro.

3.4 Problemática

Un análisis en conjunto al área de ingeniería y mantenimiento del funicular, permite evidenciar la necesidad de categorizar los componentes del sistema conforme a su criticidad y de esta forma, desarrollar un plan de mantenimiento acorde a los resultados del estudio con el objetivo de enfrentar los problemas a los que se enfrenta el funicular durante la operación.

En primer lugar, para introducir los conceptos de mantenimiento centrado en la confiabilidad es necesario tener datos. Para ello se requiere efectuar mediciones, desarrollar comparativas, ejecutar ensayos, y en general, comprometer los esfuerzos del equipo para interiorizar el concepto de que sólo se puede mejorar aquello que se mide. Bajo esta perspectiva, los mecanismos del *freno de emergencia*, así como el sistema en sí, no cuentan con un registro de información previa a la ejecución del presente documento por lo que la proyección de labores asociadas al mantenimiento, debe considerar como insumo "los recuerdos" del equipo técnico de operación y mantenimiento quienes llevan en la instalación aproximadamente 30 años.

En segundo lugar, conforme a lo mencionado en el párrafo anterior, los problemas y fallos operacionales se "recuerdan" con mayor frecuencia en el *plano de rodadura* y en la *sala de máquinas*. Las estructuras situadas en el plano de rodadura utilizan grasa asfáltica sobre la guarnición de los polines, debido a su alta viscosidad, provoca un incremento en la adherencia del cable a la superficie de la guarnición del polín, es por esta misma razón que aumenta la cantidad de partículas arrastradas por el mismo hacia las poleas. Éstas, al utilizar el mismo tipo de grasa, provocan en el tiempo desgaste sobre la garganta de las poleas, debido a la formación de una pasta abrasiva compuesta de grasa y polvo, lo cual se puede traducir eventualmente en un deslizamiento del cable sobre el canal de las mismas.

Por último, el hecho de que el funicular posea tanta antigüedad, además, de ser patrimonio declarado genera complicaciones en temas de abastecimiento de repuestos. Esto se debe a que cualquier intervención mayor, en cualquiera de los

sistemas de la instalación, implica elevar los requerimientos a los inspectores técnicos de obra (ITO) y, coordinar las actividades con el *Consejo de Monumentos Nacionales* (CMN), *Servicio de Vivienda y Urbanismo* (SERVIU) o bien, con el *Ministerio de Obras Públicas* (MOP) en caso de ser necesario. Ante una falla crítica el reemplazo de un componente, previa coordinación, implica un estudio para encontrar la causa raíz de la falla, y así medir, diseñar y fabricar una nueva pieza.

En resumen, existen tres problemas fundamentales asociados a la operación y mantenimiento del funicular del Parque Metropolitano:

- Falta de información o data para incorporar confiabilidad en los sistemas.
- Problemas asociados a los mecanismos tribológicos.
- Falta de stock en repuestos críticos.

4 Plan de mantenimiento basado en la confiabilidad

Teniendo en consideración que el objetivo principal del presente documento es realizar un análisis de criticidad y proponer un plan de mantenimiento que esté acorde con las metodologías de confiabilidad, los problemas expuestos en el ítem anterior no deben quedar exentos de atención. Es por esto que a continuación se presenta una serie de soluciones para abordar aquellos problemas:

- Falta de datos para poder incorporar confiabilidad en la instalación

Se propone alcanzar un sistema de mantenimiento robusto desde la perspectiva informática, es decir, construir bases de datos para el análisis de la información, desarrollar reportes para la toma de decisiones, implementar sistemas de registros y notificaciones. Es necesario gestionar los permisos respectivos para la implementación de sensores y gálibos, sistemas electrónicos de bajo impacto visual, con la finalidad de obtener información en tiempo real del estado de los componentes, ubicación de carros en el recorrido, seguridades y el registro autónomo de las horas de funcionamiento del sistema, entre otras variables que puedan ser requeridas en el futuro.

- Fallas en los mecanismos tribológicos

Se propone desarrollar una nueva geometría de los polines considerando el uso de guarniciones en base a polímeros con tal de minimizar la cantidad de partículas que se puedan adherir al cable, manteniendo la carga que ejerce este sobre los polines. Además, se debe considerar un nuevo procedimiento para mantener la lubricación del cable sin el uso de grasas de alta viscosidad, idealmente siguiendo las indicaciones del fabricante. Cabe destacar que tanto la sala de máquinas como los componentes que permiten la tracción y movimiento del carro, involucran una serie de estudios previos con el objetivo de proponer una solución efectiva, por lo que escapan del objetivo principal del presente documento.

- Falta de stock en repuestos críticos

Se propone utilizar los resultados del presente documento como insumo para catalogar componentes críticos, desarrollar planos de diseño y planos de conjunto acompañados de un informe con el objetivo de presentar a los entes gubernamentales un plan de acción ante una falla. Esto permitirá preaprobar intervenciones de distinta magnitud, para ejecutar las acciones correctivas en el menor tiempo posible aumentando la disponibilidad del sistema.

4.1 Mantenimiento basado en la confiabilidad

El *Reliability Centered Maintenance (RCM)* o mantenimiento centrado en la confiabilidad, tiene como principio preservar las funciones de un activo o sistema. Si bien se considera como algo inherente al mantenimiento, se debe considerar que existen dos líneas fundamentales en el manejo de activos, uno de ellos es la modificación en cualquiera de los niveles de composición mientras que la otra corresponde al mantenimiento de éstos, de ahí la trascendencia en el tiempo. Además, tal y como se propone en capítulo anterior, se deben identificar los modos de falla que puedan afectar las funciones para las cuales el sistema está diseñado y así, priorizar los esfuerzos en las necesidades generadas por los modos de falla. Para ello es necesario rediseñar los planes y trabajar de forma conjunta con el equipo buscando tareas que sean sencillas y aplicables a todo nivel. Es posible rescatar de lo señalado que los principios del RCM son:

- Preservar la función del sistema.
- Identificar los modos de falla que puedan afectar las funciones.
- Priorizar las necesidades de función.
- Seleccionar tareas aplicables y sencillas.

4.2 Aplicación del RCM en el carro y subsistema freno de emergencia

El proceso de RCM requiere evaluar la totalidad del sistema, considerando las condiciones y características de cada uno de sus mecanismos y componentes. En la búsqueda de satisfacer sus principios, se plantean 7 preguntas fundamentales:

- ¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo?
- ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones?
- ¿Qué ocasiona cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando se produce cada falla funcional?
- ¿De qué modo afecta cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra el plan de acción apropiado?

Ha quedado estipulado en el documento que el funicular San Cristóbal tiene como objetivo principal el transporte de visitantes de forma rápida, efectiva y segura. Para lo cual es necesario ejecutar un benchmarking con diferentes medios de transporte y rescatar aquellos indicadores que puedan ser utilizados tanto para la operación como el mantenimiento. Uno de ellos puede ser el índice de cumplimiento del plan de mantenimiento, de esta forma será posible analizar cuando y por qué no se están cumpliendo las funciones establecidas para el sistema.

En los carros, al aparecer una falla en los sistemas asociados al desplazamiento de los mismos, provocarán el accionamiento de los mecanismos de emergencia cuya finalidad es detener por completo los carros. Un aspecto a considerar son los procedimientos ante una falla, ya que es necesario evaluar si se debe iniciar la evacuación de pasajeros o si es posible transportar a los visitantes hasta la siguiente estación

Producto de la activación de los mecanismos de seguridad en conjunto con el paso del tiempo es necesario realizar inspecciones tanto a nivel sensorial como instrumental con tal de identificar señales que puedan convertirse, sin el cuidado adecuado, en fallas funcionales que afecten al sistema. Por esta razón es imprescindible llevar un registro de información que permita, por medios probabilísticos, determinar el tiempo de vida remanente del sistema con tal de no ingresar en un rango wear-out o bien, presenciar un fallo en el sistema.

En el caso más extremo, en donde ocurra una falla desconocida y no existan referencias de cómo solucionarla, es necesario atenerse a los protocolos existentes que le permitan tanto a los operadores comerciales como a los conductores, maquinistas y todo el equipo de operaciones y mantenimiento, asegurarse del bienestar de los visitantes y su posicionamiento en zonas seguras para así poder enfocar los esfuerzos en resolver la causa raíz del acontecimiento que llevó a la falla.

4.3 Proceso del RCM

En sí, el RCM se puede considerar como un proyecto sin plazo de término definido debido a que puede ser mejorado conforme el paso del tiempo, esto se debe a que es un proceso dinámico en donde los inputs o la entrada de información se va optimizando y modificando conforme a los requerimientos del equipo, modificaciones ambientales o por las capacidades de los usuarios.

Para desarrollar de manera efectiva el mantenimiento centrado en la confiabilidad, éste debe separarse en tres etapas fundamentales:

- Etapa 1: Identificación de las funciones y el contexto operacional.
- Etapa 2: Identificación de los modos de falla y sus efectos.
- Etapa 3: Toma de decisiones y efectuar un análisis de las consecuencias.

4.3.1 Etapa 1, identificación de las funciones y contexto operacional.

Dada la ubicación geográfica de la instalación, el clima se define como mediterráneo o CSA de acuerdo con el sistema Köppen-Geiger [3], con temperaturas que oscilan entre los -2°en invierno y 35° durante el verano [4], por lo tanto, dependiendo de las fechas y/o el clima, el servicio que se entrega se asemeja con el transporte turístico mas que el transporte urbano dependiendo de la temporada.

Es por esta razón que parte de las labores del equipo de operaciones y mantenimiento son asegurar una correcta manipulación del sistema y asegurar su funcionamiento. Para lograr esto, la operación se apoya de indicadores como *frecuencia* o la *cantidad de carros tirados*. La primera corresponde al tiempo transcurrido entre dos salidas consecutivas desde una misma estación mientras que al otra corresponde a la cantidad de carros desplazados desde la estación Pio Nono hasta la estación Cumbre. De la de descripción anterior, se extrae que cualquier evento que altere estos indicadores puede llegar a comprenderse como una falla en el sistema de acuerdo con las dos primeras preguntas fundamentales del RCM.

4.3.2 Etapa 2, identificación de las fallas, modos y efectos.

Dada la definición de la etapa anterior, es decir, cualquier evento que afecte a los indicadores llevados puede tratarse como una falla, ya sean operacionales o técnicas. Las fallas operacionales quedan fuera del presente estudio ya que implican otros análisis relacionados con el personal en vez de centrarse en el subsistema freno de emergencia el cual corresponde al objetivo principal de este trabajo.

Para el subsistema *freno de emergencia*, gracias al levantamiento efectuado para comprender la cadena cinemática, se identifican las fallas con la siguiente estructura:

- Falla funcional.
    - Modos de falla.
        - Efectos de la falla.

