

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



”MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y
OPTIMIZACIÓN DE INSTALACIÓN CELDAS
DE HIDRÓGENO EN LHD – CODELCO,
DIVISIÓN EL TENIENTE”

NICOLÁS DANIEL ANDRÉ DÍAZ SÁEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO INDUSTRIAL.

PROFESOR GUÍA: Dr. DANILO ESTAY BARRIENTOS
PROFESOR CO-REFERENTE: Ing. VICTOR DÖRNER

Fecha: 07/2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**”MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y
OPTIMIZACIÓN DE INSTALACIÓN CELDAS
DE HIDRÓGENO EN LHD – CODELCO,
DIVISIÓN EL TENIENTE”**

NICOLÁS DANIEL ANDRÉ DÍAZ SÁEZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL.**

**PROFESOR GUÍA: Dr. DANILO ESTAY BARRIENTOS
PROFESOR CO-REFERENTE: Ing. VICTOR DÖRNER**

Fecha: 07/2022

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a la Universidad, a mi supervisor Danilo Estay y a mi supervisor correferente Victor Dörner, de Codelco por la incondicional ayuda. Agradezco a mi familia y a mi esposa por el apoyo.

Glosario

- FC : Celda de combustible
- LHD: Load haul damper
- CORFO: Corporación de fomento a la producción
- H_2 : Hidrógeno
- CO_2 : Dióxido de carbono
- O_2 : Oxígeno
- PCI: Poder calorífico inferior
- CAPEX: Capital expenditure (gastos de inversión)
- OPEX: Operational expenditures (gastos de operación)
- DET: División el Teniente
- PEMFC: Proton exchange membrane fuel cell (pila de combustible de electrolito polimérico)
- DEP: Densidad espectral de potencia
- SC: Super-condensadores
- Payload: carga

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Hidrógeno	2
1.1.1. Baterías y Celdas de combustible	4
1.2. Vibraciones	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivos y alcances	5
1.4. Alcances	5
1.5. Hidrógeno verde y minería	6
1.5.1. Codelco y División El Teniente	7
2. Electro-movilidad: Celdas de combustible y LHD	10
2.1. Celda de combustible (FC)	10
2.1.1. Tipos de Celda	10
2.1.2. Componentes de una celda de combustible	11
2.2. Load Haul Dump (LHD)	13
2.2.1. Características técnicas	13
2.3. Efecto de las vibraciones y golpes en el desempeño de las FCs	14
2.3.1. Vibración armónica	15
2.3.2. Vibraciones	16
2.3.3. Golpes	17
2.3.4. Excitaciones reales	17
2.3.5. Protección para las FC	18
3. Diseño de propuesta técnica	20
3.1. Requerimientos de potencia	20
3.2. Configuración adoptada por la memoria previa	21
3.2.1. FC seleccionada	22
3.2.2. Tanque de hidrógeno	23
3.2.3. Baterías	24
3.2.4. Super-condensadores	24
3.3. Balance de masa y volumen	24

4. Marco teórico	26
4.1. Funcionamiento de una FC	26
4.2. Teoría de vibraciones	28
4.3. Vibraciones masa con resortes	29
4.4. Vibraciones amortiguadas	29
4.5. Vibraciones forzadas	30
4.6. Control de vibraciones	31
4.7. Análisis de señales	33
4.7.1. Transformada de Fourier	34
4.7.2. Densidad Espectral de potencia (DEP)	35
5. Recopilación y cálculo de parámetros LHD y suelo minero	36
5.1. Cálculo de parámetros LHD para la modelación	36
6. Modelación y simulación	40
6.1. Simulación en Working Model 2D	41
6.1.1. Vibraciones	42
7. Resultado y discusión	48
7.1. Vibraciones	49
7.2. Discusión	54
8. Conclusión y perspectivas	59
9. Futuras aplicaciones para Codelco	62
A. Catálogo de Celdas	64
B. LHD Sandvik Toro LH410	65
C. Especificaciones técnicas de rueda de un LHD	71
D. Código creado y utilizado en el lenguaje R para realizar la Transformada de Fourier	72
E. Tablas de frecuencias capturadas	73
Bibliografía	76

Resumen

Este estudio busca comprender las vibraciones que se generan en la estructura de un cargador frontal, Load Haul Dump, en condiciones comunes de operación, con el fin de generar recomendaciones para una adecuada instalación de celdas de combustible (electro-movilidad). Es de vital importancia conocer el contexto en el cual se desempeña un cargador frontal por sus duras condiciones de trabajo. Esto ayudará a entender de mejor manera cuales son los criterios a tener en cuenta antes de la instalación de la celda de combustible con el objetivo de poder operar de manera óptima y eficiente. Dentro del marco de control de vibraciones y los fundamentos de la dinámica de vehículos es que desarrolla este estudio. Una adecuada representación dinámica del aislamiento de vibraciones permite generar un modelo representativo de lo que sucede en la realidad, teniendo en cuenta una estimación de los parámetros de un LHD. Para ésto, se genera un doble modelo de cuarto de auto, que a través del programa Working Model 2D, generará vibraciones y golpes que serán representados de manera gráfica. Además, utilizando la herramienta matemática *Transformada de Fourier*, se obtienen las frecuencias bajo las cuales trabaja el LHD, y sumando esto último a la literatura es que se comprende cuales son los parámetros óptimos a tener en consideración cuando se instale la celda de combustible en el cargador frontal. Finalmente, dado los resultados del estudio y haciendo hincapié en la información de varios artículos, se concluye que la celda sufrirá daños si se instala en el LHD sin protección, debido a que los estudios señalan graves daños producto de las vibraciones, que van desde la parte mecánica, hasta la parte electro-química que compone una FC. Se recomienda generar protección para aislar vibraciones y golpes y tomar mediciones reales de vibraciones en un LHD en operación, entre otras.

Capítulo 1

Introducción

Este trabajo se realiza para concluir la etapa de formación de Ingeniero Mecánico Industrial y se desarrolla dentro del marco de un proyecto CORFO de electro-movilidad minera realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María en colaboración con la empresa Codelco, específicamente en la División El Teniente de Rancagua.

Este importante proyecto se contextualiza en una época de transición energética, donde Chile busca convertirse en una fuente de recursos de energía para un mundo cero emisiones a través del aprovechamiento de las energías renovables, como la energía solar en el norte y la energía eólica del sur del país. De hecho, aunque Chile es un país relativamente pequeño; contribuye con un 0,3 [%] de las emisiones globales, pero puede convertirse en un país protagonista en la reducción de la huella de carbono desempeñando un papel fundamental en la producción de hidrógeno, al mismo tiempo creciendo y desarrollándose en un tema de envergadura mundial.

Además, es vital que nuestro país actúe y concrete la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde debido a que podría convertirse en el productor de hidrógeno verde de más bajo costo del planeta. Esto llevaría al país a limpiar su economía y exportar productos creados por energía cero emisiones, lo que lo diferenciaría de otros que utilizan combustibles fósiles, ratificando el compromiso por preservar y cuidar el medio ambiente.

Este capítulo cuenta con una breve descripción del estudio técnico-económico previo a este trabajo, de hidrógeno, vibraciones, objetivos, alcances y sobre el papel del hidrógeno en la minería.

Estudio técnico-económico del uso de hidrógeno en aplicaciones de electro-movilidad

Dentro del marco del proyecto CORFO de electro-movilidad minera, el año 2019 se realizó un estudio técnico-económico donde se buscó desarrollar una alternativa de powertrain en base a hidrógeno implementado a un LHD como reemplazante de un motor diésel. El estudio muestra que para implementar un sistema de powertrain en base a hidrógeno es necesaria la instalación de un sistema de varios componentes interconectados entre sí, tales como supercondensadores, baterías y celdas de combustibles entre los elementos críticos. Como conclusiones del estudio, se

encontró factible económica y técnicamente la implementación del sistema a base de hidrógeno por los beneficios ambientales, entre otros, y por ello es que para poder continuar con el desarrollo del lado técnico del proyecto se indican recomendaciones para futuros estudios.

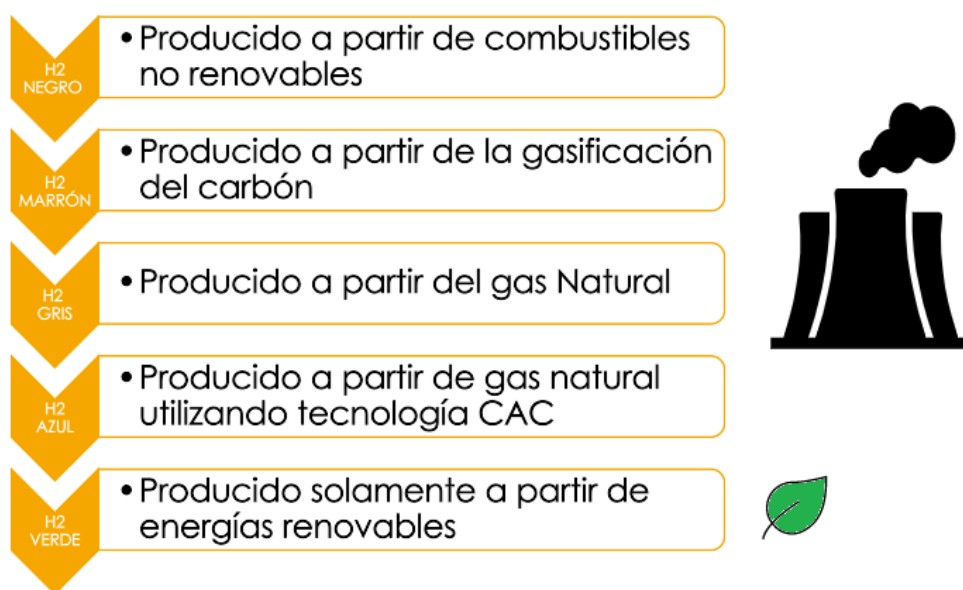
El presente estudio, “Modelación, simulación y optimización de instalación de celdas de hidrógeno en LHD – Codelco, División El Teniente”, seleccionó la línea de estudio de realizar mediciones de vibraciones en los equipos para poder asegurar la estabilidad de las celdas de combustible durante la operación y cuantificar su impacto en los operadores de los equipos [1].

En la actualidad, las vibraciones en las celdas o, también llamadas, pilas de combustibles, no se han estudiado por completo, pero existen varios artículos y documentos que se mencionan en el punto capítulo 2 donde se mencionan las consecuencias que se producen en una celda de combustible producto de las vibraciones, sean estudios experimentales o teóricos. La celda de combustible se ve inevitablemente afectada por la vibración y los choques producto de las irregularidades de un camino. Por lo general, se estudia la estanqueidad del gas, degradación de voltaje, impedancia CA, espectros, curva de polarización y daños físicos, todo esto a corto y a largo plazo. Como se menciona anteriormente, se espera que los efectos producidos por los golpes y vibraciones tengan consecuencias negativas a largo plazo desde la perspectiva de confiabilidad y durabilidad.

1.1. Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, pero no se puede encontrar en la naturaleza en su estado puro, es por esto que no puede ser considerado como una fuente energética primaria. Se le considera como un vector energético o, en palabras más simples, como un portador de energía, lo que significa que puede ser producido para luego ser utilizado como combustible. El hidrógeno negro, marrón, gris o azul es el combustible o vector energético obtenido a partir de un proceso que genera como residuos emisiones contaminantes o gases invernaderos.

Por otro lado, el hidrógeno H_2 verde, producido a través de electrólisis, que a su vez es abastecida por energía captada por métodos renovables no convencionales, como lo son los paneles solares fotovoltaicos o turbinas de generación eólica, no producen emisiones CO_2 , siendo un combustible amigable con el medioambiente.

Figura 1.1: *Hidrógeno a partir de diferentes formas de producción.*

Actualmente, en la industria europea se producen 65 billones de metros cúbicos de hidrógeno, de los cuales aproximadamente un 48 [%] provienen de reformado de gas natural, el 30 [%] de procesos a partir del petróleo, 18 [%] del carbón y 3 [%] restantes de procesos de cloro-álcali. El hidrógeno se compara con combustibles de origen fósil en la Tabla 1.1.

Cuadro 1.1: Comparación de los diferentes combustibles.

Característica	Hidrógeno	Gas Natural	Gasolina	Propano
PCI (Mj/kg)	120	49,5	42-44	44
Densidad en condiciones estándar	0,086	0,598	718-778	505
Estado en condiciones estándar	Gas	Gas	Líquido	Líquido
Temperatura de autoignición en el aire (°C)	565-585	540	257	454-510
Concentración de inflamabilidad en aire (% de volumen)	4,1-7,4	5,3-15	1,4-7,6	2,2-9,5
Coefficiente de difusión en el aire (cm ² /s)	0,61	0,16	0,051	0,109
Toxicidad para las personas	No tóxico asfixiante	No tóxico asfixiante	Venenosos e Irritantes	No tóxico asfixiante

1.1.1. Baterías y Celdas de combustible

Las celdas de combustibles, conocidas como FC, son las encargadas de transformar la energía proveniente del hidrógeno en corriente eléctrica. Por otro lado, la alternativa que se ha tenido en cuenta durante décadas para los combustibles fósiles han sido las baterías eléctricas, instaurando el debate de cuál de las dos opciones es más conveniente. Existen varios factores a tener en consideración al momento de hacer un balance entre estas dos alternativas. El primero a considerar es, que la cantidad de energía entregada por la pila de combustible es mayor en comparación a una batería de las mismas dimensiones, por lo que sería más eficiente tener celdas de combustible que baterías en cuanto a vehículos de transporte de carga pesada, como camiones CAEX. El segundo punto es que las pilas de combustible, a diferencia de las baterías puede suplir variaciones de demandas con solo inyectar más combustible al sistema, mientras que a un conjunto de baterías se debe sumar mas de las mismas, aumentando los costos. Y como último punto, se puede considerar el largo tiempo de recarga para reemplazar la electricidad gastada, debido a que en tiempos de carga el estanque de hidrógeno es considerablemente más rápido.

1.2. Vibraciones

La mayoría de las actividades humanas implican vibración en una u otra forma. Por ejemplo, se oye porque los tímpanos vibran y se ve debido a que las ondas luminosas vibran [2]. En diferentes áreas de la ingeniería se experimentan vibraciones debido al desequilibrio de las piezas que provienen de irregularidades en la fabricación de los componentes. En todas las situaciones, las componentes de las máquinas o estructuras pueden fallar debido a la fatiga de materiales producida por vibraciones cíclicas. Además, las vibraciones provocan un rápido desgaste en cojinetes y engranajes, como también ruido excesivo. En máquinas, que es el punto de estudio de este trabajo, también se pueden aflojar sujetadores o tuercas.

Cuando la frecuencia natural de vibración coincide con la frecuencia de excitación externa se manifiesta el fenómeno de “*resonancia*”, el cual deriva en fallas excesivas. La literatura contiene relatos donde este fenómeno ha provocado innumerables fallas. Debido a los grandes problemas que producen las vibraciones, es que las pruebas de vibración se convirtieron en un estándar en el diseño y desarrollo en la mayoría de los sistemas de ingeniería. A pesar de que las vibraciones traen efectos negativos, también se ha utilizado con provecho en varias otras aplicaciones industriales y comerciales. Por ejemplo, las vibraciones son aplicadas en transportadoras vibratorias, tolvas, tamiz, compactadoras, taladros, etc.

Clasificación de la vibración Las vibraciones pueden ser clasificadas de varias maneras y alguna de las más importantes son las siguientes

- Vibración libre. Cuando se perturba inicialmente un sistema, la vibración resultante será una vibración libre, siempre y cuando ninguna fuerza actúe sobre el sistema.
- Vibración forzada. Si el sistema es sometido a una fuerza externa repetitiva, entonces la vibración será forzada. Aquí es donde ocurre la resonancia si la frecuencia natural del

sistema coincide con la frecuencia de la fuerza repetitiva.

- Vibración no amortiguada o amortiguada. Si el sistema físico pierde energía, entonces la vibración es amortiguada, por el contrario, es no amortiguada.
- Vibración lineal y no lineal. Si los componentes del sistema se comportan de manera lineal, entonces la vibración será lineal, por el contrario, si al menos uno de los componentes es lineal, entonces la vibración será no lineal.
- Vibración determinística y aleatoria. Cuando se conoce la magnitud de la fuerza excitante en cualquier momento, entonces la vibración resultante será una vibración determinística, de otro modo, la vibración será aleatoria.