Por consiguiente, se tiene:

- Pérdida de tensión del cable.
    - Deslizamiento del cable en polea de tracción.
        - Desgaste en garganta de la polea.
    - Deslizamiento del cable en *casquete bipartido*.
        - Instalación fuera de servicio, reinstalación de copa del cable.
    - Corte del cable.
        - Instalación fuera de servicio, cambio de cable.
- Activación *freno de emergencia* involuntario.
    - Fractura de un componente de la cadena cinemática.
        - Instalación fuera de servicio, fabricación de nuevo componente.
    - Desgaste excesivo en *medialuna*.
        - Instalación fuera de servicio, fabricación de nuevo componente.
    - Vibraciones excesivas sobre el carro.
        - Estudio e investigación calidad superficial ruedas y rieles.
        - Reperfilado de rieles.

- Subsistema *freno paracaídas* no detiene el sistema de forma adecuada.
    - Desgaste fuera de rango en piezas de sacrificio.
        - Cambio de pieza.
    - Pérdida de reglajes en mecanismos de ajuste.
        - Reajuste y calibración de mecanismos.
    - Sobrecarga de visitantes en el carro.
        - Revisar operación comercial.
- Accionamiento manual *freno de emergencia* no funciona.
    - Cable cortado.
        - Cambio de cable
    - Deslizamiento en grampas grillete.
        - Ajuste de las mordazas.
        - Cambio de grampas
        - Cambio de cable.

4.3.3 Etapa 3, toma de decisiones y análisis de consecuencias.

Para poder tomar decisiones bien fundamentadas, se desarrolla una matriz de criticidad utilizando como referencia lo estipulado en la norma *ISO 14224* [7], asignando un valor de 1 a 4 para cada una de las categorías. Una de las categorías bajo análisis en la norma de referencia es el medioambiente pero, dado que las fallas presentadas tienen un impacto mínimo o bien nulo en el medioambiente, se toma la decisión de retirar esta categoría ya que su incremento en el total de puntuación por falla es el mínimo.

Tabla 1: ISO 14224 – Clasificación de consecuencias de falla.

Consecuencia	**Categoría**			
	Catastróficas: Falla que resulta en fatalidades o pérdida del sistema.	Severas: Lesión o enfermedad severa o daño mayor al sistema.	Moderadas: Lesión o enfermedad leve o daño menor al sistema.	Menores: Menos que lesión o enfermedad leve o daño menor al sistema.
Seguridad	Pérdida de vidas. Sistemas críticos para la seguridad inoperables	Lesión grave a personal. Potencial de pérdida de funciones de seguridad.	Lesiones que requieren de tratamiento médico. Efecto limitado en funciones de seguridad.	Lesiones que no requieren de tratamiento médico. Efecto menor en funciones de seguridad.
Medioambiente	Contaminación mayor.	Contaminación significativa.	Contaminación.	Ninguna contaminación o contaminación insignificante.
Producción	Interrupción extendida en producción/ operación.	Interrupción en producción sobre el límite aceptable.	Interrupción en producción debajo del límite aceptable.	Interrupción menor en producción.
Operacional	Muy alto costo de mantenimiento.	Costo de mantenimiento sobre nivel normal aceptable.	Costo de mantenimiento en o debajo de nivel normal aceptable.	Bajo costo de mantenimiento.

Tabla 2: Matriz de criticidad.

Falla funcional	Seguridad	Producción	Operacional	Total
Pérdida de tensión por deslizamiento en polea.	3	4	4	11
Pérdida de tensión por deslizamiento en casquete.	1	2	2	5
Pérdida de tensión por corte de cable.	3	4	3	10
Activación involuntaria por fractura de componente.	1	4	2	7
Activación involuntaria por desgaste en *medialuna*.	1	1	1	3
Activación involuntaria por vibraciones excesivas.	1	2	4	7
Subsistema no detiene correctamente por desgaste de piezas.	4	2	1	7
Subsistema no detiene correctamente por reglajes.	4	2	1	7
Subsistema no detiene correctamente por sobrecarga.	1	1	1	3
Accionamiento manual no funciona por corte de cable.	4	2	2	8
Accionamiento manual no funciona por grilletes.	4	1	1	6
Total	27	25	22	-

Al considerar el valor mínimo por categoría en una falla, el puntaje obtenido es de 3 puntos, por el contrario, al considerar el valor máximo por categoría, su puntaje corresponde a 12 puntos. Al momento de establecer los rangos para la categorización de la falla, se tienen 2,25 puntos por rango. Dado que se está trabajando con números enteros, cada una de las categorías se separarán cada 2 puntos pero, con el objetivo de ser conservadores e incrementar el rango de la última catagoría, ésta se establece con un rago de 3 puntos.

Considerando lo establecido en el párrafo anterior, la categorización por criticidad según lo establecido en la Tabla 1 queda de la siguiente forma:

- Leve [3,5[
- Moderada [5,7[
- Severa [7,9[
- Catastrófica [9,12]

Los resultados obtenidos señalan que el listado de fallas funcionales desglozadas en el ítem anterior se separan en 2 fallas con una criticidad leve, 2 fallas catalogadas como moderadas, 5 como severas y finalmente 2 fallas que se catalogan como catastróficas.

5 Programación y ejecución del plan de mantenimiento

5.1 Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento se genera para establecer una metodología estratégicamente planificada en la que se busca intervenir los diferentes equipos disminuyendo al mínimo posible las pérdidas de producción y establecer parámetros de disponibilidad operacional dentro de la organización.

Un plan de mantenimiento se enfoca en base a los objetivos y metas que busca la organización, pero en la mayoría de los casos la conservación de sus activos es fundamental para generar ingresos, por lo tanto, conservar el funcionamiento de manera eficaz y eficiente de cada componente del activo es sin duda el enfoque principal.

El reemplazo o reparación no está condicionado al estado del componente, puesto que se busca evitar que la falla ocurra cuando el equipo esté en funcionamiento. Por ende, la información o señales entregadas por los componentes son de vital importancia y se identifican mediante la realización de inspecciones periódicas y, en el caso de que ocurran, un exhaustivo análisis al tipo de falla en el cual se está incurriendo. De esta forma se puede prevenir una intervención de emergencia por las mismas causas en el futuro.

Es fundamental que, dentro de la organización la tarea sea igualitaria y con un fin en común, esto para preservar el cuidado que requiere el mantenimiento, por lo tanto, cada integrante debe colaborar con la mantenibilidad de los equipos, aplicando de la mejor forma las diferentes estrategias planteadas para llegar a la resolución del problema.

5.2 Programación

Se debe considerar de antemano que en Chile no existe normativa que pueda aplicarse para regular los aspectos de operación y mantenimiento de funiculares, como si lo hay para ascensores inclinados y teleféricos. Los funiculares son considerados dentro de la categoría de transporte por cable, por lo que, la planificación y programación de las correspondientes actividades a desarrollar se pueden adaptar de la normativa *UNE EN 1709:2004* [14].

En lo que respecta a los carros, el equipo de mantenimiento de la concesión plantea una serie de actividades que contemplan verificaciones, ajustes, lubricación y limpieza como aspectos generales con periodicidades semanales, quincenales, mensuales, bimestrales, semestrales y anuales de acuerdo con el siguiente esquema.

5.2.1 Estructura chasis

Tabla 3: Plan de mantenimiento a estructura chasis.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Inspección visual del estado general de la estructura.	Mensual	-	-	-
Chequeo del estado y fijación de remaches y empernaduras.	Mensual	-	-	-
Reapriete de empernaduras.	-	Semestral	-	-
Control de eventuales soldaduras.	Mensual	-	-	-
Limpieza y aplicación de esquema de pintura anticorrosiva y de terminación en puntos corroídos.	Semestral	-	-	-

5.2.2 Estructura carrocería

Tabla 4: Plan de mantenimiento a paredes, piso y recubrimiento exterior.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Inspección visual del estado general.	Semanal	-	-	-
Limpieza y aplicación de esquema de pintura anticorrosiva y de terminación en puntos corroídos.	Semestral	-	-	-
Revisar techos e impermeabilidad de estos.	Quincenal	-	-	-
Limpiar techos a modo de permitir visibilidad.	Quincenal	-	-	-

Tabla 5: Plan de mantenimiento a puertas y sistemas mecánicos asociados.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Verificación del correcto estado, montaje y fijación de las ruedas. Descartar visualmente presencia de fisuras.	Semanal	-	-	-
Lubricación de mecanismos.	Semestral	-	-	-

5.2.3 Elementos de rodadura

Tabla 6: Plan de mantenimiento asociado a ruedas.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Verificación del correcto estado, montaje y fijación de las ruedas. Descartar visualmente presencia de fisuras.	Bimestral	-	-	-
Análisis con tintas penetrantes para descartar presencia de micro fisuras.	Anual	-	-	-

Tabla 7: Plan de mantenimiento asociado a ejes.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Inspección visual del estado de ejes.	Mensual	-	-	-
Análisis con tintas penetrantes para descartar presencia de micro fisuras.	Anual	-	-	-

Tabla 8: Plan de mantenimiento a soportes de ejes - chumaceras.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Chequeo de la correcta lubricación de chumaceras.	Semanal	-	-	-
Verificación de la fijación de soportes a sus bases.	Semestral	-	-	-
Observación – percepción del nivel de vibraciones presente en soportes.	Semestral	-	-	-
Reapriete de empernaduras.	-	Semestral	-	-

5.2.4 Sistema paracaídas (Freno de emergencia)

Tabla 9: Plan de mantenimiento al subsistema de disparo por aflojamiento del cable de tracción.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Chequeo del correcto montaje y ajuste de los componentes, piezas y partes.	Mensual	-	-	-
Aseo general.	-	-	-	Mensual
Lubricación de componentes.	-	-	Mensual	-
Realización de prueba standard al subsistema de disparo por aflojamiento del cable de tracción (según normativa vigente).	Semestral	-	-	-
Reapriete de empernaduras.	-	Semestral	-	-

Tabla 10: Plan de mantenimiento al subsistema de disparo manual.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Chequeo del correcto montaje y ajuste de los componentes, piezas y partes.	Mensual	-	-	-
Aseo general.	-	-	-	Bimestral
Lubricación de componentes.	-	-	Mensual	-
Realización de prueba standard al subsistema de disparo manual.	Semestral	-	-	-
Reapriete de empernaduras.	-	Semestral	-	-

Tabla 11: Plan de mantenimiento a los subsistemas mecánicos de accionamiento.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Chequeo del correcto montaje y ajuste de los componentes, piezas y partes.	Mensual	-	-	-
Aseo general.	-	-	-	Mensual
Lubricación de componentes.	-	-	Mensual	-
Verificación de los reglajes del mecanismo	Trimestral	-	-	-
Reapriete de empernaduras.	-	Semestral	-	-

Tabla 12: Plan de mantenimiento al subsistema de acuñamiento.