1.3. Objetivos

Estudiar vibraciones, aceleraciones e impactos en los LHD de DET para diseñar una instalación segura y óptima de las celdas de hidrógeno. También proyectar y proponer futuros usos en otras aplicaciones móviles o estacionarias en Codelco El Teniente.

1.3.1. Objetivos y alcances

- Estudio bibliográfico sobre efectos de las vibraciones, aceleraciones e impactos en el funcionamiento de las celdas de hidrógeno.
- Conceptualizar un plan de mediciones de vibraciones, aceleraciones e impactos en los LHD de DET.
- Realizar modelación y simulaciones de la estructura de los LHD para diseñar una instalación segura y óptima de las celdas de hidrógeno.
- Generar recomendaciones para la verificación del diseño identificado en un LHD de DET (siguiente etapa).
- Generar recomendaciones de uso del hidrógeno y la tecnología de celdas de combustible en otras aplicaciones móviles y/o estacionaria de acuerdo con las oportunidades que ofrece al proceso productivo de Codelco División El Teniente.

1.4. Alcances

El alcance de este estudio consiste en realizar un modelo del Load Haul Dump para posteriormente someterlo a simulación y análisis en cuanto a las vibraciones y golpes que este sufre en su calidad de operación. Así, se podrá proponer sugerencias sobre las condiciones en las que una celda de combustible (PEMFC) podría operar montada al cargador frontal antes mencionado sin sufrir deterioro en su confiabilidad y desempeño.

1.5. Hidrógeno verde y minería

La industria minería Chilena es una gran consumidora de energía. Tan solo el año 2019 la industria tuvo un consumo total de energía de 175.134 [TJ], lo que representa un 14 [%] del consumo agregado del país y de este total, 89.769 [TJ] son de energía eléctrica y 85.365 [TJ] por consumo de combustibles [3]. La Figura 1.1 muestra el consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre para el periodo 2001-2019.

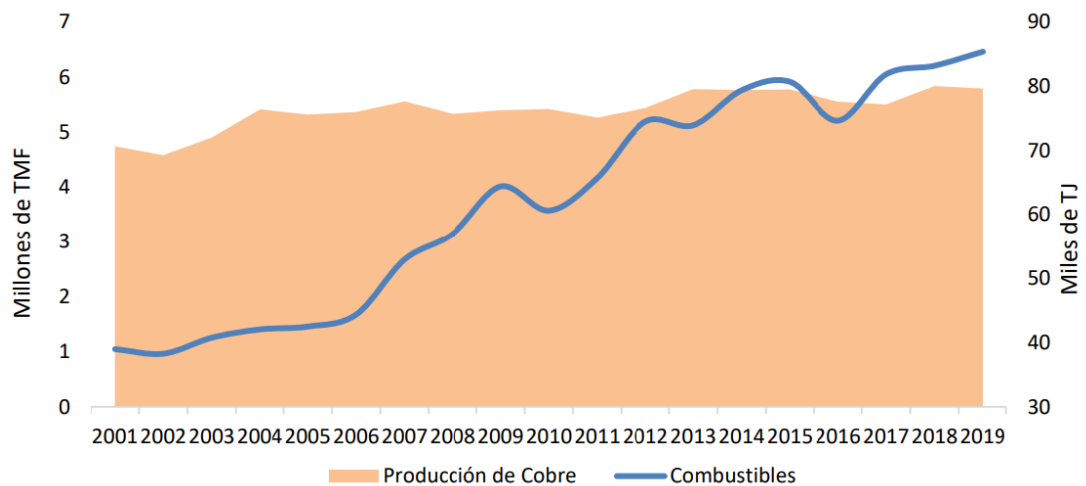


Figura 1.1: Trayectoria del consumo de combustible desde el año 2001 al 2019 [3].

Este aumento de consumo sistemático está guiado por una producción que tiende al alza. Por otro lado, varios tipos de combustibles han ido perdiendo protagonismo debido a normativas existentes en cuanto a calidad del aire a nivel nacional, entonces, muchos han sido reemplazados por diésel y el registro del año 2019 se muestra en la Figura 1.2.

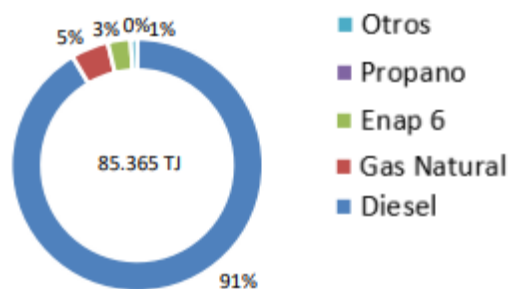


Figura 1.2: Distribución de los combustibles el año 2019 [3].

El combustible más utilizado es el diésel, alcanzando prácticamente sobre un 90 [%] del total. Es aquí donde el hidrógeno puede entrar a jugar un papel fundamental para transformar Chile

en un país cero emisiones, donde la descarbonización del sistema aplicado en la minería es clave para el desarrollo y diferenciación de los demás países que exportan cobre. Así, el cobre Chileno tendrá su sello verde, lo que repercutirá no solo en el ámbito social y ambiental, sino que también en el económico.

1.5.1. Codelco y División El Teniente

Codelco es la Corporación Nacional del Cobre que le pertenece a todos los chilenos y chilenas. Es la empresa productora principal de cobre del mundo y de desarrollo nacional. Durante el año 2020 su producción alcanza 1.727.355 [TMF] de cobre fino, lo que corresponde a un 8 [%] de la producción mundial. Esta gran corporación cuenta con siete divisiones: Radomiro Tomic, Chuquibambilla, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Salvador, Andina y El Teniente (También se suma la división Ventanas que es una fundición y refinería).



Figura 1.3: *División El Teniente de Codelco, Rancagua.*

El Teniente es el yacimiento subterráneo de cobre más grande del planeta y está ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Este yacimiento comenzó a ser explotado en el año 1905 y cuenta con 4.500 kilómetros de camino subterráneo. Además, la mina tiene una dotación propia de 3896 personas al 31 de diciembre del 2020, obteniendo una producción de 443.220 toneladas métricas de cobre. Se estima que el yacimiento cuenta con 18.000 millones de toneladas, lo que daría una capacidad de extracción para 100 años, aproximadamente.

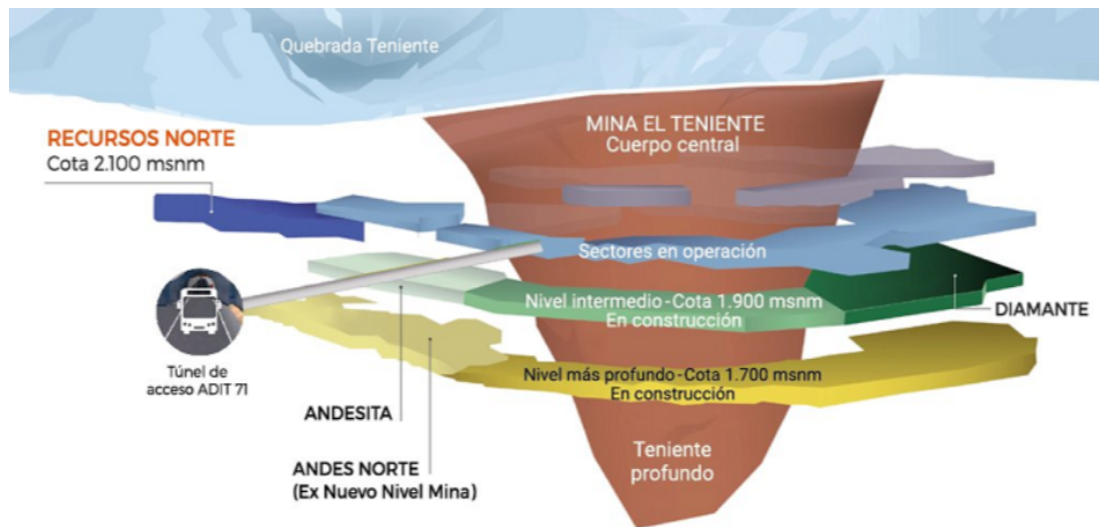


Figura 1.4: *Unidades productivas y futuros proyectos de la mina El Teniente.*

En la pipa se ubican los centros de operaciones y oficinas, mientras que en sus alrededores se concentra la producción y la extracción de minerales. La Figura 1.4 muestra la ubicación de las principales unidades productivas de la mina, como por ejemplo

- Diablo Regimiento FASE III, IV y V
- Esmeralda
- Dacita
- Proyectos futuros: Diamante y Andesita (2023)

La División El Teniente produjo solo el año 2020 443.220 toneladas métricas de cobre fino, que es comercializado a través de ánodos que generan en la Fundición de Caletones. La división también produjo 8.214 toneladas métricas finas de molibdeno y 106.428 [kg] de plata, entre otros subproductos [4].

Electro-movilidad: Innovación y sostenibilidad en El Teniente La incorporación de la electro-movilidad ofrece grandes oportunidades no solo a El Teniente, sino que también a nivel nacional. Es un proceso que construye la transformación de Codelco, le abre las puertas a la descarbonización y al mismo tiempo a desarrollar e innovar, dejando de atrás los impactos negativos de equipos tradicionales. La electro-movilidad trae reducción de costos, de riesgos de operación y aumento de productividad. Además, provocaría una minería más sustentable y segura, que traerá nuevos actores de negocio y más inversión.



Figura 1.5: *Beneficios de la electro-movilidad [5].*

Profundizando en algunos puntos ya mencionados que son relevantes para el área técnica, existirá una reducción de costos de operación (OPEX) debido a que la mantención de un vehículo eléctrico es de 2 a 5 veces menor que en uno diésel. Al mismo tiempo, una gran reducción en las emisiones locales que daña la salud de los trabajadores debido a los gases emitidos por los vehículos diésel. Finalmente, también hay que señalar que se producirá un impacto positivo en el CAPEX de futuros proyectos de minería subterránea ya que se reduciría en un 30 [%] la inversión por ventilación, pensando en minería abastecida solo eléctricamente.

Capítulo 2

Electro-movilidad: Celdas de combustible y LHD

Es de vital importancia conocer cuál es el contexto bajo el cual se quiere implementar la electro-movilidad términos de operación. Las condiciones de operación en las cuales las celdas de combustibles se desempeñan con cierta eficiencia bajo parámetros que necesariamente necesitan ser regulados. Por esto último, en este apartado, se describe lo que es una celda de combustible y sus tipos, lo que es un LHD y su función dentro de la minería y, lo más relevante para este trabajo, como es que las vibraciones que se producen en un LHD afectan su correcto funcionamiento.

2.1. Celda de combustible (FC)

Las celdas de combustible son dispositivos electro-químicos que convierten la energía química de un combustible directamente en energía eléctrica. La diferencia principal con las baterías convencionales es que estas últimas son acumuladoras de energía en las que la máxima energía depende de la cantidad de reactivos químicos almacenados en ellas, dejando de producir energía cuando se consumen dichos reactivos. Las pilas de combustible, por el contrario, son dispositivos que teóricamente tienen la capacidad de producir energía eléctrica de forma indefinida mientras se suministra combustible y oxidante a los electrodos. Únicamente, la degradación o el mal funcionamiento de los componentes limitan la vida de útil práctica de las FCs.

2.1.1. Tipos de Celda

Las celdas de combustibles pueden ser categorizadas en: Alcalinas, Membrana electrolítica de polímero, Ácido fosfórico, Óxido de sólido y Carbonato fundido. En la Figura [6] con un resumen de sus características.

Tipo de Celda de Combustible	Temp oper.	Tamaño típico	Eficiencia Eléctrica (LHV)	Aplicaciones	Ventajas	Desafíos
Membrana de Intercambio Protónico (PEM)	<120°C	<1 kW - 100 kW	60% H ₂ directo; 40% reformado de combustible	• Energía de respaldo • Energía portable • Generación distribuida • Transporte • Vehículos especiales	• El electrolito sólido reduce la corrosión y los problemas de manejo • Baja temperatura • Partida rápida y seguimiento de carga	• Catalizadores costosos • Sensible a las impurezas del combustible
Alcalino (AFC)	<100°C	1-100 kW	60%	• Militar • Espacial • Energía de respaldo • Transporte	• Amplio rango de materiales estables permiten bajos costos de componentes • Baja temperatura • Rápida partida	• Sensible al CO₂ en el combustible y aire • Manejo del electrolito (acuoso) • Conductividad del electrolito
Ácido Fosfórico (PAFC)	150-200°C	5-400 kW, Módulo 100 kW (PAFC líquido); <10 kW Membrana polimérica)	40%	• Generación distribuida	• Adecuada para cogeneración (CHP) • Mayor tolerancia a las impurezas del combustible	• Catalizadores costosos • Tiempo de arranque prolongado • Sensibilidad al azufre
Carbonato fundido (MCFC)	600 - 700°C	300 kW - 3 MW, Módulo 300 kW	50%	• Empresa eléctrica • Generación distribuida	• Alta eficiencia • Flexibilidad de combustible • Adecuada para cogeneración (CHP) • Ciclo turbina híbrido/gas	• Corrosión y ruptura de componentes de celda por alta temperatura • Tiempo de arranque prolongado • Baja densidad de potencia
Solid Oxide (SOFC)	500 - 1.000°C	1 kW-2 MW	60%	• Potencia auxiliar • Empresa eléctrica • Generación distribuida	• Alta eficiencia • Flexibilidad de combustible • Electrolito sólido • Adecuada para cogeneración (CHP) • Ciclo turbina híbrido/gas	• Corrosión y ruptura de componentes de celda por alta temperatura • Tiempo de arranque prolongado • Limitado número de detenciones

Figura 2.1: Tipos de celdas de combustibles y sus características [6].

2.1.2. Componentes de una celda de combustible

Es importante tener conocimiento de la estructura de una celda de combustible en su interior debido a que más adelante, en este mismo capítulo, se menciona cuál son las problemáticas que provocan los golpes y vibraciones en el desempeño de la celda. La celda de combustible

mencionada en la Figura 2.2 es genérica y pertenece a las celdas de combustibles “PEMFC” (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

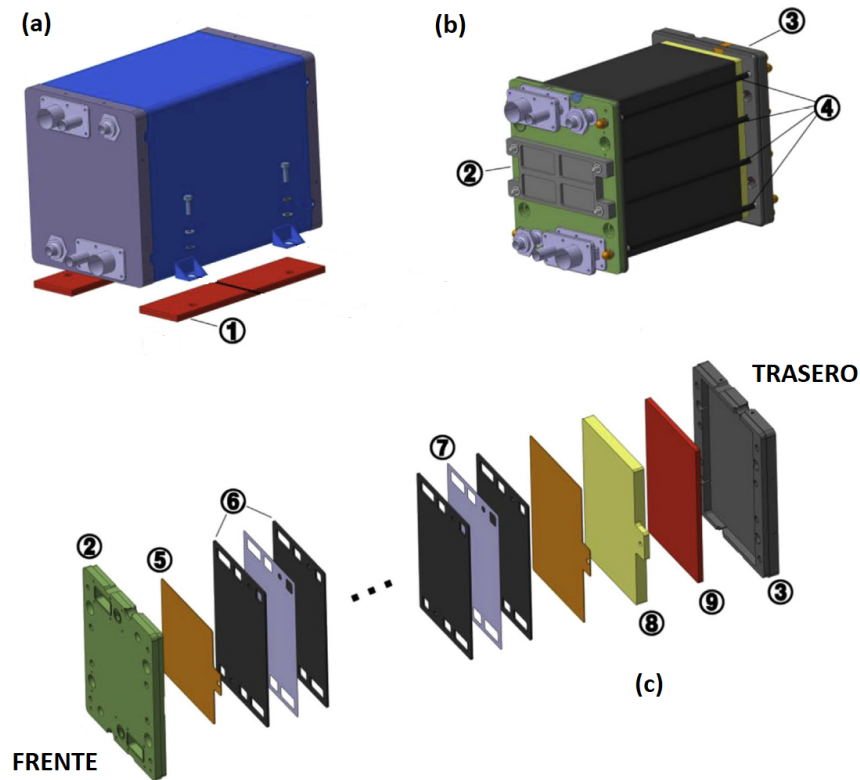


Figura 2.2: Celda de combustible “PEMFC” con protección (a). Celda de combustible (b). Vista explosionada de la “PEMFC”. componentes: ① Acolchonado de goma; ② Plato frontal; ③ Plato trasero; ④ Pernos y tuercas; ⑤ Colector de corriente; ⑥ Platos bipolares; ⑦ Ensamble de membrana electrolítica; ⑧ Plato aislante; ⑨ Cojín de goma. [7].

Los materiales de cada componente:

- Plato frontal: Compuesto no metálico
- Colector de corriente: Cobre
- Platos bipolares: Grafito
- Plato aislante: Plástico fenólico
- Cojín de goma: Goma
- Plato trasero: Aleación de aluminio
- pernos y tuercas: Acero inoxidable

Esta tecnología está mejorando de forma vertiginosa y muy tentativa para los mercados debido a su potencial de no emisión de dióxido de carbono (CO_2), pero lamentablemente, aún existen elevados costes de producción de hidrógeno puro, elevado coste de almacenamiento y suministro de combustible, elevado costo de los componentes y sensibilidad por el deterioro de los catalizadores. Sin embargo, el avance tecnológico a gran escala se encargará de brindar nuevas soluciones a las problemáticas ingenieriles, dejando al hidrógeno como un gran candidato de reemplazo para los combustibles fósiles.

2.2. Load Haul Dump (LHD)

Los LHD son vehículos de transporte de mineral y, generalmente, son de un cierto tamaño que les permite operar-maniobrar en espacios reducidos, como túneles. La función principal es capturar el material desde los puntos de extracción para finalmente ser depositados en los piques, vaciando el material.



Figura 2.1: LHD en operación. Catálogo Sandvik LH410.

Estas máquinas existen en modalidad diésel y eléctricas. También se encuentran en modo de operación manual, tele-comandada y, recientemente, en modo autónomo. El movimiento del LHD es generado por un par de cuerpos (eje trasero y delantero), conectados por una articulación que permite una flexibilidad en los túneles mineros por donde se desplaza.

La Figura 2.1 muestra un LHD Sandvik LH410. Las capacidades de transporte de mineral van desde 3,6 a 25 [ton], y se utilizan en más de un 75 [%] de las minas del mundo.

2.2.1. Características técnicas

Las características técnicas del cargador frontal se encuentran en el Apéndice B. Fueron obtenidas a través de la página web de Sandvik.

2.3. Efecto de las vibraciones y golpes en el desempeño de las FCs

La fiabilidad del rendimiento y la integridad mecánica son los principales obstáculos en la comercialización masiva de “PEMFC” (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) para aplicaciones con entornos hostiles [8]. En la literatura se puede encontrar un gran número de artículos donde se estudia el desempeño de una celda de combustible bajo condiciones de golpes y vibraciones. En estos artículos, generalmente, se categoriza de las siguientes maneras:

- Naturaleza del análisis
- Tipo de excitación
- Efectos observados o analizados
- Otros parámetros

En la Figura 2.1 se encuentra un resumen de lo que existe en la literatura de acuerdo a vibraciones y golpes y que resume de acuerdo a los puntos señalados anteriormente los aspectos fundamentales. Varios problemas de diferentes tipo fueron detectados, encontrándose en ellos holgura en fuerza de acople de las celdas, filtración de gases, incremento de la resistencia eléctrica, daño estructural y roturas. Inclusive, hay estudios que han encontrado algunos beneficios en cuando a la liberación de residuos (H_2O).

Analysis	Excitation	FC operation mode	FC power	Observed/analyzed effects
- experimental	underground shock and vibration	off	35 W	power, voltage, mechanical integrity
- analytical & FE simulation	harmonic vibration	NA	NA	enhancing water removal
- analytical	harmonic vibration	NA	NA	enhancing water removal
- experimental	harmonic vibration	off	NA	leakage rate & mechanical integrity
- experimental & simulation	random & swept-sine vibration	on	NA	mechanical modelling
- experimental & simulation	swept-sine vibration	off → on	NA	mechanical modelling
- experimental	shock, & random & swept-sine vibration	off	500 W	voltage, power, & mechanical integrity
- analytical & experimental	harmonic vibration	on	NA	voltage
- experimental	NA	NA	NA	voltage, electrochemical surface area, catalyst hydrophobic nature, particle size, internal resistance
- analytical & FE simulation	harmonic vibration	NA	NA	natural frequency
- experimental	harmonic vibration	on	NA	Pt particle agglomeration, growth in CT of MEA
- experimental	real road condition	off	50 kW	gas tightness & electrical insulation
- experimental	real road condition	off	45 kW	polarization curve: OC voltage, Tafel slope, ohmic resistance
- experimental	real road condition	off	45 kW	hydrogen utilization & efficiency
- experimental	real road condition	off	5 kW	FC electrochemical impedance
- experimental	real road condition	off	90 kW	all effects with refined methods and models
- experimental & simulation	random & swept-sine vibration	on	13 kW	mechanical modelling
- FE simulation	harmonic vibration	NA	NA	crack/delamination propagation
- FE simulation	harmonic vibration	NA	NA	modal analysis, gas leakage, & clamping torque
- experimental	harmonic vibration	on	NA	voltage, power, efficiency, hydrogen utilization
- experimental	shock, & random & swept-sine vibration	on & off	500 W	power, gas leakage, & clamping torque
- FE simulation	shock	NA	NA	slippage between unit cells
- analytical	shock	NA	NA	structural strength, gas tightness, & slippage
- FE simulation	harmonic excitation	NA	NA	modal analysis

Figura 2.1: *Resumen de las consecuencias de golpes y vibraciones categorizadas que se encuentran en el artículo [8]. En la bibliografía del artículo se encuentran los detalles de todos los artículos mencionados.*

La mayoría de estos estudios está enfocado en vibraciones armónicas. Estos estudios generalmente estudian los problemas que traen las vibraciones, pero existen dos estudios que han propuesto que las vibraciones estructurales y acústicas podrían traer ventajas en un fenómeno que ocurre dentro de las FC en operación llamado “flooding” (inundación), que se traduce en que debido a la acumulación de agua en uno de los platos donde ocurre una obstrucción de los gases, impidiendo las reacciones químicas que entregan como resultado corriente eléctrica [9] [10] [11]. El resto de la literatura está enfocado en efectos negativos por choques y vibraciones en FC. Estos efectos han sido estudiados a diferentes escalas: desde efectos microscópicos de aglomeración de platino en la capa catalizadora hasta efectos en el torque de los pernos de anclaje y general eficiencia de la FC.

2.3.1. Vibración armónica

Las vibraciones armónicas pertenecen a las vibraciones periódicas. Diloyan et al, [12] estudiaron experimentalmente el efecto de las vibraciones mecánicas en la aglomeración y crecimiento de partículas de platino en la capa catalizadora del electrodo (MEA) de una FC expuesta a niveles de vibraciones de 1 y 4 [g] con frecuencias iguales a 20 y 40 [Hz] por 300 [horas]. Observaron que el diámetro promedio de las partículas bajo la condición de vibración era 10 [%] más pequeñas que las que no lo estaban. En una escala mayor, Banan et al. [13] [14] investigaron a través de elementos finitos la tasa de propagación de la rotura y delaminación en la interfase membrana-catalizador cuando se somete a excitaciones armónicas y ciclos higrótérmicos.

Tomaron frecuencias que van desde 5 a 40 [Hz] y aceleraciones de 1 a 4 [g] con una duración de 300 [horas]. Se concluyó que la vibración produce la delaminación, mientras que los ciclos higrotérmicos, propagación de rotura. Un estudio realizado por Breziner et al. se enfocó en el transporte de agua de la PEMFC en operación [15], donde se expuso una celda a 10, 20 y 50 [Hz] y aceleraciones de 2, 3 y 5 [g]. En general, concluyeron un decaimiento de un 6 [%] en el desempeño de la celda. En la Figura 2.2 se muestra un resumen de lo descrito anteriormente.

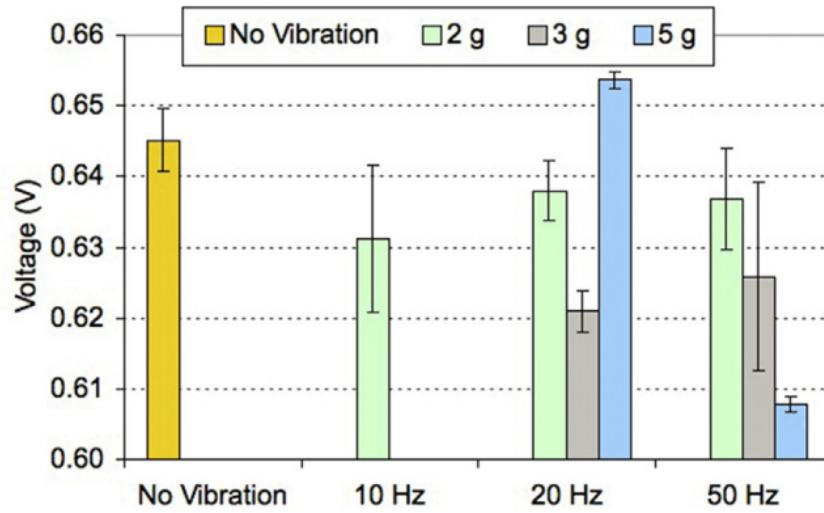


Figura 2.2: Resumen del experimento donde la salida es el voltaje y las entradas son las vibraciones de cada caso [15].

2.3.2. Vibraciones

Se encontraron artículos donde se estudió el desempeño de las celdas bajo vibraciones. Estas vibraciones fueron tomadas, por ejemplo, por aviones bajo turbulencias, impactos de automóviles o vehículos militares recorriendo caminos off-road. Se señala que a pesar de que son reales y prácticas, no son bien ligadas al contexto de las celdas.

Imen and Shakeri, [16] es de los estudios más rigurosos sobre vibraciones en celdas de combustible que analiza el impacto a corto y a largo plazo. Sometieron a una celda de 500 [W] a vibraciones por 2 [horas] operativa y 44 [horas] apagada a frecuencias que van desde 10 a 1.000 [Hz] y aceleración igual a 1.5 [g] (RMS). En ambos casos, se analizó la curva de polarización, filtración de hidrógeno y torque de los pernos. Los resultados indicaron que a corto plazo no había problemas con el desempeño de la celda, mientras que a largo plazo el desempeño de la celda decayó.

2.3.3. Golpes

Los golpes están presentes en la mayoría de los medios de transporte, ya sea aviones, autos, camiones, o buses debido a la irregularidad de los caminos, donde existan aceleraciones o desaceleración abruptas. Los casos más complicados pueden llegar a ser incluso los choques. Es importante entonces el estudio de los golpes, además de las vibraciones.

En [17] la amplitud de los golpes y la duración fue de 30 [g] y 15 [ms], comparado con la forma de golpes “sawtooth” (dientes de sierra) con amplitud de 10 [g] y duración de 11 [ms] de [16]. Ambos estudios no reportaron efectos significativos. Wu et al. [18] usó elementos finitos para analizar los efectos de golpes y respuestas mecánicas de una celda de 100 células de una celda de combustible. Usaron golpes de pulsos rectangulares con amplitudes de 50 [g] de 15 [ms] y se encontró que existe un desplazamiento relativo entre celdas, siendo el máximo a los extremos de la celda.

2.3.4. Excitaciones reales

Es importante también someter las celdas de combustible a las variadas condiciones y ambientes donde operan, con el objetivo de mejorar los diseños o proteger los sistemas. Esto se puede hacer de dos maneras, la primera, instalando una celda en el equipo mecánico que se desea alimentar con energía o, la segunda, midiendo multidireccionalmente las excitaciones para poder aplicarlas en algún laboratorio.

Hou et. al estudió los efectos de vibraciones en resistencia óhmica y pérdida de transferencia de carga [19]. Una celda de 5 [kW] (siempre apagada) fue sometida a 200 [horas] con las señales de aceleración y los resultados muestran que la resistencia óhmica alcanza una tasa promedio de 0.035695 [%] por hora y que la carga de transferencia de la celda cae a 4.4 [%] de su valor inicial. En otro estudio, Houw et. al [20] realizó un nuevo test de 250 [horas] (por intervalos) a las misma celda y encontró que la curva de polarización de la celda de combustible muestra una degradación, incrementando la resistencia óhmica y pérdida de transferencia de masa a altas densidades de corriente. En la Figura 2.3 se logra apreciar la degradación del desempeño de la celda.

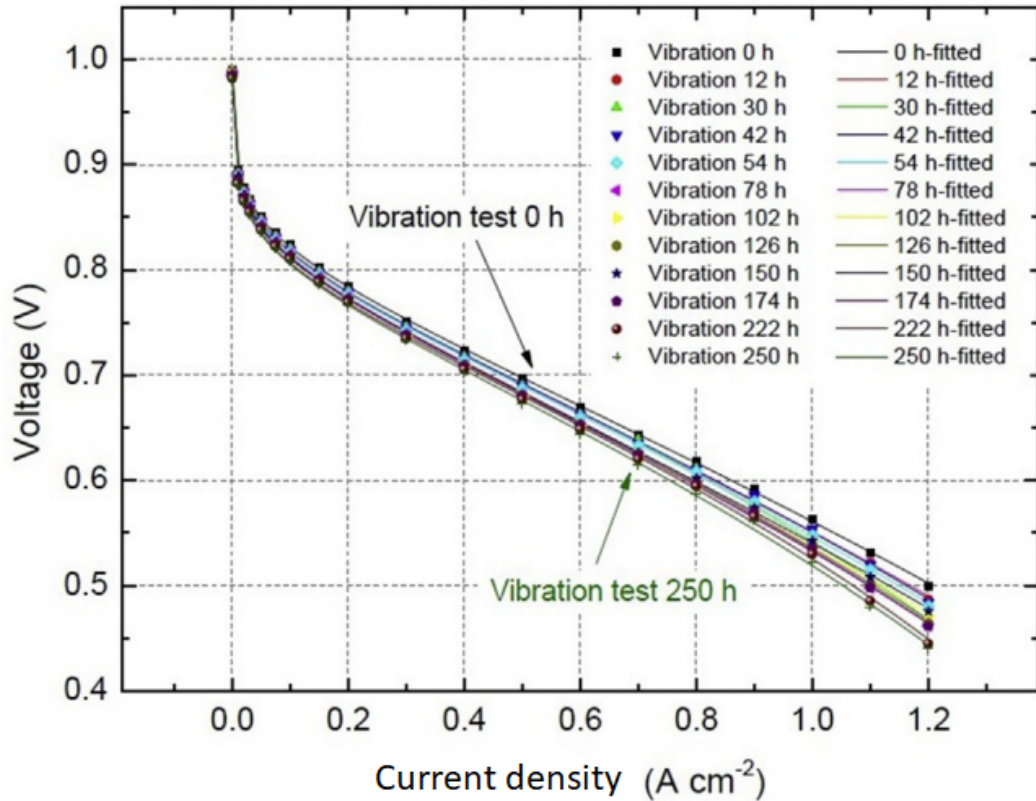


Figura 2.3: Curva de polarización de la celda de combustible sometida a 250 [horas] de vibraciones [20].

Resumiendo toda esta gran variedad de estudios, que abarcan desde pequeñas celdas de combustibles (35[W]) hasta algunas considerablemente grandes (90 [kW]) se infiere que cada caso es independiente de los demás, que no existe fenómenos genéricos para las celdas estudiadas. Se ha encontrado, por lo general, que las celdas empeoran su desempeño bajo condiciones de golpes y vibraciones, pero que bajó ciertos parámetros, las vibraciones podrían incluso ser beneficiosas para un mejor desempeño de la celda [8].

Por otro lado, para la comercialización de las FC para vehículos, la seguridad debe ser un tema relevante a considerar desde el momento de su fabricación hasta el evento inesperado que podría dañar la celda. Solo en USA se producen 9 millones de toneladas al año de hidrógeno que son utilizados de manera segura en diferentes aplicaciones [6]

2.3.5. Protección para las FC

Existen varias técnicas para proteger equipos de las vibraciones y golpes, dos importantes que son muy utilizadas son las llamadas aislantes de vibraciones pasivas y sistema de resorte de masa amortiguado. Estas técnicas pueden reducir los niveles de vibraciones en órdenes de magnitud.