Actividad planificada	Periodicidad			
	Verificar	Ajustar	Lubricar	Limpiar
Chequeo del correcto montaje y ajuste de los componentes, piezas y partes.	Mensual	-	-	-
Aseo general.	-	-	-	Mensual
Lubricación de componentes.	-	-	Mensual	-
Verificación del correcto funcionamiento de los dispositivos de accionamiento y acuñamiento del paracaídas (en paralelo con las pruebas a los subsistemas de disparo).	Semestral	-	-	-
Medir el desgaste presente en las piezas de sacrificio.	Trimestral	-	-	-
Reapriete de empernaduras.	-	Semestral	-	-

5.3 Ajuste de datos para distribución de Weibull

Tal y como se presenta en el ítem 3.4, el funicular del cerro San Cristóbal no cuenta con información ni registros sobre los cuales se pueda realizar de forma efectiva un ajuste de datos o bien, cualquier tipo de análisis. Al considerar este documento como marco de referencia en la búsqueda de incorporar confiabilidad en el plan de mantenimiento, es que se detallan los pasos necesarios para ejecutar a futuro un análisis de fallas y lograr desarrollar modelos como el presentado a continuación.

La prima del presente documento es incorporar la metodología de confiabilidad con el objetivo de optimizar los tiempos de mantenimiento, consolidar las fallas y reducir los costos de mantenimiento. Para ello se desarrolla una hoja de vida cuyo propósito es resolver la incógnita de *"¿Cómo incorporar confiabilidad en el mantenimiento?"*.

La confiabilidad es, conceptualmente, la probabilidad de que un componente o activo tenga un correcto funcionamiento durante un tiempo determinado. De acuerdo con la definición anterior, el modelo probabilístico que más se adecúa a los parámetros asociados al ciclo de vida de un elemento es el *Modelo de Weibull*, en donde se consideran las siguientes relaciones:

$$R(t)=e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{2}} \tag{1}$$

$$f(t)=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}} \tag{2}$$

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \tag{3}$$

$$E(t)=\gamma+\alpha\,\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{4}$$

Donde:

- γ: corresponde a la constante de localización, es expresada en las mismas unidades de t y define el punto de partida o el origen de la distribución.
- α: corresponde a la constante de escala, o bien, el alargamiento de la distribución en el eje del tiempo. Cuando $t-\gamma=\alpha$ la confiabilidad es constante e igual a $R(t)=36,8\%$; esta constante representa el tiempo medido desde γ, para el cual el $63,2\%$ de la población puede haber fallado, esto para cualquier valor de β. Por esta razón α es también llamado *característica de vida*.
- β: corresponde a la constante de forma, este parámetro controla las alteraciones de la distribución. Pueden darse tres casos:
    - $\beta<1 \rightarrow \lambda(t)$ es decreciente.
    - $\beta=1 \rightarrow \lambda(t)$ es constante.
    - $\beta>1 \rightarrow \lambda(t)$ es creciente.
- $R(t)$: corresponde a la confiabilidad del sistema.
- $f(t)$: corresponde a la probabilidad de falla instantánea.
- $\lambda(t)$: corresponde a la tasa de falla del sistema.

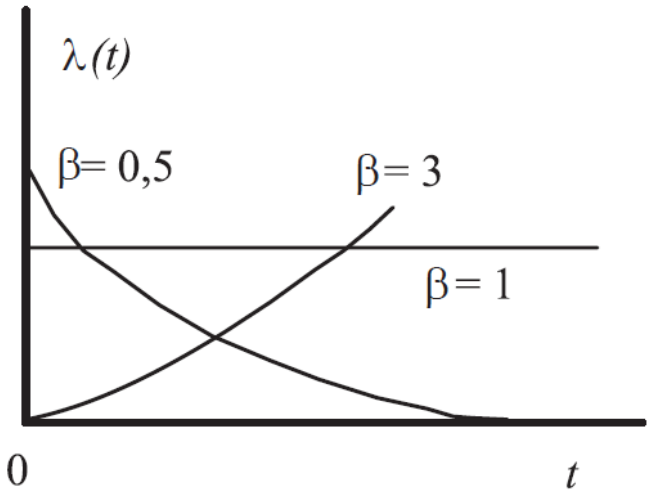


Figura N.º 5.1Comportamiento del parámetro beta.

Los parámetros del modelo de Weibull se deben estimar dependiendo de las condiciones del sistema y para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

- Construir a partir de los datos experimentales la función de falla acumulada $F(t)$ del sistema o componente.
- Determinar los parámetros del modelo.

5.3.1 Determinación de la función de falla acumulada

Opción 1, método de rangos promedio: La función de falla acumulada puede ser obtenida utilizando el método de rangos promedio a través de la *aproximación de Benard*.

$$F(t_j)=\frac{K_j-0.3}{N_0+0.4} \tag{5}$$

Donde:

- $F(t_j)$: Probabilidad de fallas acumuladas al tiempo t_j.
- K_j: N° de eventos (fallas) que han ocurrido hasta el tiempo t_j.
- N_0: N° total de eventos.

Opción 2, cálculo del ranking ajustado con datos censurados a la derecha: Es normal observar entre los datos experimentales que se dispongan, además del tiempo que un elemento operó hasta la falla, el tiempo de operación de un elemento hasta que éste fuese reemplazado en un momento previo a que evidenciara una falla. Esto significa que estamos frente a tiempos censurados a la derecha, es decir, el tiempo de operación del elemento fue suspendido, por acción preventiva, sin conocer cuánto tiempo adicional habría funcionado hasta fallar.

El ajuste de la posición de las fallas se realiza determinando la posición media de estos eventos. La metodología consiste en ajustar el ranking de fallas, considerando las posiciones probables de los datos suspendidos y asociando la posición media a las fallas observadas.

$$r_j = r_{j-1} + \frac{N+1-r_{j-1}}{N+1-(k_j-1)} \tag{6}$$

Donde:

- r_j: Posición media de la falla j.
- k_j: Ranging global de eventos.
- N: Número de eventos totales (correctivos y preventivos)
- $r_0 = 0$

Con el nuevo ranking de fallas ajustado se obtiene la probabilidad de falla acumulada, utilizando la ecuación 5.

5.3.2 Determinación de los parámetros de Weibull

El primer paso es construir la función en su forma lineal. Para la distribución de Weibull, la distribución de falla acumulada corresponde a:

$$F(t)=1-e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)_{\beta}} \tag{7}$$

Aplicando logaritmo natural y desarrollando la 7 tenemos lo siguiente:

$$\ln\left(1-F(t)\right)=-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}$$

$$\ln\left\{-\ln\left(1-F(t)\right)\right\}=\beta\ln\left(\frac{t}{\alpha}\right)$$

Considerando:

$$y=\ln\left\{-\ln\left(1-F(t)\right)\right\}$$

$$a=-\beta\ln(\alpha)$$

Y dado que:

$$b=\beta$$

$$\therefore y=a+bx$$

Con la información que es posible de extraer la confiabilidad y poder obtener un gráfico en función del tiempo que nos permita visualizar el comportamiento del componente bajo análisis.

6 Análisis de la matriz de criticidad

Anteriormente se plantea que uno de los objetivos fundamentales del equipo de trabajo es poder presentar un plan de mantenimiento que incorpore dentro de sus características, metodologías del mantenimiento centrado en la confiabilidad. El plan considera tanto los aspectos propios de los mecanismos de frenado, así como sistemas asociados.

Se presentan a continuación los resultados de la matriz desarrollada previamente:

6.1 Fallas leves

- Activación involuntaria del freno de emergencia por desgaste excesivo en la medialuna.

La geometría que posee la medialuna tiene como diseño un contacto paralelo entre el plomo exterior del carro y su soporte, la activación del sistema, la corrosión y el desgaste normal de la pieza ha provocado en el tiempo que disminuya su sección, por lo que el contacto entre ambas partes deja de ser efectivo. Las vibraciones presentes en el carro sumado al contacto deficiente pueden llegar a provocar la separación entre la medialuna y el plomo, cayendo este último por efecto de la gravedad, accionando los mecanismos de frenado. Ante esta falla se debe ejecutar el plan de evacuación, rearmar el sistema y retomar la operación comercial.

Particularmente en esta falla es necesario evaluar si es factible realizar un reemplazo de la pieza por una nueva que se adapte de mejor forma, asegurando el contacto entre ambas partes. Se cumple la hipótesis que establece necesario medir, ajustar y fabricar una pieza nueva que, una vez aprobada, pueda reemplazar a la parte original ya que no hay stock de la pieza.

- Freno de paracaídas no detiene el sistema de forma adecuada debido a una sobrecarga de visitantes dentro del carro.

De acuerdo con la *NCh 3365:2015-8* [10], específicamente en la Tabla 2 del ítem 8.2.4.2, para una velocidad nominal de 1,5 [m/s] con una inclinación del 30° con respecto a la horizontal, las distancias mínimas y máximas de frenado son 711 [mm] y 1270 [mm] respectivamente. Las pruebas de frenado ejecutadas contemplan el uso de barriles con capacidad nominal de 220 litros. En total se utilizaron 20 lastres al momento de ejecutar los ensayos, dando como resultado una distancia de frenado de aproximadamente 2000 [mm] con 4,4 [t] de carga, es decir, 1,57 veces la carga nominal admitida en los carros (35 visitantes con un peso estándar de 80 [kg]).

Si bien los resultados dejan al funicular fuera de norma, se enfatiza en el hecho de que no existen una normativa específica para los funiculares en Chile y los ensayos ejecutados fueron con un diseño de carga consevativo por ende, la norma señalada previamente se considera como una referencia para el sistema.

6.2 Fallas moderadas

- Pérdida de tensión del cable por el deslizamiento del mismo dentro del casquete bipartido.

Para que se presente esta falla la copa del cable debe ceder, liberando el bloqueo del mismo. Esto provoca que el carro quede sin su punto principal de sujeción, accionando el mecanismo donde se activa el freno de emergencia. Dado el desgaste que presenta el casquete y la tensión del cable, el par de apriete no es suficiente para actuar como una mordaza, por lo que es necesario detener la operación comercial y ejecutar el plan de evacuación. Para resolver la falla, se debe realizar un corte en el cable para eliminar restos del metal blando utilizado en el proceso de instalación, preparar la copa generando un estriado para aumentar la adherencia, preparar el extremo libre del cable y proceder con la fundición de un metal blando para verterlo en la copa con el cable preparado. Es necesario realizar pruebas de frenado para garantizar un resultado satisfactorio del mantenimiento correctivo.

Para mantener el control sobre la posición de la copa y facilitar las inspecciones es que se planifica mensualmente realizar un chequeo del correcto montaje y ajuste de los componentes piezas y partes, esto implica el uso de líneas de fe para marcar una posición. Si esta marca no es coincidente entre las partes implica una rotación o deslizamiento por lo que se debe programar el mantenimiento sin afectar la operación.

- Accionamiento manual del freno de emergencia no funciona correctamente debido al deslizamiento del cable en las grampas grilletes.