Aislante de vibraciones pasivas Es la aislación de vibraciones a través del uso de goma o resortes. Pueden ser sistemas muy sencillos, pero eficientes que se usan en una gran cantidad de equipos mecánicos como bombas y motores, entre otros. Existen sistemas bastante comunes como aisladores neumáticos, resortes mecánicos, almohadillas o láminas de materiales, aisladores y soportes de caucho, aisladores de rigidez negativa e incluso se pueden diseñar.

Sistema masa resorte-amortiguador Es un sistema que comprende masas, resortes y amortiguadores con el propósito de reducir vibraciones y hasta los ruidos. La particularidad de este sistema es que absorbe la energía de la perturbación, atenuando el movimiento del sistema inhibiendo la oscilación.

Capítulo 3

Diseño de propuesta técnica

En esta sección se detallan los aspectos técnicos fundamentales de la evaluación técnica-económica (memoria) que se realizó el año 2019 por un memorista de Codelco.

3.1. Requerimientos de potencia

Los datos de torque y r.p.m fueron obtenidos a través de una aplicación llamada **Optimine** e implementada en algunos LHDs de la mina El Teniente, Rancagua.

Torque Se presenta en la Figura 3.1 el torque realizado por el cargador frontal en una jornada ordinaria de trabajo.

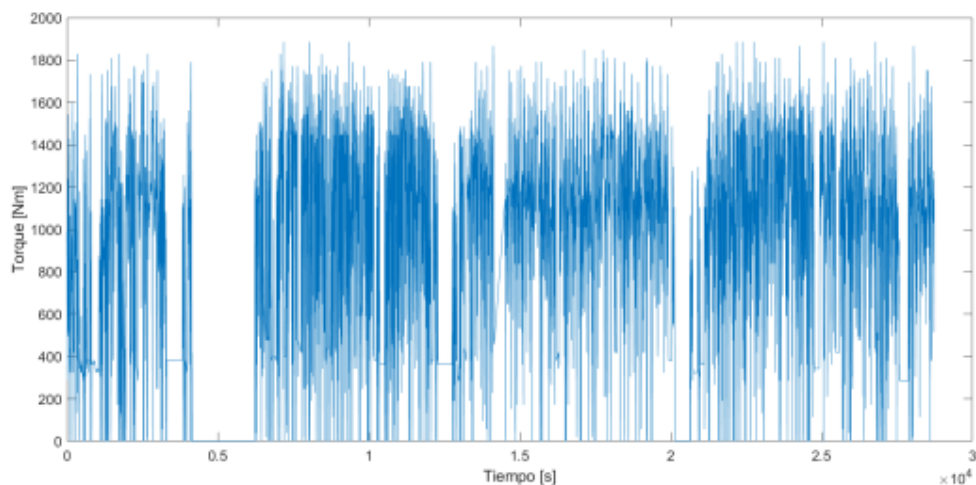


Figura 3.1: *Torque realizado por un LHD durante una jornada de trabajo [1].*

RPM La Figura 3.2 muestra las RPM del un LHD durante una jornada de trabajo.

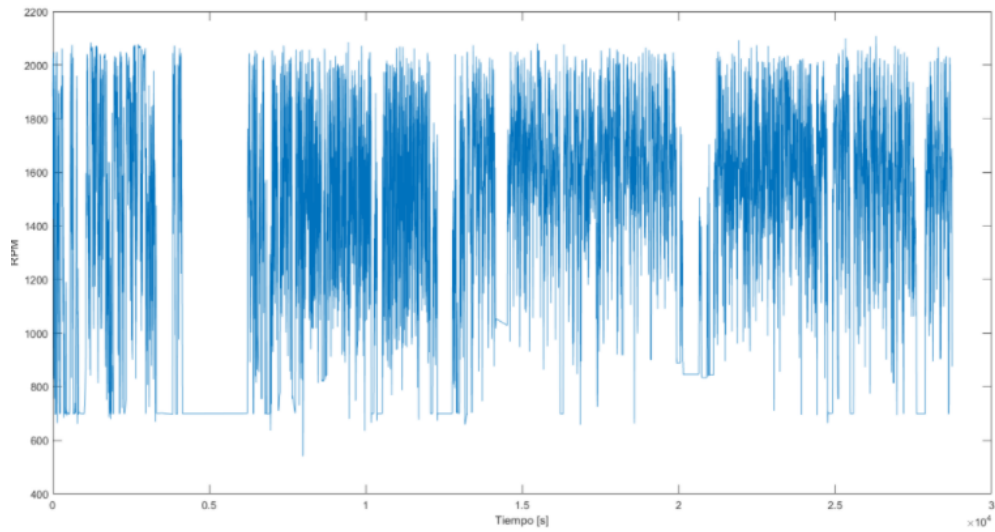


Figura 3.2: RPM realizadas por el motor diésel de un LHD durante una jornada de trabajo [1].

Finalmente, se presenta la potencia instantánea obtenida con los datos de torque y las RPM ya mostradas.

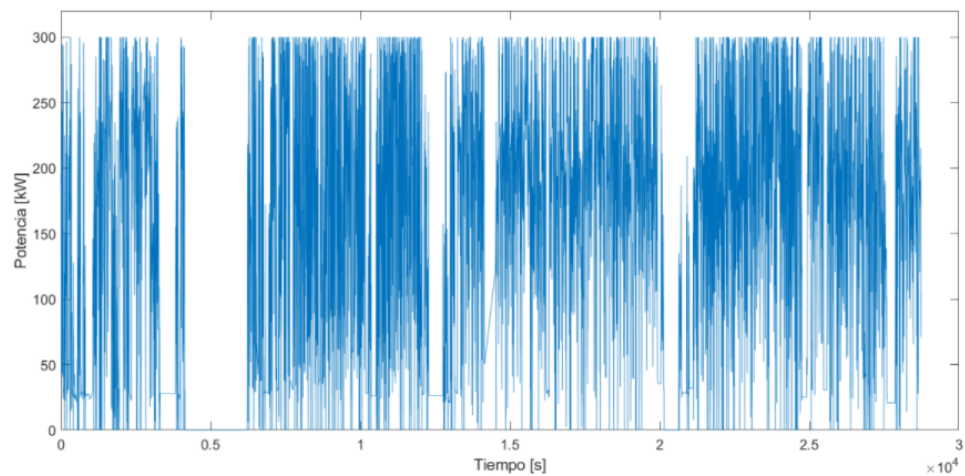


Figura 3.3: Potencia calculada por torque y RPM del LHD [1].

3.2. Configuración adoptada por la memoria previa

La configuración escogida en la memoria [1] contiene una fuente primaria (FC) y una fuente secundaria, que consta de un banco de supercondensadores y baterías. Esto permitiría una respuesta más dinámica frente a requerimientos energéticos, ya que en ciertos momentos existen cambios en las exigencias energéticas muy bruscas que la celda de combustible que es incapaz de suplir. La celda de combustible tiene solo una salida de energía, que tiene solo ese sentido,

debido a que no puede funcionar en sentido opuesto para regenerar combustible, a diferencia de las baterías que se pueden recargar con un freno de regeneración.

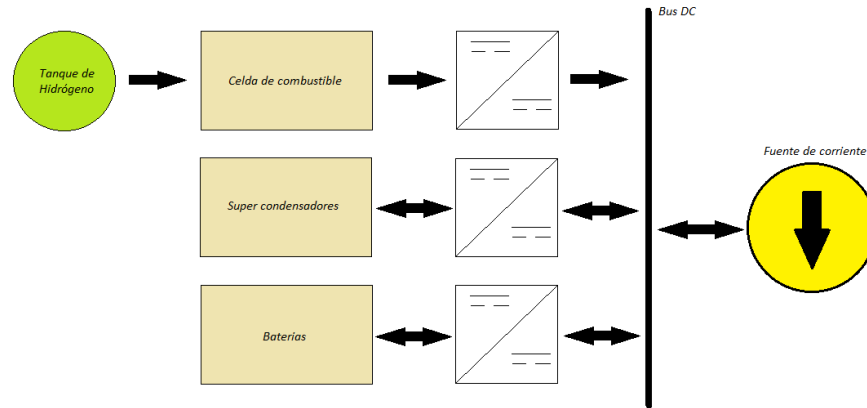


Figura 3.1: Configuración seleccionada de fuentes primarias y secundarias 1.

3.2.1. FC seleccionada

La Figura 3.3 muestra que la celda de combustible instalada debe proveer 163,63 $[kW]$ de potencia, equivalente a la media de potencia demandada en una ciclo de trabajo.

Por lo anterior, se seleccionó entre dos alternativas

- 2 celdas de 90 $[kW]$
- 1 celda de 180 $[kW]$

Para la segunda opción (2 celdas de 90 $[kW]$) se seleccionó como referencia la celda de combustible de Hydrogenics, modelo HYPM-HD180, la cual tiene una masa de 700 $[kg]$ y un volumen de 1,18 $[m^3]$. Además, entrega una potencia de 198 $[kW]$.

Se presentan las características técnicas en la Figura 3.2.

HyPM™ HD 180

Heavy Duty Fuel Cell Power Module

- Liquid-cooled advanced MEA PEM stack
- Integral Balance of Plant
- Advanced onboard controls and diagnostics
- Comes with low pressure cathode air delivery
- -46 °C sub-zero shutdown capability

Technical Data	
Rated Electrical Power	198 kW continuous
Operating Current	0 to 500 A _{DC}
Operating Voltage	360 to 720 V _{DC}
Peak Efficiency	55% ⁽¹⁾
Response	< 5 s from off to idle < 3 s from idle to rated power
Fuel	Hydrogen >99.98%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O) or 60% ethylene glycol / DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +55 °C operating -40 to +65 °C storage (<2 °C with automated freeze shutdown feature)
Communication Interface	CAN v2.0A (standard 11 bit)

⁽¹⁾ Efficiency based on LHV of H₂, 25 °C, 101.3 kPa, including onboard parasitic loads, excluding radiator fan and water pump



- Rapid start-up and dynamic response
- Unlimited start-stop cycling
- Robust, rugged and reliable
- No water for humidification required
- No nitrogen required for shutdown

Physical	
Dimensions L x W x H ⁽²⁾	955 x 1525 x 690 mm
Mass ⁽³⁾	654 kg
Volume ⁽³⁾	1005 L

⁽²⁾ Excluding air delivery and optional water pump

⁽³⁾ Including air delivery and optional water pump

Includes

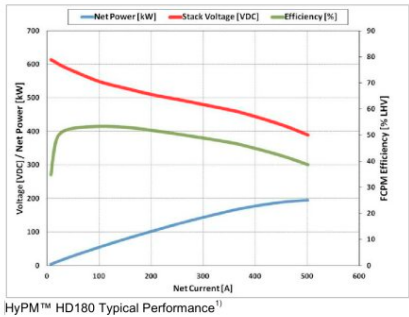
- Air delivery unit (low pressure blower)
- Integration and operation manual
- Product Warranty

Options

- Coolant pump
- Thermal management kit
- Diagnostics software
- Power electronics components

Applications

- Urban transit buses
- Heavy duty commercial fleet vehicles
- Industrial trucks
- Marine
- Aerospace



HyPM™ HD180 Typical Performance⁽¹⁾

Figura 3.2: Ficha técnica de la celda de combustible de 198 [kW]

3.2.2. Tanque de hidrógeno

Los tanques de hidrógeno más comunes suelen ser solo dos alternativas, según la presión de almacenamiento, 350 y 700 [bar],

- Presión 350 [bar]→Volumen 42,7 [L]
- Presión 700 [bar]→Volumen 25,7 [L]

Estas condiciones de almacenamiento consideran 1 [kg] de hidrógeno. Además, por la cantidad de ahorro de volumen en función de la presión es que fueron seleccionados los estanques de presión igual a 700 [bar].

Teniendo en cuenta la presión a la que se almacena el hidrógeno en los estanques se puede dimensionar cuantos kilogramos de esta molécula (H_2) se necesita para suplir la demanda, teniendo en cuenta que, tiene un poder calorífico de $120 [MJ/kg]$, y que la energía para un ciclo completo es de $1.123,2 [kWh]$ [1], más un 10 [%] de margen, por cada turno se necesitan $37,1 [kgH_2]$, lo que se traduce en 7 tanques de hidrógeno, los cuales tienen una masa de $980 [kg]$ y utilizan un volumen de $1,582 [m^3]$ [1].

3.2.3. Baterías

Las baterías que se seleccionaron para el sistema son baterías comerciales ThunderSky LFP90AHA. Estas baterías son de litio-forrosfosfato especiales para la electro-movilidad.

3.2.4. Super-condensadores

Los SC tienen como función suministrar los cambios bruscos de demanda de energía eléctrica. Esto debido a que poseen un dinamismo mucho mayor que las celdas de combustibles o las baterías en cuanto a entrega de energía.

En el trabajo de titulación “Estudio técnico-económico del uso de hidrógeno en aplicaciones de electro-movilidad en Codelco División El Teniente” se utilizó como base los SC Maxwell BMOD0063-P125, los cuales son de $63 [F]$ y $125 [V]$ [1].

Se emplearon 5 conectados en serie para obtener una capacitancia equivalente de $12,5 [F]$. Este sistema contiene una masa total de $305 [kg]$ y un volumen de $0,297 [m^3]$ [1].

3.3. Balance de masa y volumen

Fue muy importante conocer del powertrain del LHD diésel y sus componentes debido a que las modificaciones que se realizarán a futuro en el LHD impactarán, no solo de forma volumétrica, sino que también podría verse modificado el centro de masa, inercia, radios de giro en el transporte, etc.

Los principales componentes que se reemplazaran en LHD son

- Motor diésel (1)
- Estanque diésel (1)
- Filtro de gases

Además, el radiador del cargador se reduciría a la mitad por el simple hecho de que los motores eléctricos alcanzan temperaturas considerablemente menores.

Con esta información y en base al estudio técnico, se obtiene que al reemplazar el powertrain diésel del LHD por un sistema de potencia en base a celdas de combustibles y un motor eléctrico, la masa aumentará alrededor de 1.100 [kg]. Este aumento de masa no es muy relevante debido a que es un 2 [%] del equipo descargado. Finalmente, se obtuvo que el equipo de celdas de hidrógeno, SC y baterías, entre otros, queda con una holgura de 0,1 [%] dentro del cargador frontal [1].

Finalmente, la propuesta que entrega una idea de la distribución en el espacio del LHD se representa en la Figura 3.1.

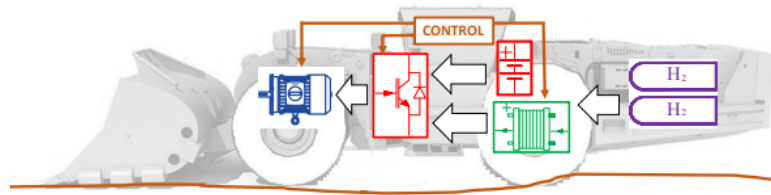


Figura 3.1: Disposición espacial de la Celda de combustible (verde) y otros dispositivos montados en el LHD [21].

Capítulo 4

Marco teórico

En esta sección se muestran las consideraciones teóricas en las que se sustenta este proyecto.

4.1. Funcionamiento de una FC

El principio de funcionamiento en el que se basan las Pilas de Combustible es el inverso al de la reacción electrolítica; oxígeno e hidrógeno se combinan para formar agua con producción de energía eléctrica y calor. Se trata, por lo tanto, de una reacción limpia, en la que el único producto es el vapor de agua que puede ser liberado a la atmósfera sin ningún peligro para el medio ambiente.

El hidrógeno (H_2) penetra por el electrodo negativo (ánodo) y se disocia en presencia del catalizador en iones positivos H^+ y electrones. El oxígeno, (O_2), procedente del aire penetra por el electrodo opuesto (cátodo) y se disocia igualmente en presencia del catalizador en iones (O_2). Los iones positivos del hidrógeno se escapan a través del electrolito en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo. Si existe un camino eléctrico entre el ánodo y el cátodo los electrones lo recorrerán, produciendo corriente eléctrica. En el cátodo los iones hidrógeno, el oxígeno y los electrones se vuelven a combinar para formar moléculas de agua.

Cuando el hidrógeno es transportado a la capa de difusión de gases (GDL) y alcanza el ánodo se produce la reacción de oxidación para luego los protones de hidrógeno atravesar la membrana. Por el otro lado, el oxígeno es transportado a la GDL alcanzando el cátodo, donde se encuentra con los protones del hidrógeno y sus electrones generando dos moléculas de agua. Es importante destacar que la velocidad de la reacción en el cátodo es más lenta que la del ánodo debido a que en un punto la molécula de O_2 debe coincidir con cuatro protones H^+ y e^- .

Reacción global Como combinación de la reacción anódica y catódica se obtiene la reacción global (4.1). Además, es importante señalar que se produce un movimiento de electrones debido a la tensión generada entre cátodo y ánodo.



Curva de polarización

El desempeño de la FC se puede representar mediante una curva de polarización, que representa el comportamiento de la tensión [V] de la celda versus la densidad de corriente de operación [$\frac{A}{cm^2}$].

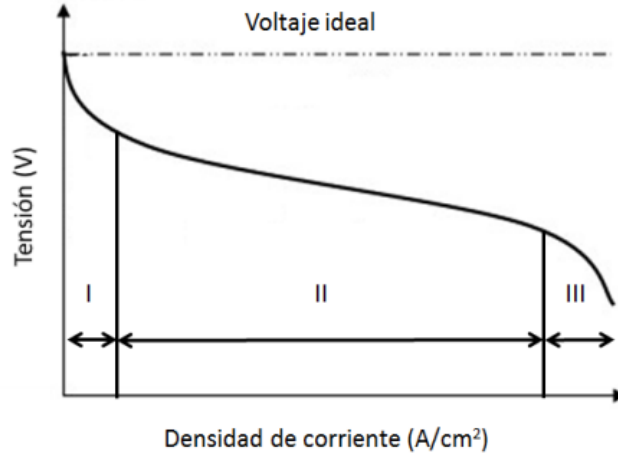


Figura 4.1: Curva de polarización típica de una FC [22].

La curva de la Figura 4.1 representa una curva de polarización clásica de una mono celda. Además, se observa que la curva se divide en 3 regiones: la región I, que se denomina zona de pérdidas por activación, la zona II, que indica pérdidas óhmicas y la zona III, que indica pérdidas por concentración.

La expresión para su cálculo está dada por la ecuación de Nerst (4.2)

$$V_{th}(T, P) = \frac{\Delta G^{\ddagger}(T)}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{\alpha_{H_2}^{v_{H_2}} \alpha_{O_2}^{v_{O_2}}}{\alpha_{H_2O}^{v_{H_2O}}} \right] \quad (4.2)$$

Donde:

$\Delta G^{\ddagger}(T)$: Energía libre de Gibbs [J]

n : Número de electrones equivalentes por mol de reactante [$\frac{eq}{mol}$]

T : Temperatura [K]

R : Constante universal de los gases ideales [$\frac{J}{molK}$]

F : Constante de Faraday [$\frac{C}{eq}$]

v_i : Coeficiente estequiométrico de la reacción del componente i

a_i : Coeficientes de actividad del componente i (Puede sustituirse por la presión parcial del componente si se consideran que son gases ideales)

De esta manera, el voltaje de pila puede determinarse como la máxima tensión que puede suministrar una celda menos todas las pérdidas de ésta 4.3.

$$V = V_{th} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (4.3)$$

4.2. Teoría de vibraciones

El movimiento vibratorio es un cambio en la configuración de un sistema mecánico en torno a su posición de equilibrio. Su característica principal es que puede ser periódico, frecuentando el movimiento armónico simple, y por lo tanto, adquiriendo importancia.

Por otro lado, los sistemas mecánicos al ser sometidos a fuerzas durante tiempos prolongados, principalmente periódicas, cambian sus configuraciones iniciales, lo que termina perjudicando el funcionamiento o presentando molestias quien los opera y reducen su vida útil.

Componentes de un sistema mecánico

Un sistema mecánico consta de algunos componentes fundamentales para su dinámica de movimiento, como por ejemplo, resortes y disipadores de energía. Además, la componente de inercia toma lugar en el cálculo de energía cinética cuando el cuerpo está en movimiento. Se puede expresar la energía cinética de un cuerpo en movimiento como

$$T = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}Iw^2 \quad (4.4)$$

Donde:

m : Masa del cuerpo

V : Velocidad del centro de masa del cuerpo

I : Inercia del cuerpo

w : Velocidad angular

Ley de Hooke : Cuando un resorte es sometido a un desplazamiento, la propiedad de rigidez de un resorte permite que este genere una fuerza de compresión o tracción de la forma

$$F = kx \quad (4.5)$$

Donde:

F : Fuerza aplicada sobre el resorte

x : Desplazamiento que se produce en el resorte

k : Constante de elasticidad

Un amortiguador es un dispositivo mecánico que suma a un sistema mecánico la propiedad de disipar energía a través de un fluido viscoso. Un disipador de energía lineal tiene relación de fuerza y velocidad de forma

$$F = cv \quad (4.6)$$

Donde:

F : Fuerza aplicada sobre el amortiguador

c : Coeficiente de disipación

v : Velocidad de la masa a través del fluido

4.3. Vibraciones masa con resortes

Ajustando un cuerpo de masa m en el extremo de un resorte comprimido o estirado, como se muestra en la Figura 4.1.

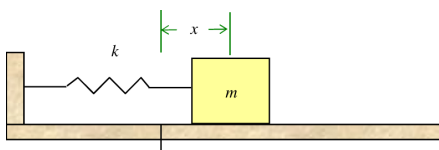


Figura 4.1: Sistema mecánico fuera de su posición de equilibrio

Ignorando las fuerzas de resistencias externas (resistencia del aire o fricción) entonces la segunda ley de Newton, se obtiene la ecuación diferencial 4.7 que describe el movimiento de la Figura 4.1

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0 \quad (4.7)$$

donde $w = \sqrt{k/m}$ es la frecuencia. Este movimiento es llamado **movimiento armónico simple**.

4.4. Vibraciones amortiguadas

Si se considera una masa dentro de un fluido que, al mismo tiempo está anclado a un resorte, se produce una fuerza de amortiguamiento similar a la de un automóvil. La fuerza de amortiguamiento resulta ser proporcional a la velocidad de la masa dentro del fluido y actúa en sentido contrario al movimiento de la masa. La Figura 4.1 muestra el escenario planteado.

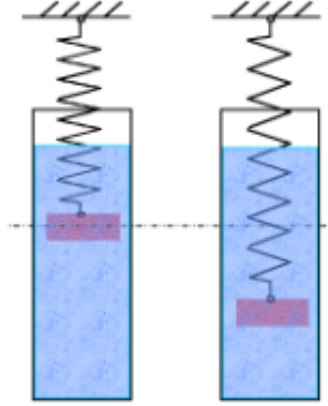


Figura 4.1: Sistema mecánico masa-amortiguador.

Por otra parte, realizando un diagrama de cuerpo libre y según la segunda ley de newton se obtiene

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \text{fuerza restaurada} + \text{fuerza de amortiguamiento} = -kx - c \frac{dx}{dt} \quad (4.8)$$

o bien

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx + c \frac{dx}{dt} = 0 \quad (4.9)$$

la ecuación 4.9 es una ecuación diferencial lineal de segundo orden y su ecuación característica es $mr^2 + cr + k = 0$.

4.5. Vibraciones forzadas

Ahora se considera, además del movimiento de la fuerza del resorte y la fuerza del amortiguamiento, una fuerza externa $F(t)$.

Según la segunda ley de Newton

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \text{Fuerza restauracion} + \text{Fuerza de amortiguamiento} + \text{Fuerza externa} \quad (4.10)$$

Queda una ecuación diferencial no homogénea:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(t) \quad (4.11)$$

Es importante destacar en estos escenarios que si la fuerza aplicada tiene la forma $F(t) = F_0 \cos w_0 t$ o similar, y $w = w_0$ entonces la fuerza aplicada refuerza la frecuencia natural, lo que tiene como consecuencias vibraciones de gran amplitud, fenómeno conocido como **resonancia**.

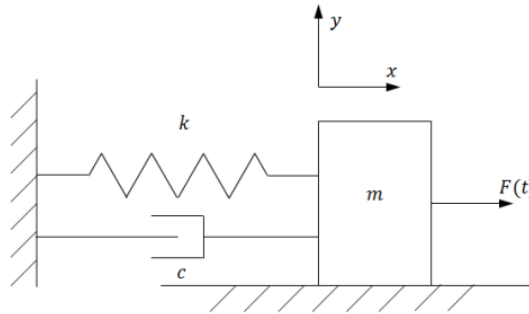


Figura 4.1: Sistema masa resorte-amortiguador.

Para una excitación de la forma $F(t) = F_0 \cos w_0 t$, se obtiene una solución particular de la forma

$$x_p = X \cdot \cos(w_0 t + \phi) \quad (4.12)$$

Donde:

x = Desplazamiento

X = Factor que depende de las características del sistema

w_0 = Frecuencia

t = Tiempo

ϕ = Ángulo de desfase

4.6. Control de vibraciones

El control de vibraciones es el diseño o modificación de un sistema para eliminar vibraciones indeseadas o simplemente para reducir la transmisión de movimiento.

Aislación de Vibraciones

Los aisladores de vibraciones se usan para proteger cuerpos que reciben fuerzas que se generan en la operación de una máquina. La combinación de un resorte y un disipador viscoso de energía sirve como un aislante de vibraciones. Se ilustra en la Figura 4.1 el sistema.

Por otro lado, una de las formas de representación dinámica más esencial del aislamiento de vibraciones se puede ver ilustrar a través del siguiente modelo que representa un cuarto de un automóvil de cuatro ruedas.

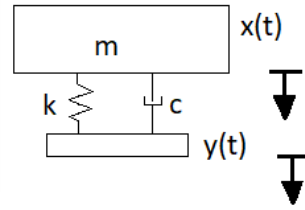


Figura 4.1: Sistema masa resorte-amortiguador para aislamiento de vibraciones.

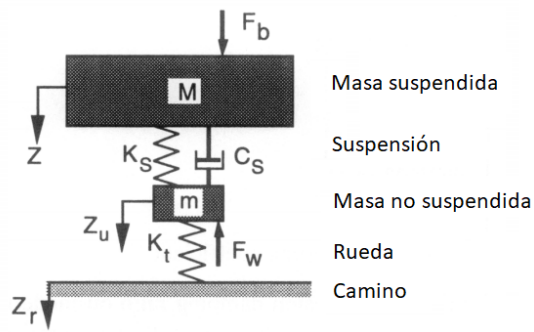


Figura 4.2: Modelo de suspensión del cuarto de un auto [23].

El modelo es capaz de moverse solo en dirección vertical. Además, la rigidez efectiva de la suspensión y de la rueda conectada en serie se denomina el “Ride Rate” y se determina a través de la fórmula

$$RR = \frac{K_s \cdot K_t}{K_s + K_t} \quad (4.13)$$

donde:

RR = Ride Rate

K_s = Rigidez de la suspensión

K_t = Rigidez de la rueda

Cuando no existe constante de amortiguamiento (damping) la frecuencia natural de rebote en cualquier esquina del modelo se determina como

$$w_n = \sqrt{\frac{RR}{M}} \quad (4.14)$$

ó bien

$$f_n = 0.159 \sqrt{\frac{RR}{W/g}} \quad (4.15)$$

donde:

M = Masa suspendida

$W = Mg$ = Peso de la masa suspendida

g = aceleración de gravedad

Por otro lado, cuando existe coeficiente de amortiguamiento, la resonancia ocurre en la “frecuencia natural amortiguada”, w_d , dada por la expresión

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \zeta_s^2} \quad (4.16)$$

donde:

ζ_s = tasa de amortiguamiento = $C_s / \sqrt{4K_s M}$

C_s = coeficiente de suspensión

Para una buena suspensión la tasa de amortiguamiento en vehículos modernos es de aproximadamente entre 0,2 y 0,4. Gracias a esto, la “frecuencia natural amortiguada” y la frecuencia natural son muy cercanas. Si se toma una tasa cae a 0,2, la “frecuencia natural amortiguada” es un 98 [%] de la frecuencia natural sin amortiguación. Cuando el valor de la tasa llega a 0,4, la similitud es un 92 [%]. Por esto es común encontrar que los vehículos son caracterizados con la frecuencia natural w_n [23]

Finalmente, para calcular el coeficiente de amortiguamiento, C , se consideran los parámetros anteriores, y a través de la expresión 4.17.

$$C = 2\zeta\sqrt{KM} \quad (4.17)$$

Donde:

C = Coeficiente de amortiguamiento (damping)

ζ_s = tasa de amortiguamiento

K = Coeficiente de rigidez

M = Masa del cuerpo

4.7. Análisis de señales

El objetivo del análisis de señales es captar la respuesta de un sistema a una excitación conocida de forma conveniente. Es normal, por un lado, que la respuesta obtenida muchas veces no proporcione mucha información debido a que a simple vista suele ser complicada la interpretación, pero, por otro lado, existe la respuesta en frecuencia que mostrará separadamente los puntos en los que se concentra la energía.

Se puede analizar señales con analizadores de espectros o frecuencia. Estos dispositivos analizan una señal en el dominio de la frecuencia separando la energía que posee la señal en varias bandas de frecuencia.

4.7.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es el procedimiento matemático que descompone una función en sus frecuencias que componen la onda, analógicamente, como un haz de luz se descompone en sus diferentes colores y longitudes de onda [24]. La función original con dominio en el tiempo se llama $f(t)$, mientras que la nueva función con dominio en la frecuencia se denota como $F(w)$, y es llamada la transformada de Fourier.

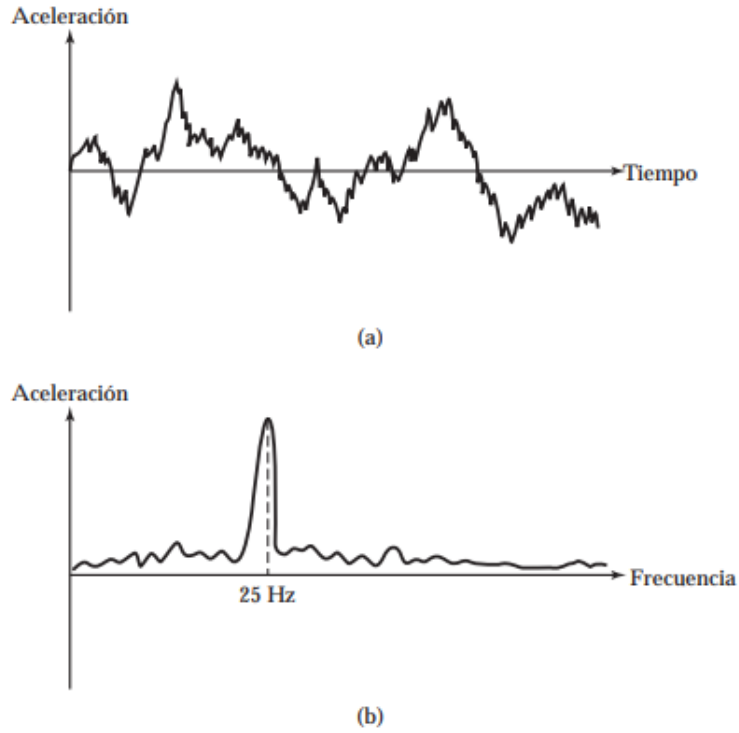


Figura 4.1: (a) Señal obtenida por un acelerómetro, (b) Señal procesada expresada en bandas de frecuencia [2].

La Figura (4.1) muestra en lo que se transforma una señal con dominio en el tiempo (a), en este caso una obtenida a por un acelerómetro, a la cual se le aplica la Transformada de Fourier, llevándola al dominio de la frecuencia (b).

La transformada de Fourier como ecuación matemática se presenta en la ecuación (4.18).

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-iwt} dt \quad (4.18)$$

Esta técnica resulta de gran importancia en el análisis de Fourier y en muchas otras aplicaciones. La transformada, como se puede apreciar en la Figura(4.1), se utiliza para estudios de señales y sistemas, así como en la óptica; se utiliza para realizar una tomografía, resonancias nucleares magnéticas, y en general, en todo tipo de instrumentación científica que se use para el análisis y presentación de datos [24].