El freno de emergencia manual debiese activarse por parte del conductor en casos como una colisión inminente contra un objeto en la vía, en el caso de que un visitante se arroje a las vías o ante cualquier evento que el conductor estime como una emergencia. En caso de que no se active producto del deslizamiento del cable, puede terminar con la muerte de una persona. Al igual que el punto anterior, la complejidad del mecanismo es baja por lo que dentro de la inspección mensual de estos componentes se debe prestar atención a las líneas de fe para asegurar el apriete de las grampas en el cable.

6.3 Fallas severas

- Activación involuntaria del freno de emergencia debido a la fractura de un componente en la cadena cinemática.

Al presentarse esta falla, es necesario ejecutar el plan de evacuación en caso de contar con visitantes en el carro y detener toda operación comercial hasta resolver la falla. La fractura de un componente no puede ocurrir de manera súbita, debe existir previamente una fisura, un concentrador de esfuerzos o alguna deformación que no ha sido notificada o inspeccionada. Esto recalca la necesidad de contar con una hoja de vida de los componentes en donde se pueda tener acceso rápido a las novedades presentes y así, enfocar los esfuerzos en los controles de las mismas.

Para evitar este tipo de acontecimientos es necesario enfatizar en la importancia de las inspecciones visuales, ya que éstas permiten encontrar fallas incipientes. Dado que

no todas las fallas se pueden identificar visualmente, se recomienda realizar ensayos no destructivos los cuales aportarán con nueva información para ser analizada. En el caso en que ocurriese la fractura de un componente, se confirma lo planteado con anterioridad, la necesidad de medir, ajustar y fabricar nuevas piezas. Éstas deben pasar por una serie de aprobaciones lo cual ralentiza el proceso de atención a la falla.

- Activación involuntaria del freno de emergencia producto de vibraciones excesivas en el carro.

La presencia de esta falla no tiene mayor efecto en las categorías de seguridad, medioambiente o producción, mas en lo operacional alcanza el valor máximo. La vibración presente durante el trayecto provoca una separación mínima entre la medialuna y el plomo exterior. Por efecto de su propio peso, al producirse la separación entre los componentes, la medialuna comienza a desplazarse a tal punto en donde cae el plomo exterior activando el mecanismo de frenado.

Al momento de presentarse la falla es necesario ejecutar los planes de emergencia y evacuación en caso de ser necesario y normalizar la operación comercial. Para corregir esta la falla es necesario utilizar máquinas específicas las cuales reperfilan la cabeza del riel, reduciendo y en lo posible eliminando el desgaste ondulatorio de éstos.

- Freno paracaídas no detiene correctamente el carro producto del desgaste en sus piezas de sacrificio.

La falla presentada tiene una gran implicancia en la seguridad operacional, si el desgaste de las piezas de sacrificio es excesivo, los componentes de acople comenzarán a dañarse, esto implica la necesidad de fabricar una pieza con todas las restricciones mencionadas anteriormente. Para que esta falla no se presente, se incluye dentro del plan de mantenimiento una inspección de éstos con tal de medir el desgaste y efectuar el cambio de piezas en caso de ser necesario.

- Freno paracaídas no detiene correctamente el carro producto de la pérdida de los reglajes en los mecanismos de ajuste.

De forma similar al punto anterior, esta falla tiene implicancia en la seguridad operacional, si los reglajes del mecanismo se encuentran fuera de rango, el freno de emergencia podría no activarse como corresponde o bien, los mecanismos de acuñamiento no cargarán los rieles con la fuerza necesaria para detener el sistema.

- Accionamiento manual del freno de emergencia no funciona correctamente debido al corte del cable de accionamiento.

Falla con máximo valor en categoría de seguridad, si al momento de ser requerida no se puede accionar el freno de emergencia de forma manual puede terminar incluso con fatalidades. Debido a su simpleza operacional y los bajos costos de reemplazo es que esta falla no se clasifica con una mayor severidad. Dentro del plan de mantenimiento se incorpora de forma mensual una inspección de todos los componentes asociados al disparo manual.

6.4 Fallas catastróficas

- Pérdida de tensión del cable producto de que éste se corte.

Al momento de ocurrir esta falla se deben ejecutar todos los protocolos de evacuación correspondientes, dejando el sistema fuera de servicio. El cable, al perder continuidad, deja de sujetar el carro por lo que se activa el freno de emergencia debido a la pérdida de tensión.

Las labores de mantenimiento buscan mantener el sistema en condiciones para atender esta falla sin novedades ni daño colateral. Como se menciona con anterioridad, la energía que acumula el carro al caer sin control por las vías provoca grandes daños, por lo que si se presenta esta falla, los mecanismos de emergencia deben actuar como corresponde.

Para evitar esta falla es necesario realizar inspecciones externas del estado del cable conforme a los criterios de descarte estipulados en la norma *UNE-EN 12927-6*

[18] además de ejecutar, anualmente, una magnetografía para inspeccionar el estado interno del cable.

- Pérdida de tensión del cable producto de un deslizamiento del mismo en la polea de tracción.

Esta falla tiene la particularidad de que sólo se puede presentar durante la operación o bien, durante el movimiento de los carros. Su causa raíz es el desgaste presente en la garganta de la polea, la cual no se puede reparar de forma sencilla. Para resolver esto se debe fabricar una nueva polea que cumpla con las características necesarias y poder efectuar el reemplazo. Una maniobra costosa y compleja tanto en conceptos de seguridad como de planificación.

Al producirse el deslizamiento del cable, la inercia que mantienen los carros les permite continuar avanzando pero, al no contar con la tracción producida por la polea, el cable mantiene una posición inmóvil mientras que el carro continúa su movimiento, perdiendo el contacto existente entre la copa y el brazo de suspensión, liberando la tensión del cable provocando que se accionen los mecanismos del freno de emergencia.

El nivel de desgaste se debe mantener con un control mensual y así poder estimar el tiempo de vida remanente de la polea sin comprometer la seguridad de las personas.

7 Conclusiones

En términos generales, se entiende que existe una relación directa entre la calidad del mantenimiento y la explotación del sistema dado que una mala ejecución, en cualquiera de las dos, presenta fallas en la otra. La presencia de cualquiera de las fallas mencionadas, o ante cualquier alteración a la operación normal, impacta en los tiempos de operación así como en los parámetros de servicio, tal y como se presenta en la norma tomada como referencia *UNE EN 12397:2006* [16]. Con la ocurrencia de éstas, se deben ejecutar todos los planes de emergencia y evacuación correspondientes conforme a lo estipulado en el reglamento interno, el cual debe tener como referencia la norma *UNE EN 1909:2004* particularmente el ítem 9 en donde se detallan los requisitos para la evacuación de pasajeros [15].

De las fallas funcionales, aquellas cuya criticidad alcanza un nivel severo implican el reemplazo de componentes con un alto costo de inversión, tanto la polea de tracción como el cable son elementos del sistema que deben ser solicitados a fabricación y no existe stock en las dependencias del funicular como para poder planificar la maniobra de reemplazo, por lo que el sistema debe mantenerse detenido durante un largo período de tiempo mientras se atienden las fallas.

Los análisis de causa raíz coinciden con el punto 3 de las problemáticas planteadas en el ítem 3.4. En la norma *UNE EN 1709:2006* [14] se establece claramente que las piezas de recambio necesarias deben estar disponibles y en cantidad suficiente, en buen estado y en la proximidad inmediata de la estación. Es por esta razón que se propuso en el ítem Error: no se encontró el origen de la referencia utilizar el presente documento como insumo para coordinar con los entes correspondientes la aprobación de ejecución de obras ante una falla. Considerando los costos de una intervención mayor como el reperfilado de rieles, se propone medir y diseñar una nueva medialuna, la cual pueda contrarrestar los efectos de la vibración y pérdida de contacto entre ésta y el plomo exterior. Para ello se debe realizar la planimetría del componente y presentarlo ante ITO y CMN para aprobar las modificaciones que se

desea hacer en el carro, esto considerándolo como una mejora estructural sin comprometer aspectos estéticos. Si se estima conveniente por los entes correspondientes se puede realizar la intervención en búsqueda de reducir/eliminar la falla funcional, en caso contrario, se cuenta con una pieza de recambio dentro de las dependencias del funicular.

7.1 Incorporación de confiabilidad al plan de mantenimiento

Como se menciona con anterioridad, no existe un registro de información ni una base de datos que nos permitan efectuar cálculos con el objetivo de determinar la confiabilidad de un componente o bien, obtener la disponibilidad del sistema. Con tal de lograr el objetivo, es necesario ejecutar una serie de acciones ya presentadas en el documento.

7.1.1 Horómetro de funcionamiento

Con tal de obtener la información fundamental para efectuar los análisis, se propone el uso de un documento denominado *registro diario de operación* (RDO por sus siglas) en el cual se registren los tiempos de operación. Una de las formas que se propone para lograr este objetivo es utilizar sensores los cuales permitan censar el movimiento del sistema o bien, la salida o llegada de los carros al andén. Esta información se traduce logrando presentar un valor único que corresponde a los tiempos de operación del sistema. La información presente sirve como data para la operación comercial como también para tener identificados las horas de lubricación efectiva de algún componente. Esta información permite establecer de manera mas precisa los tiempos de funcionamiento entre fallas entre otros.

El desarrollo de una API es imperante ya que el acceso a los registros y la información generada debe mantenerse disponible de forma transversal y transparente, para esto se desarrolla una interfaz en el software Excel la cual permite al usuario registrar día a día el horómetro final (Figura N.º 7.1). Esto debe ser

acompañado de registros físicos los cuales validan la información ante cualquier ente fiscalizador

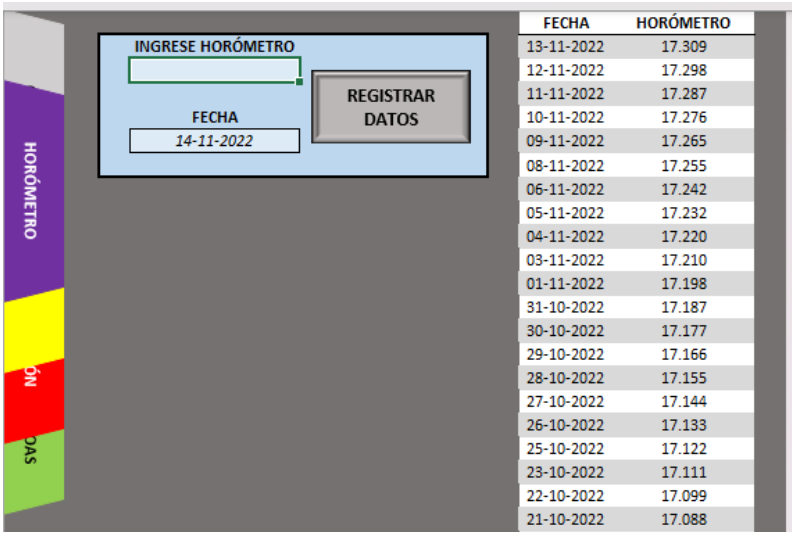


Figura N.º 7.1: Registro del horómetro de funcionamiento.

7.1.2 Registro de inspección

Una gran parte de las actividades ejecutadas por el personal son las inspecciones, éstas son una parte fundamental del plan de mantenimiento ya que, como se indica con anterioridad, permiten identificar fallas incipientes con el objetivo de realizar seguimiento al componente y planificar su actividad correctiva. Al mantener registros de inspección nos permiten buscar e identificar patrones de comportamiento que inducen a una falla, ampliando las fallas funcionales identificadas previamente en el AMFE.

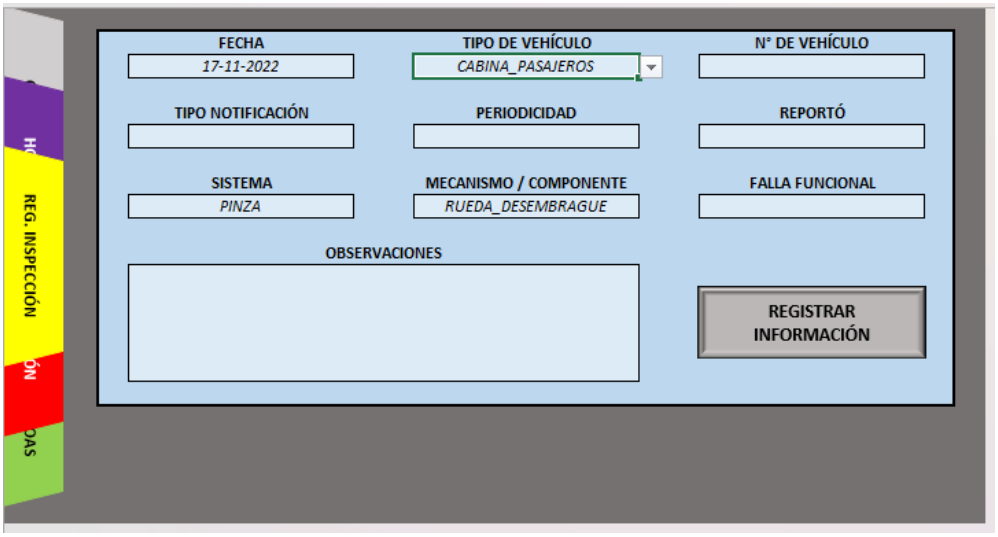


Figura N.º 7.2: Formato del registro de inspección.

Esta interfaz (Figura N.º 7.2) considera la menor intervención por parte del mantenedor con tal de que la información que se registre se encuentre acorde al libro de fallas (Figura N.º 7.3), permitiendo únicamente el registro de observaciones referentes al tipo de notificación. Esta pestaña no sólo permite el registro de anomalías durante inspección. Con tal de identificar nuevas fallas se mantiene un espacio para texto libre en las observaciones, permitiendo identificar nuevas fallas.

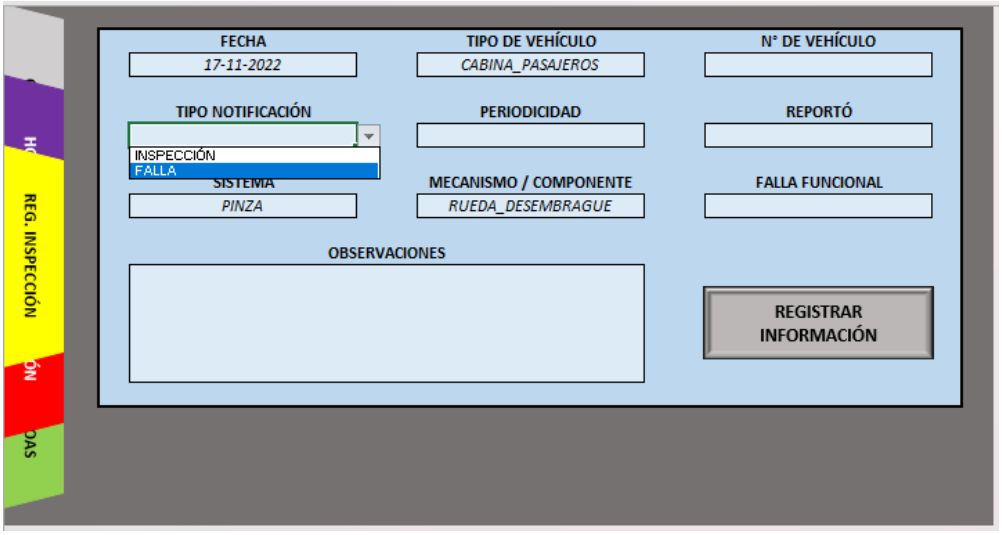


Figura N.º 7.3: Información disponible registro intervención.

Los registros de fecha permiten efectuar un seguimiento de las actividades ejecutadas dado que éstas mantienen una periodicidad establecida. De acuerdo con el plan de mantenimiento, es posible identificar atrasos o adelantos en la ejecución de dichas actividades en el plan. Se propone, apoyando estos registros, el desarrollo e implementación de órdenes de trabajo. Estas OT's permiten obtener indicadores como el porcentaje de cumplimiento del plan de mantenimiento, buscando obtener una relación entre las actividades no ejecutadas y la presencia u ocurrencia de alguna falla.

7.1.3 Mean time between failure

Almacenar el horómetro permite identificar el tiempo de funcionamiento hasta la presencia u ocurrencia de una falla. Como se explica con anterioridad, en el caso de que un no se incurra en una falla funcional, pero las inspecciones efectuadas hayan identificado la falla incipiente, permite programar con anticipación las actividades preventivas las cuales incluyen dentro de su categoría los reemplazos de componentes. Al ejecutar una actividad de esta índole, se debe tener en consideración que la falla aún no ocurre, por ende, al censurar los datos de funcionamiento hasta la falla, el tiempo promedio entre fallas se reduce al tener este valor modificado. Estos análisis son posibles de realizar gracias al uso de una base de datos como se presenta en la Figura N.º 7.4.

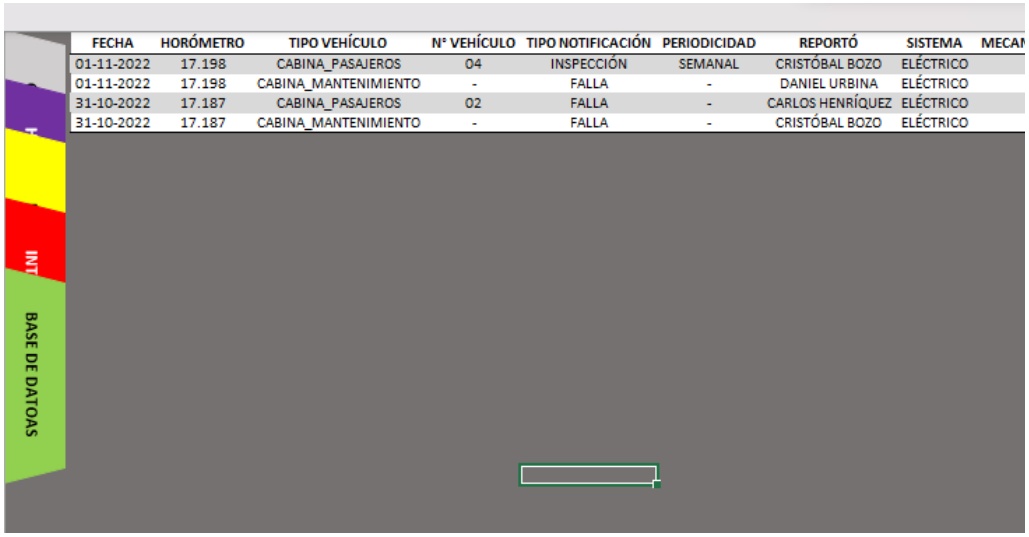


Figura N.º 7.4: Base de datos.

7.1.4 Registro de intervención

La generación de una orden de trabajo como se menciona con anterioridad pasa a ser un hito fundamental en esta pestaña. Al ingresar el código generado para la OT (Figura N.º 7.5), es necesario presionar el botón de validación lo cual arroja una ventana con un resumen de la orden de trabajo (Figura N.º 7.6). Esto rellena la primera fila de la segunda sección de forma automática (Figura N.º 7.7) dejando al usuario ingresar la información restante en la segunda fila (Figura N.º 7.8). Al igual que en las otras pestañas, la información ya se encuentra depurada e incorporada como base de datos de la aplicación por lo que el usuario se debe restringir a únicamente validar la información que desea incorporar seleccionándola desde las listas definidas, dejando como único punto de modificación libre la sección de observaciones.

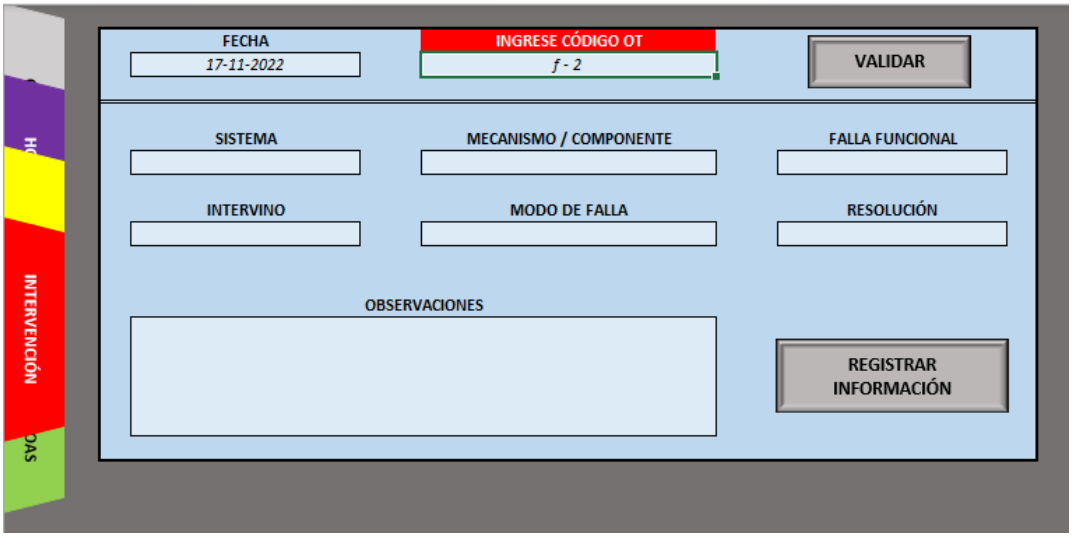


Figura N.º 7.5: Validación de intervención.