4.7.2. Densidad Espectral de potencia (DEP)

La Densidad Espectral de Potencia (siglas DEP, en inglés Power Spectral Density (PSD)) de una señal es una función matemática que da a conocer la distribución de la potencia de dicha señal sobre las distintas frecuencias en donde está formada. En otras palabras, la función de densidad espectral muestra para cada frecuencia si la energía presente es mayor o menor. Así, se puede establecer el rango de frecuencias donde se concentran las variaciones de potencia [25].

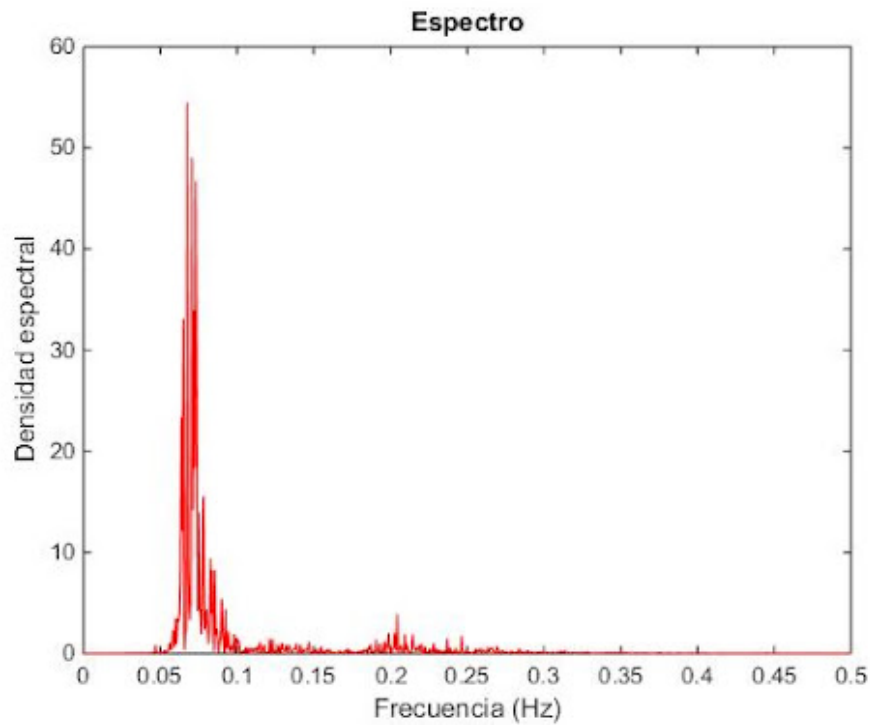


Figura 4.2: *Ejemplo gráfico de la densidad espectral de potencia versus la frecuencia del desplazamiento de las olas.*

Capítulo 5

Recopilación y cálculo de parámetros LHD y suelo minero

5.1. Cálculo de parámetros LHD para la modelación

Algunos parámetros relevantes para este estudio fueron encontrados en diferentes artículos relacionados con experimentos en LHDs y otros calculados de manera teórica. Estas publicaciones que contienen diversos tipos de análisis, no solo han sido con respecto a vibraciones en un LHD, sino que también tienen perspectivas económicas y ergonómica en algunos casos. Se debe destacar en este estudio que debido a la confidencialidad de las empresas, se debió estimar parámetros a través con herramientas del marco teórico.

Datos obtenidos desde la literatura:

- Masa delantera y trasera
- Momento de inercia del marco frontal
- Momento de inercia del marco trasero
- Rigidez vertical de la rueda
- Dimensiones del LHD y posición del centro de gravedad
- Amortiguación de la rueda delantera y trasera (mismo valor)

Las masas del LHD Sandvik LH410 (<https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-loaders-and-trucks/advanced-underground-lhds/lh410-underground-lhd/>) obtenida desde las especificaciones técnicas de la página web de Sandvik) delantera y traseras en condiciones de operación sin carga son las siguientes

Cuadro 5.1: Masas que componen el LHD Sandvik LH410 sin carga

Masa delantera (Front) [kg]	Masa trasera (Rear)[kg]	Masa Total [kg]
12.850	15.650	28.500

Las masas obtenidas del mismo LHD delanteras y traseras, pero en condiciones de operación con carga son las siguientes

Cuadro 5.2: Masas que componen el LHD Sandvik LH410 con carga

Masa delantera (Front) [kg]	Masa trasera (Rear)[kg]	Masa Total [kg]
10.250	28.250	38.500

Lo que indica un carga igual a 10.000 [kg].

En la literatura, se encontró para este mismo cargador frontal, específicamente, en el artículo [26], los momentos de inercia del cuerpo frontal y trasero del LHD Sandvik LH410. Gracias a que en este artículo se experimenta con el LHD para estudiar el comportamiento de vehículos articulados que trabajan bajo tierra, es que también se expone la ubicación de los centros de masa del cargador.

Cuadro 5.3: Parámetros del LHD del artículo [26].

Parámetros	Valores
Masa del marco delantero [kg]	12.850
Masa del marco trasero [kg]	15.650
Momento de inercia del marco delantero $[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	307.420
Momento de inercia del marco trasero $[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	380.320
distancia del centro de masa delantero a la articulación [m]	2,05
distancia del centro de masa trasero a la articulación [m]	1,59

El valor obtenido para la amortiguación, C , de las ruedas delanteras y traseras es 35 $[\text{KNs/m}]$, que fue adquirido en parte por el fabricante de neumáticos y parcialmente identificado por la base de datos medidos en terreno durante el estudio mostrado en el artículo [27]. Esto debido a que la goma, como material, tiene la propiedad de disipar energía cuando es sometida a esfuerzos, y además, tiene la propiedad de rigidez, lo que significa, que actúa como la suspensión de un auto/camión. Esta rueda denominada “29.5R29” es una rueda común en los LHDs y en los camiones de transporte de mineral donde los cargadores frontales vierten el mineral para posteriormente ser transportados a través de los túneles mineros.

Datos del LHD calculados en base a parámetros obtenidos:

- Rate Ride

- Frecuencia natural
- Frecuencia natural amortiguada
- Tasa de amortiguamiento
- Coeficiente de amortiguación delantero y trasero de la suspensión
- Coeficiente de rigidez de la suspensión trasera y delantera de la suspensión

Para obtener los parámetros de manera teórica, se obtuvo en la literatura que la frecuencia natural, w_n , para un camión de minería subterránea Haul Dump es de 1,7 [Hz] en vibración vertical [27], aproximadamente. El estudio se basa en un Haul Dump, que es similar a un LHD en geometría, tipos de ruedas y cargas entre otras características, es por esto que se utilizan los valores encontrados en el artículo recién mencionado.

Determinación de los parámetros Para la determinación de RR se asume una frecuencia natural de resonancia de 1,7 [Hz] para el LHD cuando contiene un payload de 10.000 [kg]. A través de la expresión (4.15). Se utiliza la frecuencia natural y no la “frecuencia natural amortiguada” porque anteriormente se señala que esta última es parecida en hasta en un 98 [%], y en un mínimo de 92 [%], lo que simplifica trabajo. Entonces, reordenando la expresión (4.15)

$$\left[\frac{f_n}{0,159} \right]^2 \cdot \frac{W/2}{g} = RR \quad (5.1)$$

Se sustituyen datos del marco delantero y marco trasero del LHD

- RR Eje delantero

$$\left[\frac{1,7[Hz]}{0,159} \right]^2 \cdot \frac{12.850/2[kg]}{g} = 74.869,0 \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (5.2)$$

- RR Eje trasero

$$\left[\frac{1,7[Hz]}{0,159} \right]^2 \cdot \frac{15.650/2[kg]}{g} = 91.184,1 \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (5.3)$$

Finalmente, utilizando la expresión (4.13) se obtiene K_s , ya que anteriormente se menciona que uno de los datos ya obtenidos es el coeficiente de rigidez asociado a la rueda, K_t . Teniendo en cuenta que ambas ruedas son del mismo material y un coeficiente de rigidez equivalente a 2.890 [KN/m] [28], o en otras palabras, 294.597,3 [kg/m] se obtiene K_s delantero y trasero.

Reordenando la ecuación (4.13) y despejando K_s queda la siguiente expresión

$$K_s = \frac{RR \cdot K_t}{K_t - RR} \quad (5.4)$$

- K_s Delantero

$$K_s = \frac{74.869,0 \left[\frac{kg}{m} \right] \cdot 294.597,3 \left[\frac{kg}{m} \right]}{294.597,3 \left[\frac{kg}{m} \right] - 74.869,0 \left[\frac{kg}{m} \right]} = 100.379,6 \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (5.5)$$

- K_s Trasero —

$$K_s = \frac{91.184,1 \left[\frac{kg}{m} \right] \cdot 294.597,3 \left[\frac{kg}{m} \right]}{294.597,3 \left[\frac{kg}{m} \right] - 91.184,1 \left[\frac{kg}{m} \right]} = 132.059,2 \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (5.6)$$

- K_s Delantero

$$K_s = 100.379,6 \left[\frac{kg}{m} \right] \cdot g = 984,7 \left[\frac{kN}{m} \right] \quad (5.7)$$

- K_s Trasero

$$K_s = 132.059,2 \left[\frac{kg}{m} \right] \cdot g = 1.295,5 \left[\frac{kN}{m} \right] \quad (5.8)$$

El siguiente paso es obtener el coeficiente de amortiguamiento, C , a partir del coeficiente de rigidez, K_s , anteriormente calculado y de la masa del LHD delantera y trasera, mediante la ecuación (4.17).

- C Delantero

$$C = 2 \cdot 0,4 \sqrt{984,7 \left[\frac{kN}{m} \right] \cdot 12.850[kg]/2} = 63,6 \left[\frac{kN \cdot s}{m} \right] \quad (5.9)$$

- C Trasero

$$C = 2 \cdot 0,4 \sqrt{1.295 \left[\frac{kN}{m} \right] \cdot 15.650[kg]/2} = 80,53 \left[\frac{kN \cdot s}{m} \right] \quad (5.10)$$

Capítulo 6

Modelación y simulación

Se identificaron las fuerzas actuantes en el LHD. La Figura 6.1 muestra la distribución de fuerzas a las que el LHD es sometido.

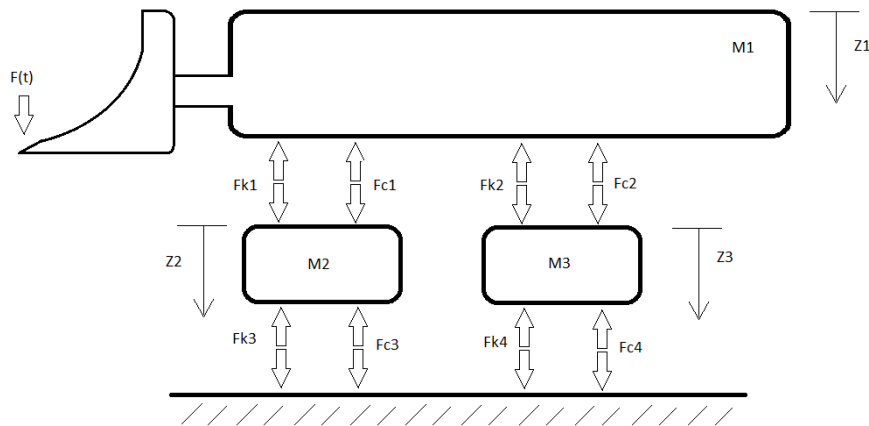


Figura 6.1: *Fuerzas y reacciones en el LHD.*

Modelación del sistema El modelo matemático del sistema es un sistema de cuatro grados de libertad y representa la mitad del LHD. El modelo se basa en un sistema de suspensión de un cuarto de automóvil, similar al usado por Avesh y Srivastava [29], donde se toma un cuarto de automóvil trasero y un cuarto de automóvil delantero, generándose la mitad del automóvil. Este modelo toma en consideración las siguientes puntos

- Algunas fuerzas de flexión, como la flexión del chasis, holguras o reacciones en las articulaciones, engranajes o juntas se consideran despreciables debido al bajo impacto que generan y así al mismo tiempo se obtiene un modelo más sencillo.
- Se considera que el material del que están hechas las ruedas tiene propiedades de disipación

de energía y coeficiente de rigidez, al igual que los amortiguadores (C y k), pero debido a que el factor de disipación de energía en las ruedas no es lineal, se simplificará y se utilizará como constante para simplificar el modelo.

Además, consta de un eje principal de masa $M1$ que une por la parte izquierda a la rueda de masa $M2$ y por el lado derecho a la rueda $M3$, a través de un sistema de amortiguación que consta de un resorte y un disipador de energía. Además, las masas $M2$ y $M3$ (ruedas) se conectan con el suelo a través de otro sistema de amortiguación, como se señala anteriormente, que consta también de resortes y disipadores de energía.

El modelo se presenta en la Figura 6.2.

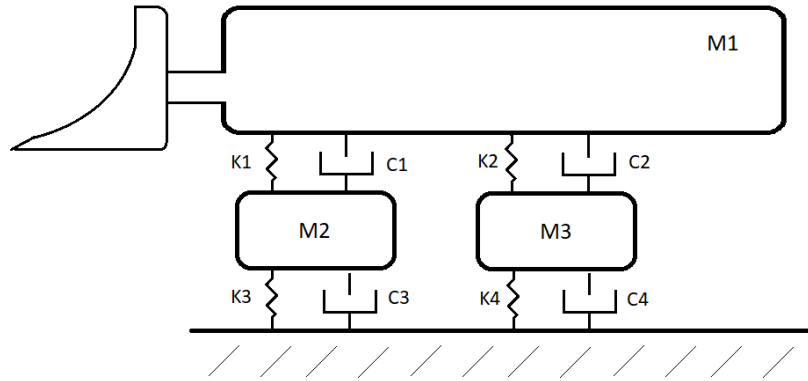


Figura 6.2: *Modelo de suspensión de cuatro grados de libertad.*

Este modelo está inspirado en el trabajo realizado por Avesh and Rajeev Srivastava [29], donde se estudia la suspensión activa de un automóvil para mejorar el confort que sienten los pasajeros a través de la estabilidad del automóvil.

el modelo esta hecho en la proporción 1:1 y fue realizado en base a las dimensiones de los catálogos adjuntados en el Apéndice B. Éstas fueron entregadas por Codelco y las dimensiones que se necesitaron y no aparecen en los catálogos fueron obtenidas a través de otro LHD de dimensiones y capacidades similares.

6.1. Simulación en Working Model 2D

El modelo anteriormente representado se ilustra en la Figura 6.1. Al someter a estímulos este modelo, se prevé que una deberían manifestarse las frecuencias naturales asignadas al LHD y, al menos, algunas de las frecuencias estimuladoras, debido a que es lo que la teoría de vibraciones señala.

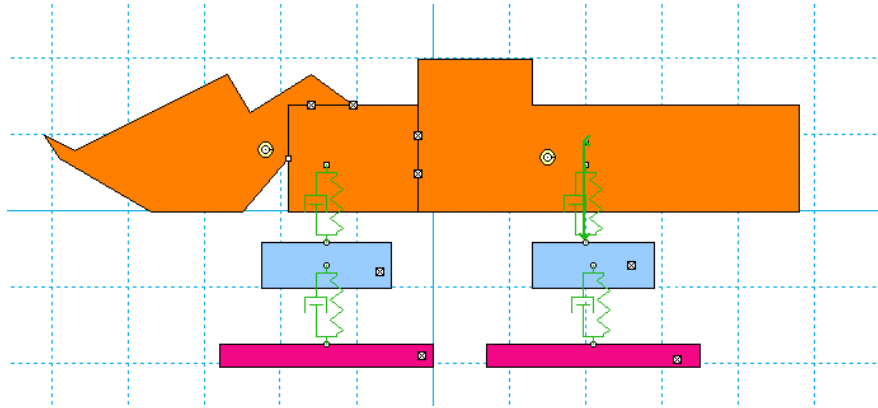


Figura 6.1: Modelo representado en el programa preparado para la simulación.

Para someter el modelo propuesto a una simulación de vibraciones se recaudó varios parámetros que, mediante relaciones matemáticas, se obtienen resultados que son incluidos y utilizados como entradas para el sistema. Estas entradas tienen relación con las características del suelo, por lo tanto, se buscó información en base a normas y estudios.