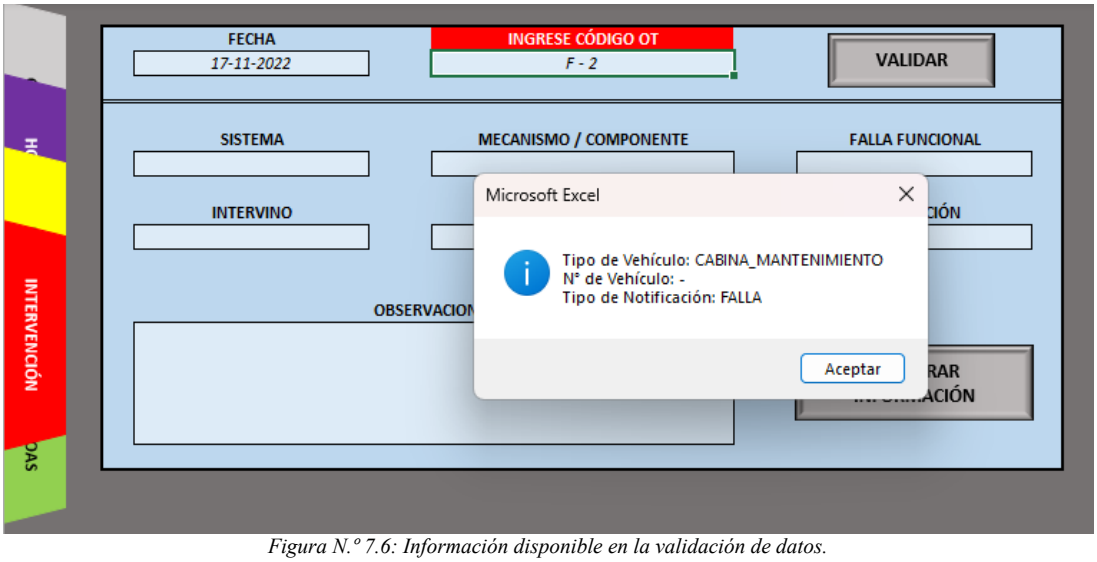


Figura N.º 7.6: Información disponible en la validación de datos.

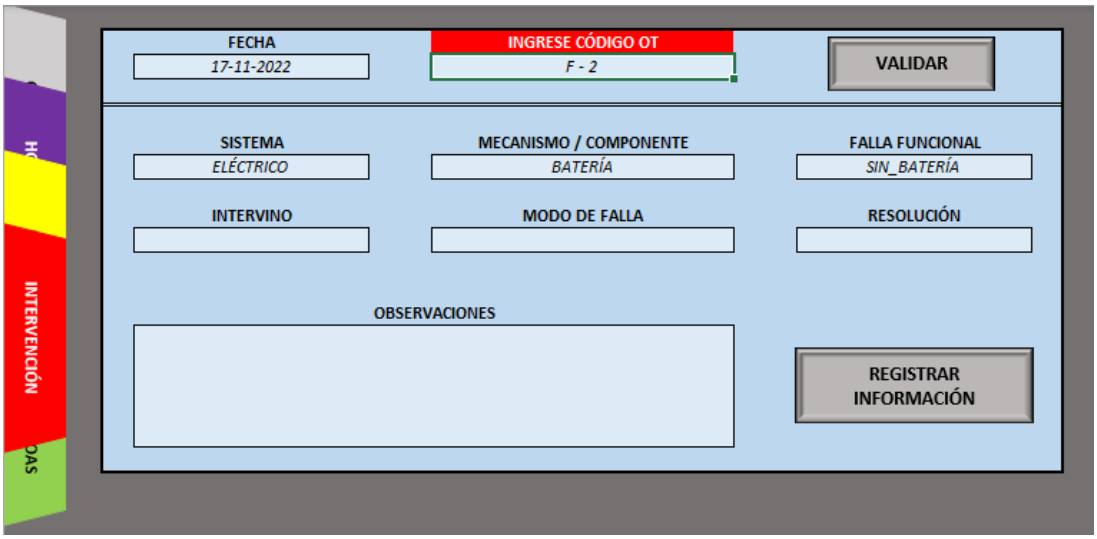


Figura N.° 7.7: Información validada.

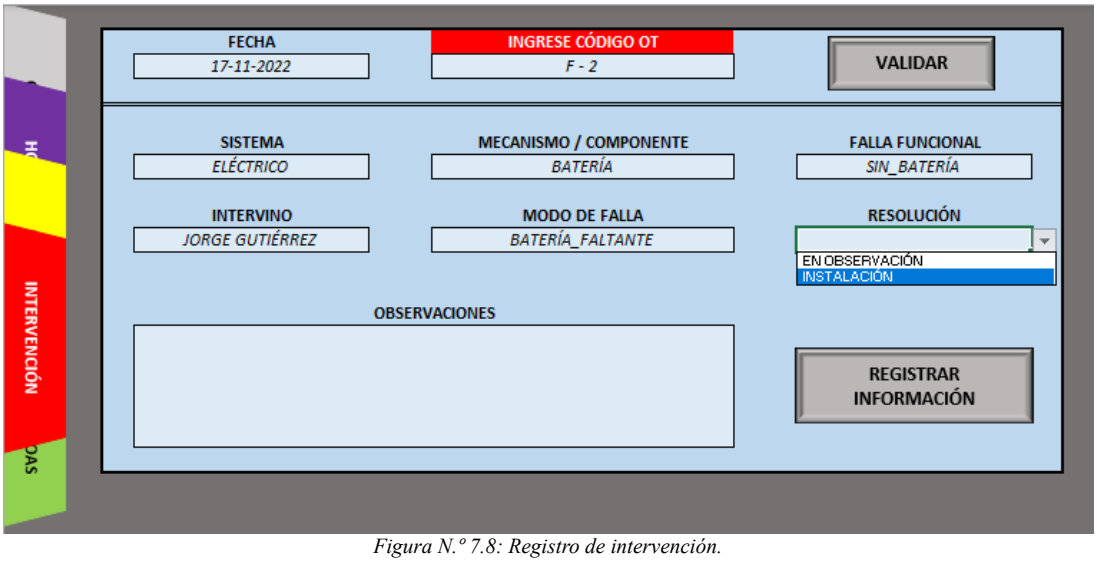


Figura N.° 7.8: Registro de intervención.

7.2 Mecanismos tribológicos

Si bien se plantea como uno de los problemas fundamentales que presenta el funicular en la actualidad, su análisis detallado escapa del enfoque elaborado durante el desarrollo del presente documento. Pese a lo anterior, se propone la elaboración de un estudio detallado en la sala de máquinas considerando el estado de las reducciones y la composición química de éstos para que, en conjunto con especialistas, se busquen soluciones a largo plazo para mejorar el contacto entre componentes, evitando el desgaste innecesario debido a la operación.

Por otra parte, mantener engrasada las guarniciones de los polines permite aplicar una lubricación indirecta al cable prolongando así su vida útil. El problema se presenta en que, si no se mantiene la lubricación correcta, dependiendo de la cantidad de pasajeros que lleve el carro, el cable tiende a salirse de los polines por lo que se propone un estudio de rediseño a los polines modificando su geometría para facilitar una única posición del cable en el polín a la vez que facilita la adherencia de grasas al cable para aumentar el contacto entre los componentes mientras que se mantiene la lubricación de este último.

7.3 Repuestos críticos

Como se menciona a lo largo del documento, es necesario desarrollar un análisis modal de fallos y efectos para poder categorizar las fallas de acuerdo con los parámetros establecidos. Esto nos obliga como mantenedores a desarrollar un *libro de fallas* en donde se consideren aquellas en las cuales puede sucumbir un elemento de acuerdo con su operación normal a la vez que se consideran acontecimientos que escapan de lo normal pero que han suscitado en el pasado. La única forma de obtener información respecto a la presencia de estas fallas anómalas es escuchando con atención a aquellos mantenedores que lleven la mayor cantidad de años al interior del funicular. Otro aspecto que se debe considerar en el AMFE es la complejidad en el manejo de los visitantes producto de la aparición de una falla que obligue a detener el

sistema ya que la detención involucra una gran cantidad de factores como por ejemplo la ubicación de los carros o la cantidad de personas por carro, entre muchas otras.

Con aquellos componentes identificados y catalogados como críticos, se propone desarrollar la planimetría de estos, considerando las actuales falencias que éstos posean para que, al momento de presentarse una falla que llegue a fracturar o agrietar la pieza y, por ende, se requiera un reemplazo, estudiar aquellos aspectos que provocaron la falla y en caso de ser necesario, modificar la pieza para asegurar su funcionamiento en el tiempo.

Para la gran mayoría de los componentes tales como placas de accionamiento, ménsulas, barras de tracción, ejes, entre otros. No es necesario mantener un stock de productos ya que son de fácil y rápida manufactura, por lo que cobra mayor relevancia mantener un aliado estratégico el cual pueda fabricarlas en el menor tiempo posible.

Bibliografía

[1] 100 Años 100 Historias. Chile, Santiago. (238). 2016. https://mapas.parquemet.cl/doc/100anos-100historias.pdf

[2] ACUÑA, Jorge. Ingeniería de Confiabilidad. 1ª ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 2003. 328 p.

[3] Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Sci Data 5, 180214 (2018). https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

[4] Datos históricos en Santiago de Chile. https://www.meteored.cl/tiempo-en_Santiago+de+Chile-America+Sur-Chile-Region+Metropolitana+de+Santiago-SCEL-sactual-18578.html

[5] Decreto Exento N.º 515. Concejo Monumentos Nacionales, Santiago, 16 de noviembre 2000. https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/monumentos-historicos/funicular-cerro-san-cristobal

[6] GÓMEZ, Simón. [Ingeniería de Plantas Industriales, Apuntes del curso], Valparaíso, Chile.

[7] ISO EN 14224 – Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural – recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. Diciembre 2016.

[8] Licitación ID: 48-102-0120. Servicio de Vivienda y Urbanización. Chile, Santiago. https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=HzTRK4PKDRBh3pdu8ab+7A==

[9] MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en La Confiabilidad. 2ª ed. Industrial Press Inc. 1997.

[10] NCh 3365 – Requisitos para equipos de transporte vertical – Ascensores y montacargas inclinados o funiculares. Marzo 2015.

[11] Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-013-SCT2/2015, Para durmientes de concreto, parte 1 durmiente monolítico. México, Ciudad de México. (47). 2016. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5465557&fecha=15/12/2016&print=

true

[12] STEGMAIER, Raúl. KRISTJANPOLLER, Fredy. [Ingeniería de Plantas Industriales, Apuntes complementarios curso], Valparaíso, Chile.

[13] Términos ferroviarios. Chile, Santiago. (47). 2003. https://logistica.mtt.cl/wp-content/uploads/2023/02/Terminos-Ferroviarios-.pdf

[14] UNE EN 1709 - Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Examen previo a la puesta en servicio, mantenimiento y controles en explotación. Abril de 2006.

[15] UNE EN 1909 - Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Recuperación y evacuación. Junio de 2005.

[16] UNE EN 12397 - Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Explotación. Julio de 2006.

[17] UNE EN 12408 - Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Aseguramiento de la calidad. Julio de 2006.

[18] UNE EN 12927 - 6 - Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Cables. Parte 6: Criterios de rechazo. Abril 2006.

[19] UNE EN 12927 - 7 - Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Cables. Parte 7: Control, reparación y mantenimiento. Abril 2006.

[20] UNE EN 13243 - Requisitos de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Dispositivos eléctricos distintos de los accionamientos. Octubre 2015.

Anexos

Tabla 13: Morfología funicular - Parte 1

Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
1.	***Carrocería***	***1.1***	***Techumbre***	*1.1.1*	*Cuadro*	-	-	-	-
				1.1.2	*Revestimiento metálico*	-	-	-	-
				1.1.3	*Revestimiento raulí*	-	-	-	-
				1.1.4	*Cubierta vidriada*	-	-	-	-
		1.2	***Módulos***	*1.2.1*	*Antepechos*	-	-	-	-
				1.2.2	*Paredes intermedias*	-	-	-	-
				1.2.3	*Laterales*	-	-	-	-
				1.2.4	*Revestimiento metálico*	-	-	-	-
		1.3	***Piso***	*1.3.1*	*Cuadro*	-	-	-	-
				1.3.2	*Piso madera*	-	-	-	-
				1.3.3	*Cubierta alto tráfico*	-	-	-	-
				1.3.4	*Guardapolvos*	-	-	-	-

Tabla 14: Morfología funicular - Parte 2

Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
2.	***Chasis***	***2.1***	***Estructura***	*2.1.1*	*Armadura inclinada*	-	-	-	-
				2.1.2	*Armadura horizontal*	-	-	-	-
				2.1.3	*Cartelas*	-	-	-	-
		2.2	***Sistema de rodado***	*2.2.1*	*Soporte*	-	-	-	-
				2.2.2	*Lubricación*	-	-	-	-
				2.2.3	*Rodado*	*2.2.3.1*	*Rueda plana*	-	-
						2.2.3.2	*Rueda guía*	-	-
						2.2.3.3	*Eje*	-	-
		2.3	***Freno emergencia***	*2.3.1*	*Timonería primaria*	*2.3.1.1*	*Brazo de suspensión*	-	-
						2.3.1.2	*Horquilla A*	-	-
						2.3.1.3	*Eje A*	-	-
						2.3.1.4	*Anillo roscado*	-	-

Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
						2.3.1.5	*Horquilla B*	-	-
						2.3.1.6	*Mecanismo de amortiguación*	*2.1.6.1*	*Separadores de goma*
								2.1.6.2	*Tapas*
								2.1.6.3	*Resorte helicoidal plano*
								2.1.6.4	*Anillo metálico*

Tabla 15: Morfología funicular - Parte 3

Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
2.	***Chasis***	***2.3***	***Freno emergencia***	*2.3.1*	*Timonería primaria*	*2.3.1.7*	*Peso interior*	*2.3.1.7.1*	*Escuadras*
								2.3.1.7.2	*Soporte tipo P*
								2.3.1.7.3	*Barra soporte*
								2.3.1.7.4	*Plomo interno*
						2.3.1.8	*Barra de accionamiento*	-	-
						2.3.1.9	*Biela primaria*	-	-
						2.3.1.10	*Eje B*	-	-
						2.3.1.11	*Bieleta*	-	-
						2.3.1.12	*Barra de accionamiento simultáneo*	-	-
						2.3.1.13	*Barra de accionamiento manual*	-	-

Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
						2.3.1.14	*Barra de tracción*	-	-
						2.3.1.15	*Medialuna*	-	-
						2.3.1.16	*Peso exterior*	*2.3.1.16.1*	*Cremallera*
								2.3.1.16.2	*Barra soporte*
								2.3.1.16.3	*Plomo externo*

Tabla 16: Morfología funicular - Parte 4

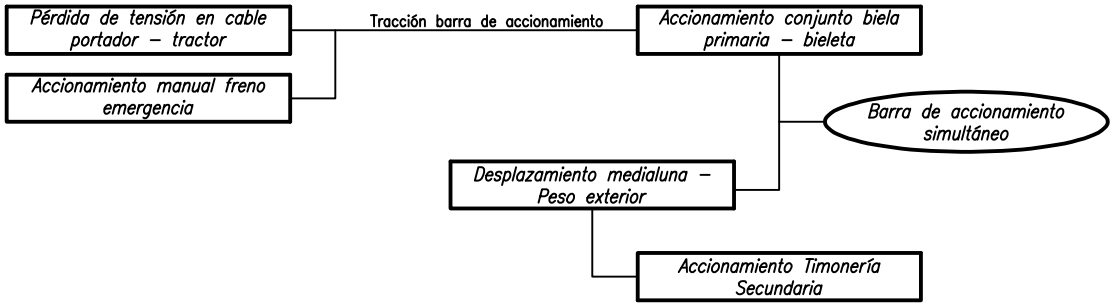
Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
2.	***Chasis***	***2.3***	***Freno emergencia***	*2.3.2*	*Timonería secundaria*	*2.3.2.1*	*Eje C*	-	-
						2.3.2.2	*Soporte C*	-	-
						2.3.2.3	*Biela secundaria*	-	-
						2.3.2.4	*Disipador*	*2.3.2.4.1*	*Barra metálica*
								2.3.2.4.2	*Dado*
								2.3.2.4.3	*Discos metálicos*
								2.3.2.4.4	*Discos de goma*
						2.3.2.5	*Horquilla C*	-	-
						2.3.2.6	*Biela terciaria*	-	-

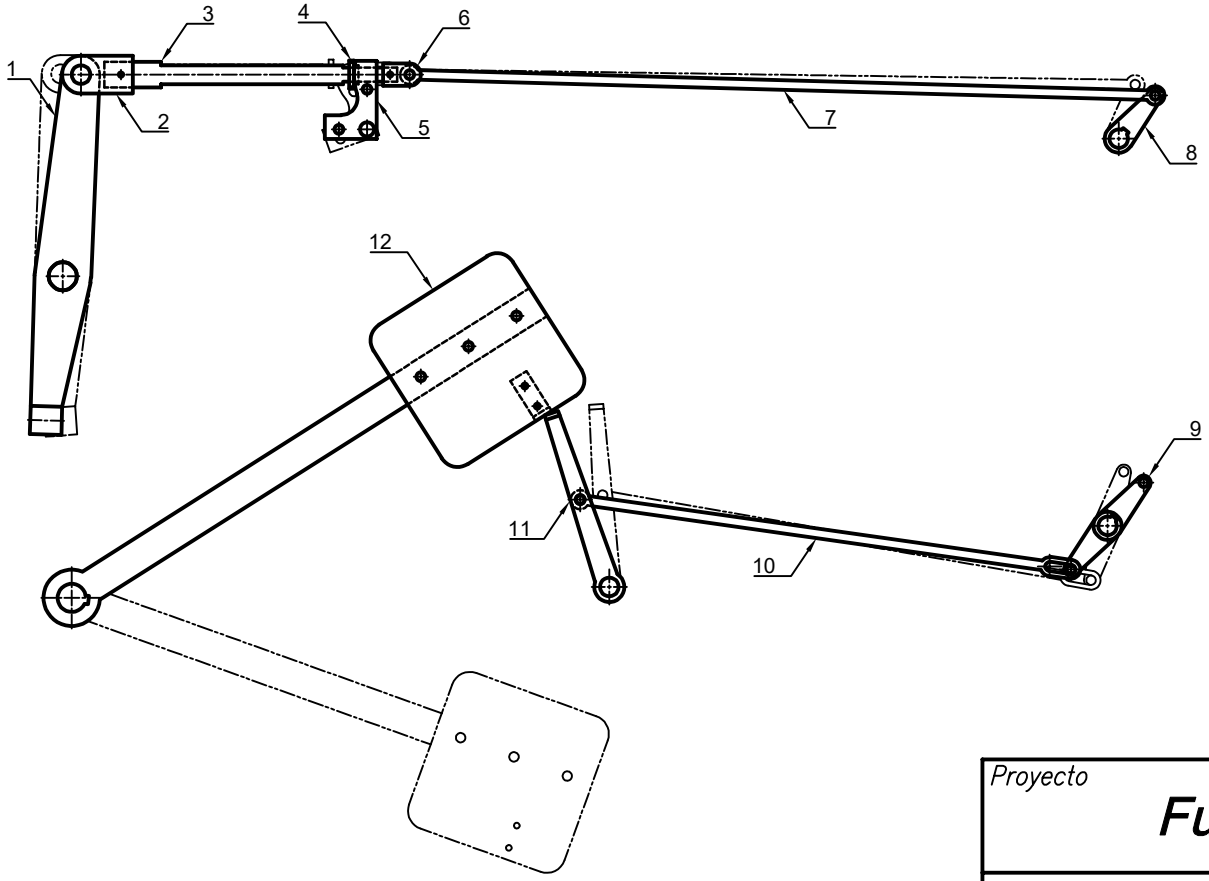
Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
				2.3.3	*Freno paracaídas*	*2.3.3.1*	*Eje de bielas*	-	-
						2.3.3.2	*Bielas de accionamiento*	-	-
						2.3.3.3	*Ménsulas*	-	-
						2.3.3.4	*Patín de freno*	-	-
						2.3.3.5	*Placas de bronce*	-	-
						2.3.3.6	*Placa de ajuste y nivelación*	-	-

Tabla 17: Morfología funicular - Parte 5

Id.	Macrosistema	Id.	Sistema	Id.	Subsistema	Id.	Componente / Mecanismo	Id.	Pieza
2.	***Chasis***	***2.3***	***Freno emergencia***	*2.3.3*	*Freno paracaídas*	*2.3.3.7*	*Mecanismo de regulación*	*2.3.3.7.1*	*Placa de nivelación*
								2.3.3.7.2	*Perno ajuste - garra*
								2.3.3.7.3	*Perno ajuste - patín*
								2.3.3.7.4	*Bombín*
								2.3.3.7.5	*Muelle*
								2.3.3.7.6	*Dado de anclaje*
						2.3.3.8	*Garra*	-	-

Diagrama cinemático accionamiento freno emergencia





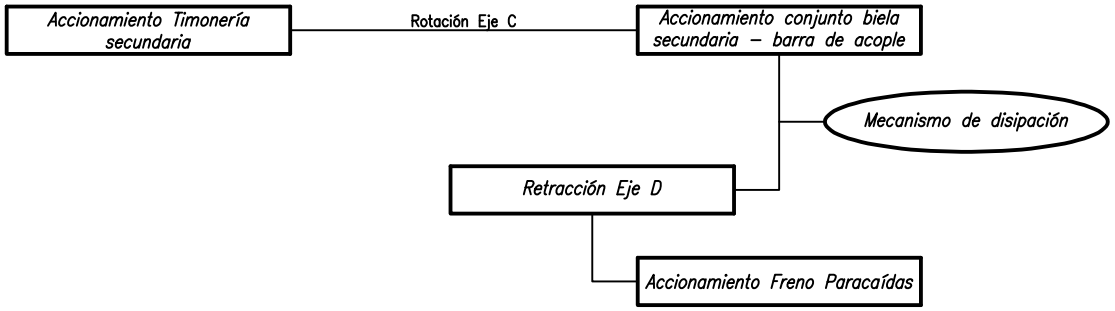
Item	Descripción	Cant.
1	Brazo de suspensión	1
2	Horquilla A	1
3	Eje A	1
4	Anillo roscado	1
5	Escuadra	2
6	Horquilla B	1
7	Barra de accionamiento	1
8	Biela Primaria	1
9	Bieleta	2
10	Barra de tracción	2
11	Medialuna	2
12	Plomo exterior	2