6.1.1. Vibraciones

Los estímulos (entradas del sistema) que fueron aplicados en la simulación de vibraciones son una suma de funciones senos. La ecuación 6.1 muestra la forma de la entrada ingresada al simulador. La forma de la onda contiene tantos senos como frecuencias posea un camino.

$$Onda = A \sin(2\pi f_n \cdot t) + B \sin(2\pi f_{n+1} \cdot t) + C \sin(2\pi f_{n+2} \cdot t) \dots \quad (6.1)$$

Donde:

Onda: Forma del estímulo que realiza el accionador

A , B y C : representan la medida del perfil del camino

f_n : frecuencias del camino

A grandes rasgos, lo que se buscó fue una combinación entre amplitud y frecuencia que caracterice el suelo para poder estimular el modelo. Para esto, se recurrió al libro “Theory of grounds” [30], el cual muestra la Figura 6.2 dada por la Society of Automotive Engineering, donde se aprecia la relación entre DEP y la frecuencia espacial encontrada en diferentes caminos.

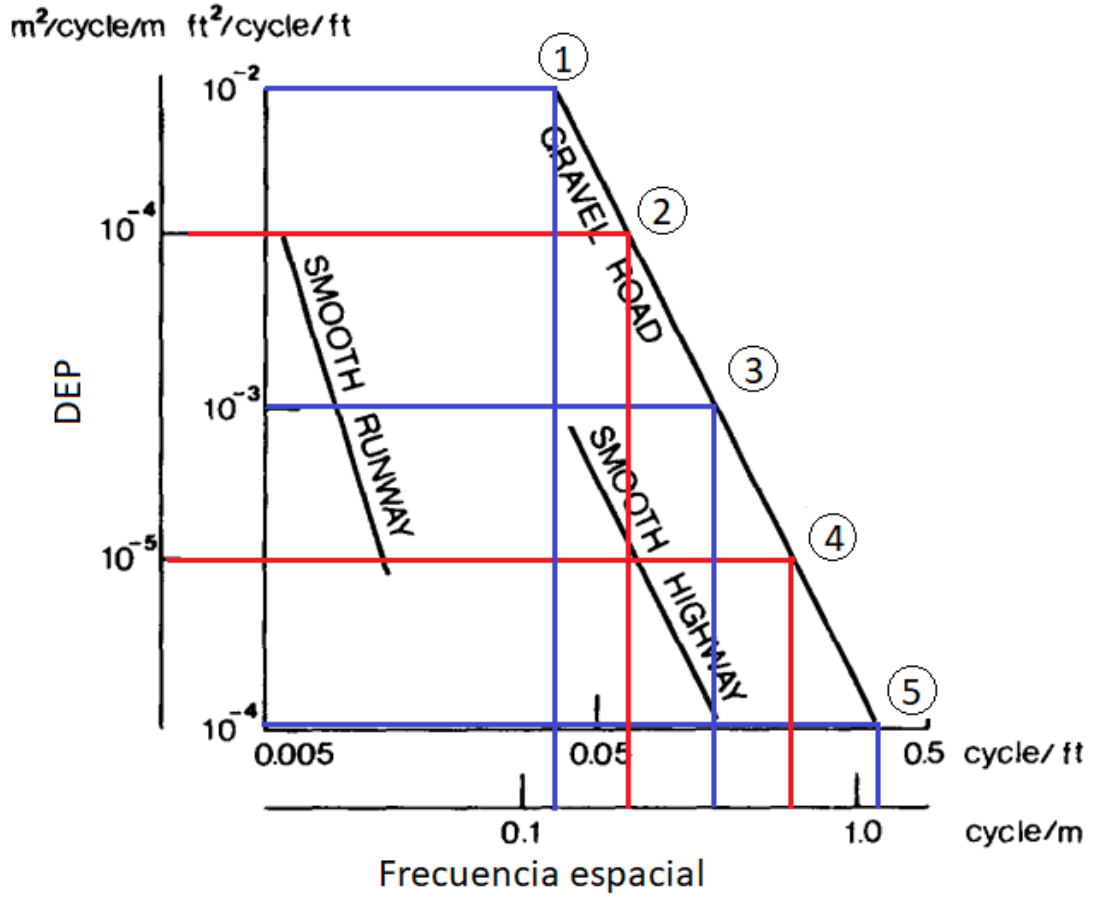


Figura 6.2: *Densidad Espectral de Potencia en función de la frecuencia espacial de varios tipos de camino [30].*

Se seleccionó la curva de datos del gravel road, ya que presenta las condiciones mas desfavorables de los caminos mostrados en la gráfica (uno de los caminos fue apartado del gráfico para tener mejor claridad). Fueron tomados cinco puntos, ①, ②, ③, ④ y ⑤, que representan diferentes DEP entre ellos pertenecientes a la curva, con el fin de obtener la frecuencia espacial de cada uno. Para eso se utilizó la ecuación matemática 6.2 [30]. Con esta relación, se identifican los puntos ubicados en el eje de abscisas, la cual posee forma de logarítmica.

$$DEP(\Omega) = C_{sp} \Omega^{-N} \quad (6.2)$$

Donde:

$DEP(\Omega)$: Densidad Espectral de Potencia

C_{sp} : $4.4 \cdot 10^{-6}$ [$m^2/ciclo/m$]

N : 2,1 [—]

Ω : Frecuencia espacial [$ciclo/m$]

Las frecuencias espaciales calculadas se muestran en la Tabla 6.1.

Cuadro 6.1: Frecuencia espacial obtenida a través de la ecuación matemática 6.2 .

DEP [$m^2/ciclo/m$]	Ω [$ciclo/m$]
$2,83 \cdot 10^{-4}$	0,13
10^{-4}	0,22
$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,38
10^{-5}	0,68
$2,83 \cdot 10^{-6}$	1,145

La frecuencia espacial expresada equivale a la frecuencia que poseen ondas sinusoidales que estimulan al modelo, montículos suaves a lo largo de un camino.

Además, teniendo en cuenta que el LHD posee un promedio de rapidez dentro de la mina de 10 [km/h] y una máxima de 20 [km/h] en producción [1], se calculó la frecuencia [Hz] a través de la relación 6.3.

$$f = \Omega V \quad (6.3)$$

Donde:

f : Frecuencia [Hz]

Ω : Frecuencia espacial [$ciclos/m$]

V : Velocidad del centro del LHD [m/s]

Para obtener las amplitudes que acompañan a cada una de las frecuencias calculadas, se utilizó la norma ISO 8608. Primero, La curva del gravel road 6.2 fue superpuesta en el gráfico que muestra la clasificación de rugosidad de superficie perteneciente a la norma ISO 8608. Como resultado, se encontró que el gravel road highway se encuentra en un camino “poor” y “average”. Para el estudio se optó por clasificar el camino de gravel road como “poor” (pobre) para seleccionar parámetros que se ven 6.3.

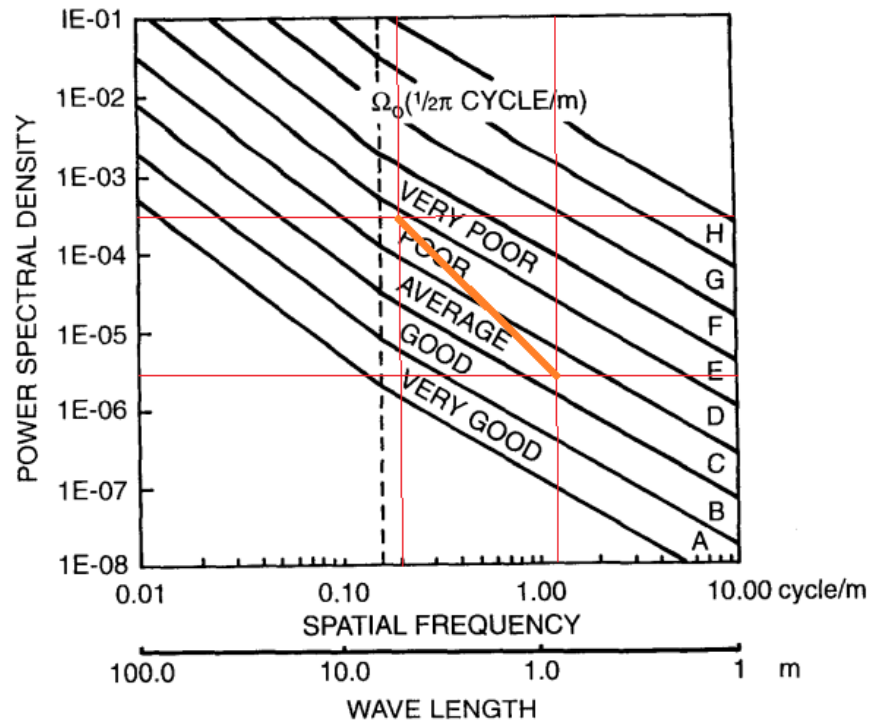


Figura 6.3: Superposición entre el gráfico 6.2 y el de clasificación de rugosidad propuesto por ISO [30].

Por otro lado, se investigó que el DEP tiene una relación directa con el cuadrado de la amplitud del camino, que se expresada en la ecuación 6.4. Entonces, para obtener la amplitud de los estímulos, se recurre nuevamente a la norma ISO 8608, la cual entrega una curva del desplazamiento de una rueda que recorre diferentes caminos, clase B,C,D,E a 10 [km/h] en función del tiempo [31], de la cual se toma el máximo desplazamiento, valor “peak” (desplazamiento máximo desde el punto de referencia equivalente a 0 [mm]) de un camino “poor”(clase D). Este dato de máximo desplazamiento se relaciona al valor máximo del DEP tomado anteriormente, $2,83 \cdot 10^{-4}$ [$m^2/ciclo/m$]. Esto, para poder calcular una constante de proporcionalidad utilizando la relación 6.4. Con esto, a cada valor de DEP anterior, le fue asignada una amplitud.

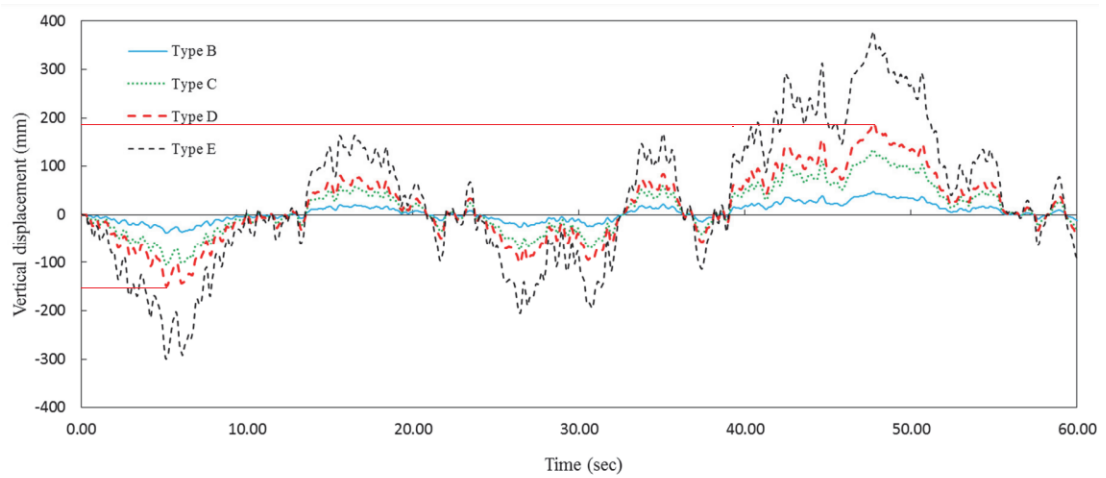


Figura 6.4: desplazamiento vertical del centro de una rueda viajando por caminos tipo B, C, D y E [31].

$$DEP = A^2 K \quad (6.4)$$

Donde:

DEP : Densidad Espectral de Poder

A : Amplitud [m]

K : Constante de proporcionalidad

En la Tabla 6.2 se expresan los resultados obtenidos en cuanto a amplitud relacionada con los valores de DEP considerados. Existen dos valores de frecuencia calculada, f_a y f_b , que reflejan dos escenarios ya que el camión posee una rapidez promedio de 10 [km/h] y una rapidez de producción de 20 [km/h] dentro de la mina, como fue mencionado anteriormente.

Cuadro 6.2: Resumen de los datos calculados.

$DEP [m^2/ciclo/m]$	$\Omega [ciclo/m]$	Amplitud [mm]	$f_a [Hz]$	$f_b [Hz]$
$2,83 \cdot 10^{-4}$	0,13	185,00	1,28	2,56
10^{-4}	0,22	110,00	2,25	4,50
$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,38	58,00	3,80	7,60
10^{-5}	0,68	35,00	6,80	13,60
$2,83 \cdot 10^{-6}$	1,15	19,00	11,45	22,90

La Tabla 6.2 contiene la combinación de valores que se utilizarán en la simulación. Para la rapidez de 10 [km/h] se obtuvieron las frecuencias f_a y para la rapidez 20 [km/h] las frecuencias f_b . Cada combinación contempla un DEP , una Ω , una amplitud y f_a o f_b .

Para realizar estas simulaciones, la frecuencia de muestreo utilizada fue de 1000 [*muestras/segundo*], lo que resultó en una simulación que posee una duración de 32 [*segundos*], aproximadamente. Working Model 2D posee un límite de almacenamiento (27.000 datos) cuando se utilizan la frecuencia de muestreo seleccionada.

Capítulo 7

Resultado y discusión

En el modelo propuesto, no es relevante para el proyecto enfocarse en las vibraciones que sufran todos los puntos del LHD, tampoco donde podría existir mayores aceleraciones o impactos. El punto principal es el lugar donde se instalará la celda de combustible (aproximadamente, próximo a las ruedas traseras del LHD (Figura 3.1), a la mitad de la altura del LHD (altura medida desde el suelo hasta la parte superior del LHD. Ahí donde se ha puesto especial énfasis, y, por lo tanto, donde se han capturado las vibraciones.

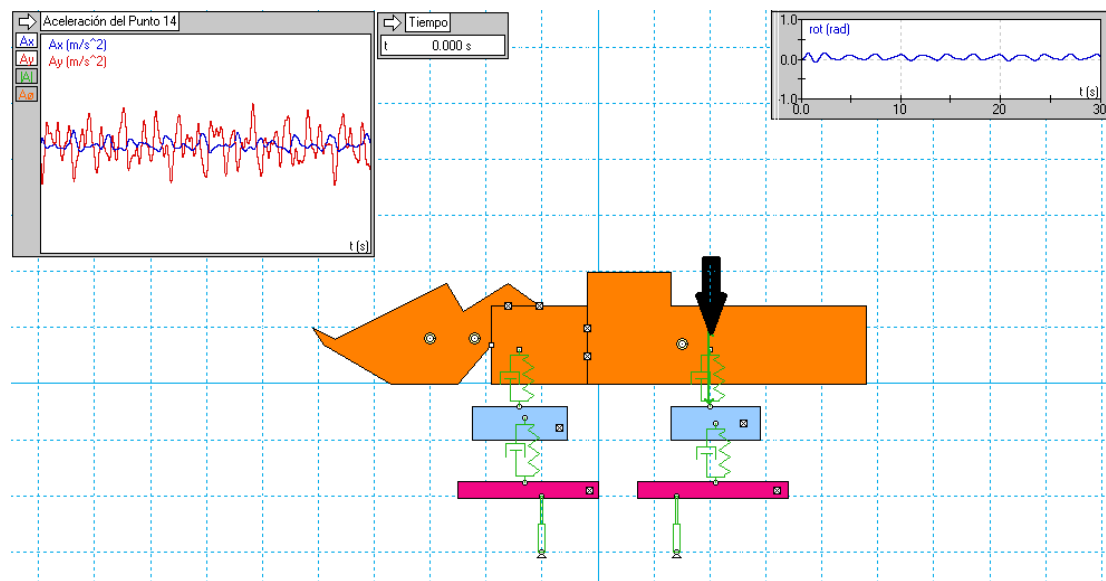


Figura 7.1: Ilustración de la simulación y el punto de interés (flecha negra).

A modo de ejemplo, la Figura 7.1 muestra uno de los resultados de las simulaciones: vibraciones captadas por el eje de las abscisas y ordenadas, punto de interés donde se han captado las vibraciones y la implementación de los actuadores sobre las ruedas del LHD.

7.1. Vibraciones

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones que como entradas tienen la forma matemática de la ecuación 6.1. La combinación de frecuencia y amplitud para los dos escenarios se encuentra en la Tabla 6.2.