Proyecto

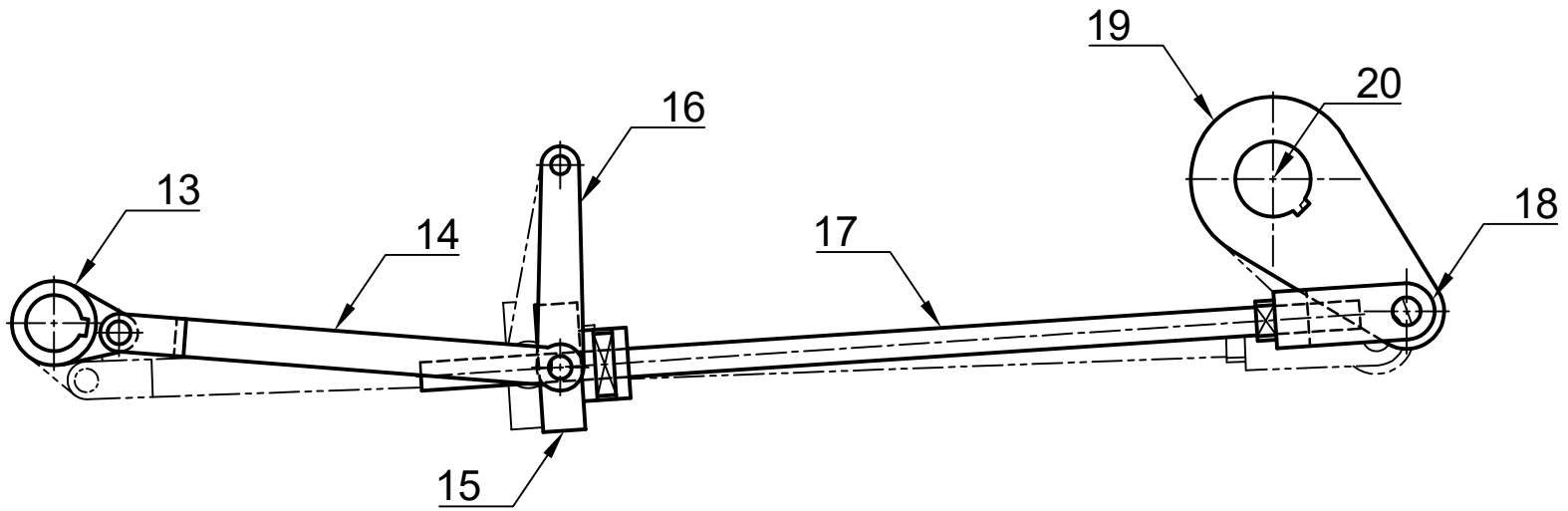
Funicular San Cristóbal

Contenido	Escala	Hoja	Plano
Diagrama cinemático	1:16	01	FPMS–001

Diagrama cinemático accionamiento freno emergencia



Item	Descripción	Cant.
13	Biela Secundaria	2
14	Barra de acople	4
15	Dado	2
16	Barra soporte	4
17	Eje D	2
18	Horquilla C	2
19	Biela Terciaria	2
20	Eje de Bielas	

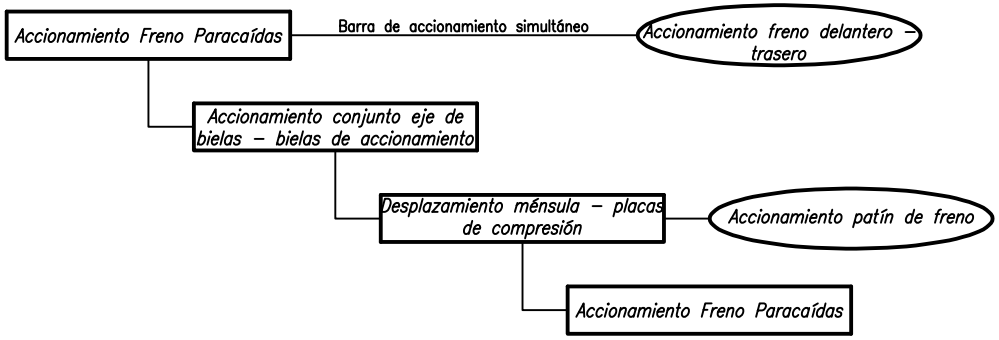


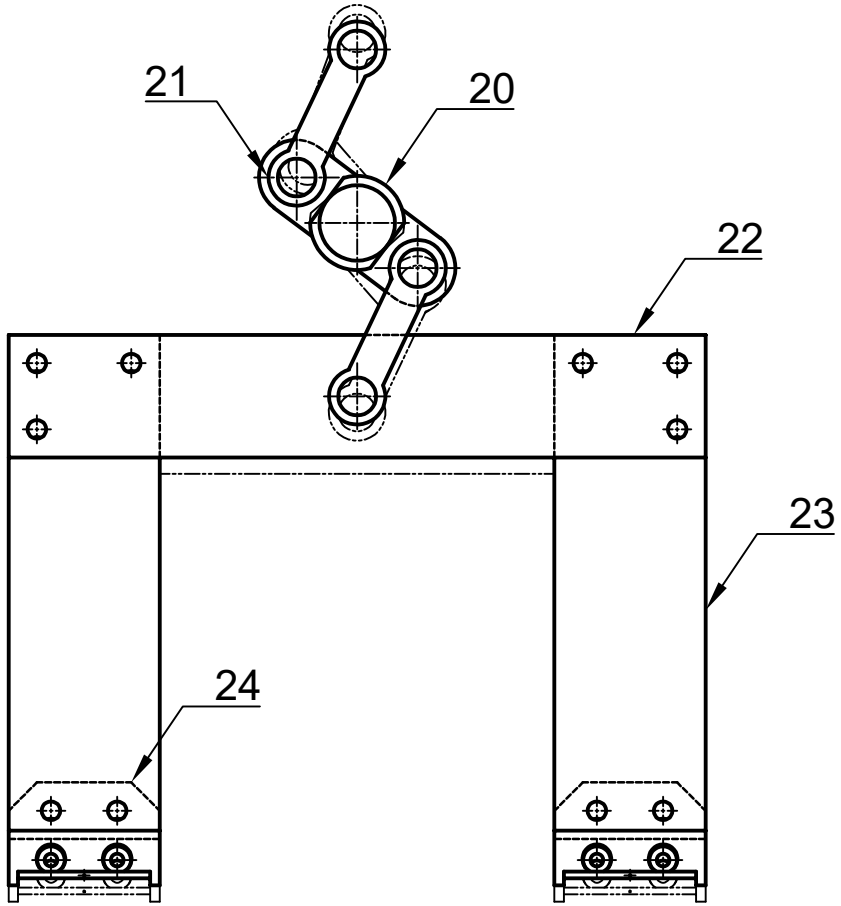
Proyecto

Funicular San Cristóbal

Contenido	Escala	Hoja	Plano
Diagrama cinemático	1:8	02	FPMS–001

Diagrama cinemático accionamiento freno emergencia





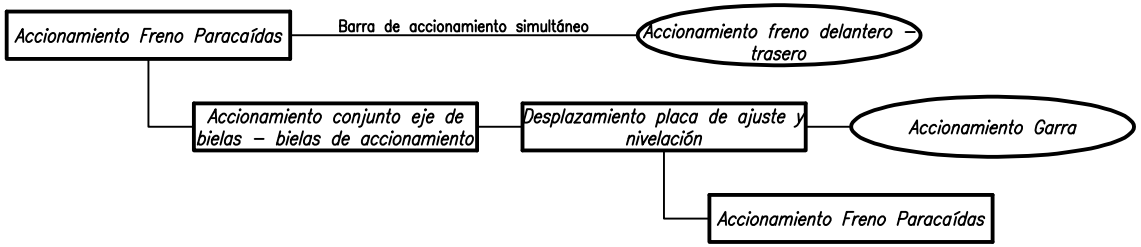
Item	Descripción	Cant.
20	Eje de Bielas	2
21	Biela de accionamiento	8
22	Ménsula	4
23	Placa de compresión	8
24	Patín de freno	4

Proyecto

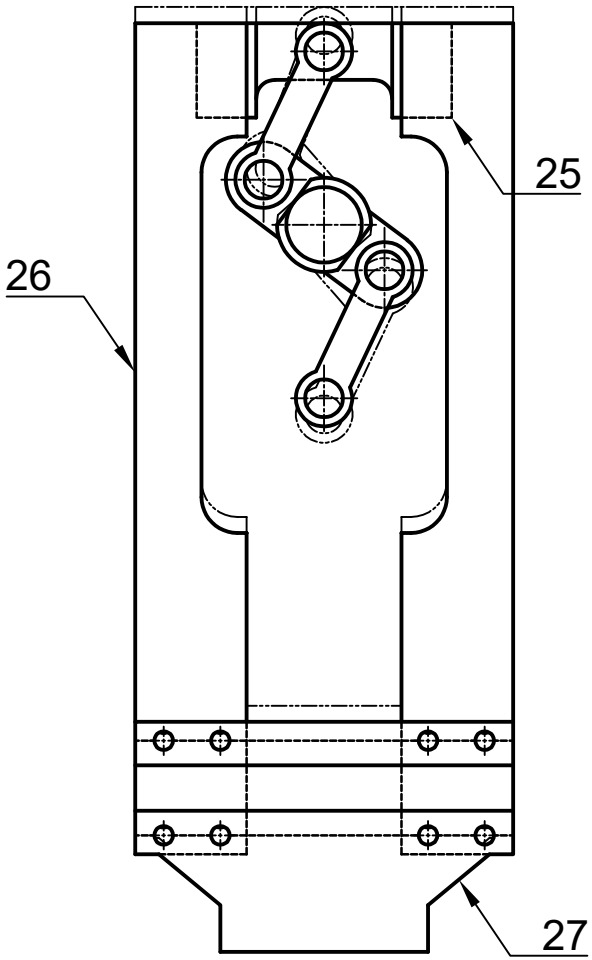
Funicular San Cristóbal

Contenido	Escala	Hoja	Plano
Diagrama cinemático	1:16	03	FPMS–001

Diagrama cinemático accionamiento freno emergencia



Item	Descripción	Cant.
25	Placa de ajuste y nivelación	2
26	Placa de tracción	8
27	Garra	4



Proyecto

Funicular San Cristóbal

Contenido	Escala	Hoja	Plano
Diagrama cinemático	1:16	04	FPMS–001