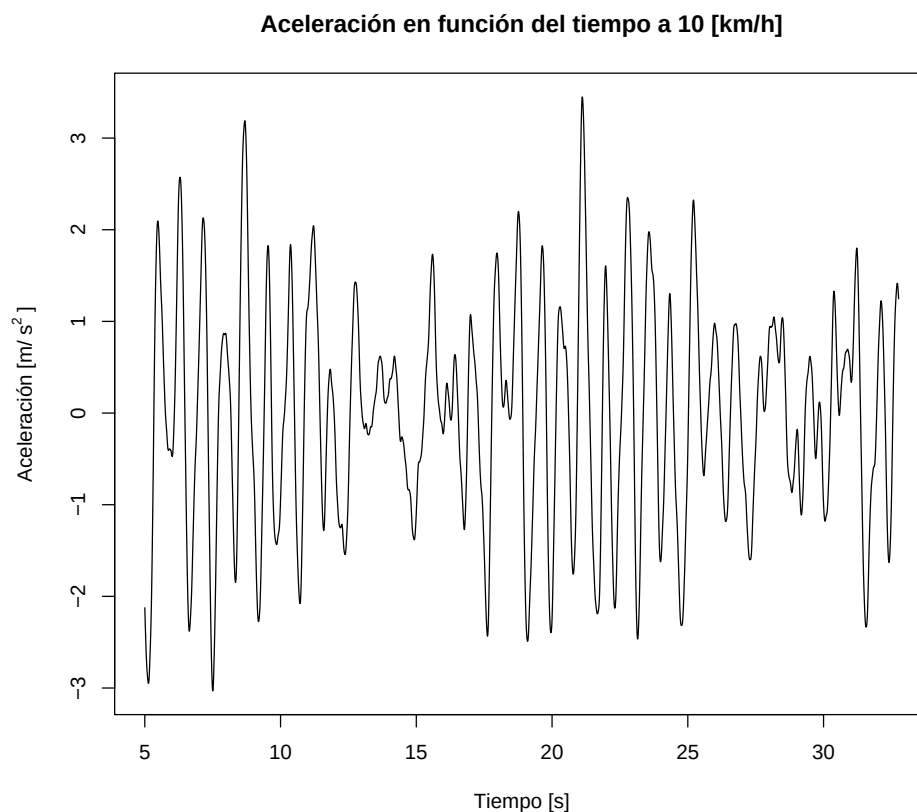


Figura 7.1: Señal vibratoria captada en el punto de interés mostrado en la Figura 7.1 con rapidez igual 10 [km/h].

Los resultados de la señal vibratoria en la simulación del LHD con rapidez 10 [km/h] se muestran en la Figura 7.1. La señal contiene una duración de tan solo 32 [segundos] debido a que el programa no pudo simular más de tiempo teniendo una frecuencia de muestreo igual a 1000 [muestras/segundo]. Sin embargo, se le han restado los primeros 5 segundos de simulación para prevenir alguna expansión o contracción extra de los amortiguadores al inicio de la simulación que pueda aportar alguna fuerza extra no deseada. La Figura 7.1 muestra la aceleración en la ordenada con dominio en el tiempo. La señal muestra que se sobrepasa una amplitud de 3,0 y -3,0 [m/s^2]. También se puede visualizar que la señal contiene una periodicidad de 15 [segundos], aproximadamente.

Transformada de Fourier La Transformada de Fourier fue aplicada a la señal de la Figura 7.1, obteniéndose el la Figura 7.2.

FFT de la señal capturada a 10 [km/h]

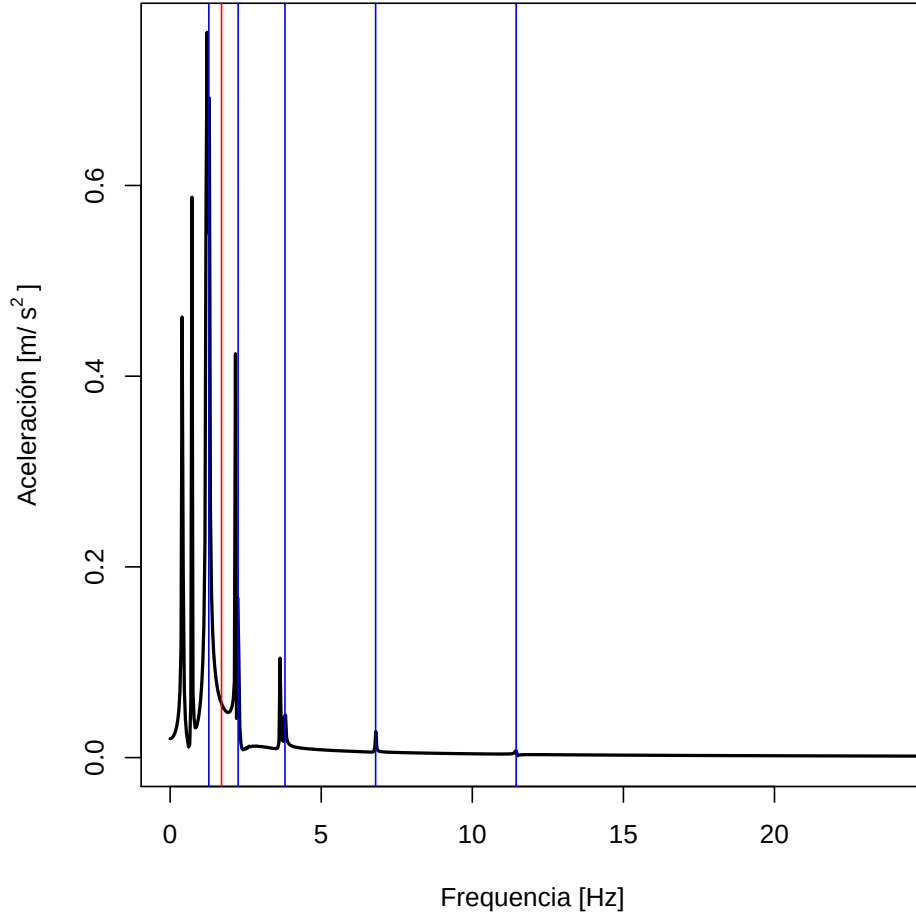


Figura 7.2: Transformada de Fourier de la señal de la Figura 7.1.

La Figura 7.2 muestra la Transformada de Fourier de todos los datos captados durante el transcurso de la simulación (32 [segundos] equivalentes a 27.000 datos, aproximadamente). Las líneas de color azul pertenecen a las frecuencias calculadas en el capítulo anterior (f_a , 6.2). Por un lado, el gráfico muestra que las frecuencias con mayores amplitudes se encuentran bajo los 5 [Hz], donde se alcanzan peaks de amplitud equivalentes a 0,69 y 0,76 [m/s^2], en 1,30 y 1,22 [Hz], respectivamente. Las frecuencias 1,28 y 2,25, 3,80, 6,80, y 11,45 [Hz] (líneas azules), pertenecientes a f_a , se ven manifestadas en el gráfico, aunque algunas se aprecian como una pequeña perturbación en la curva. La línea vertical roja indica el valor 1,7 [Hz], la cual pertenece a la frecuencia natural del modelo. Esta se ve manifestada, aunque con una amplitud cercana a 0,05 [m/s^2], por lo que no alcanza a mostrarse en las el Cuadro 7.1.

Existe un grado de diferencia entre las amplitudes de la Figura 7.2 y la Fig 7.1 que deberían ser iguales, debido a la frecuencia de muestreo utilizada en el programa. Esto no genera problemas al momento de la discusión debido a que utilizaremos solo la amplitud registrada en las Figuras 7.1 y 7.3 para realizar comparaciones.

En Cuadro 7.1 se muestra un resumen de los puntos con mayores amplitudes del gráfico (mayores a $0,10 [m/s^2]$). Estos son utilizados en la discusión. La tabla E.1 adjuntada en el Apéndice E contiene más puntos con amplitudes mayores a mayores o iguales a $0,05 [m/s^2]$.

Frecuencia [Hz]	Amplitud [m/s ²]
0.40	0.46
0.43	0.20
0.72	0.59
1.12	0.14
1.15	0.23
1.19	0.58
1.22	0.76
1.26	0.55
1.30	0.69
1.33	0.26
1.37	0.17
1.40	0.13
2.16	0.42
2.23	0.17

Cuadro 7.1: *Amplitud y frecuencias de los puntos de la Figura 7.2 con mayor amplitud.*

En la segunda simulación, fue obtenida la siguiente Figura 7.3 que ilustra la señal vibratoria durante la simulación del LHD con rapidez $20 [km/h]$.

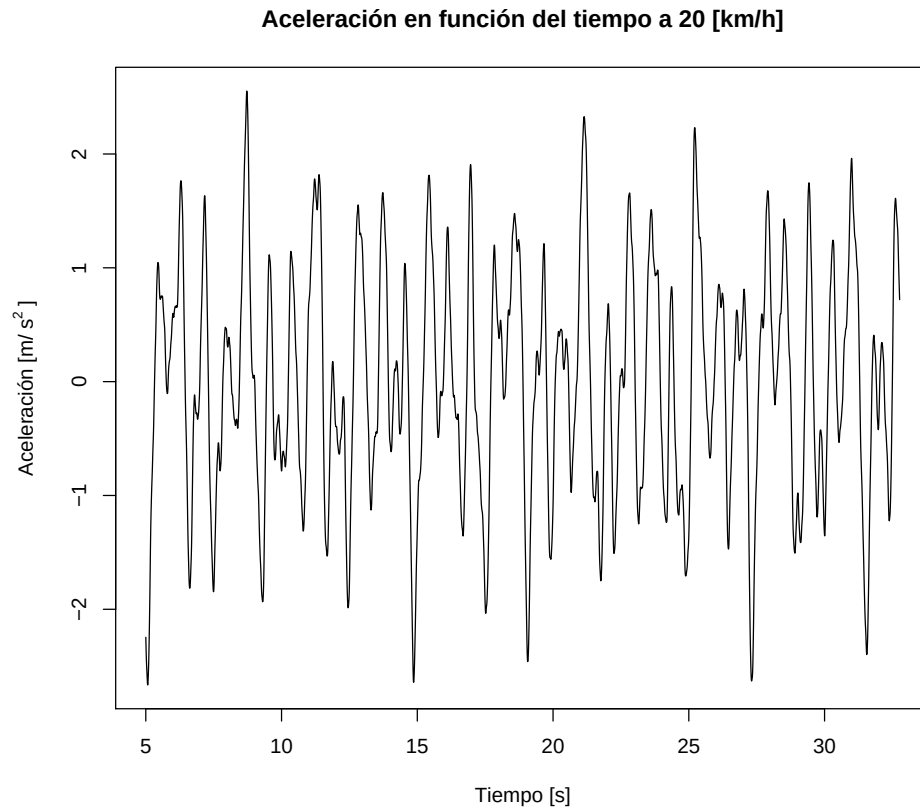


Figura 7.3: Señal vibratoria captada en punto de mostrado en la Figura 7.1 con rapidez igual 20 [km/h].

La señal contiene una duración de 32 [segundos] al igual que la señal del camión con rapidez 10 [km/h] por la misma razón (máximo de almacenamiento de datos). También se han restado los primeros 5 [segundos] para evitar fuerzas no deseadas desde los amortiguadores. La Figura 7.3 muestra la aceleración en las ordenadas con dominio en el tiempo. La señal muestra que se sobrepasan amplitudes de 2,0 y -2,0 [m/s^2] en cuanto a la aceleración.

Transformada de Fourier La Transformada de Fourier fue aplicada a la señal de la Figura 7.3, obteniéndose el la Figura 7.4.

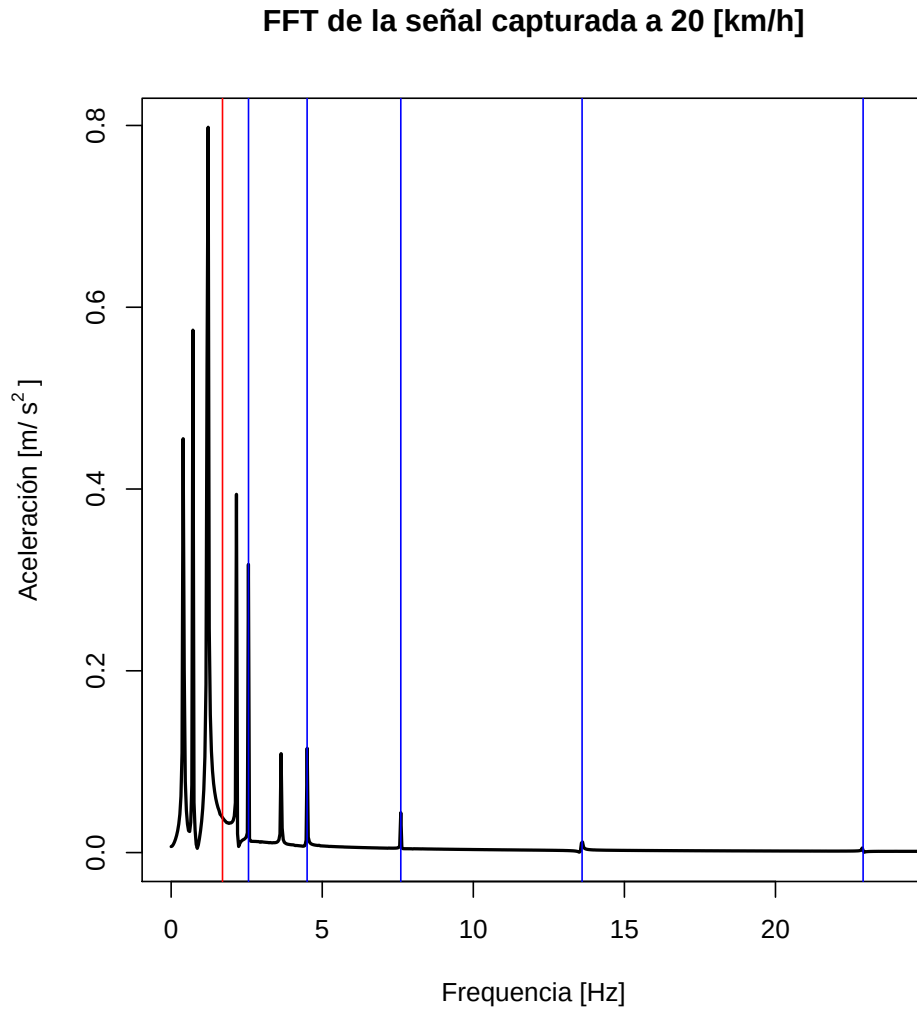


Figura 7.4: Transformada de Fourier de la señal de la Figura 7.3.

La Figura 7.4 muestra la Transformada de Fourier de todos los datos captados durante el transcurso de la simulación (32 [segundos] equivalentes a 27.000 datos, aproximadamente). Las líneas de color azul pertenecen a las frecuencias calculadas en el capítulo anterior (f_b , 6.2). Por un lado, el gráfico muestra que las frecuencias con mayores amplitudes se encuentran bajo los 5 [Hz], donde se alcanzan peaks de 0,57 y 0,80 [m/s^2] en 0,72 y 1,22 [Hz], respectivamente. Las frecuencias 2,56, 4,50, 7,60, 13,60 y 22,90 [Hz] (líneas azules), pertenecientes a f_b , se ven manifestadas en el gráfico, aunque algunas se aprecian como una pequeña perturbación en la curva. La línea vertical roja indica el valor 1,7 [Hz], la cual pertenece a la frecuencia natural del modelo. Esta frecuencia se ve manifestada, al igual que en el caso anterior, aunque con una amplitud cercana a 0,05 [m/s^2], por lo que no alcanza a mostrarse en el Cuadro 7.2.

Existe un grado de diferencia entre las amplitudes de la Figura 7.4 y la Fig 7.3 que deberían ser iguales, debido a la frecuencia de muestreo utilizada en el programa. Esto no genera problemas al momento de la discusión debido a que utilizaremos solo la amplitud registrada en las Figuras 7.1 y 7.3 para realizar comparaciones.

En el Cuadro 7.2 se muestra un resumen de los puntos con mayores amplitudes del gráfico (mayores a $0,10 [m/s^2]$). Estos son utilizados en la discusión. La tabla E.1 adjuntada en el Apéndice E contiene más puntos con amplitudes mayores a mayores o iguales a $0,05 [m/s^2]$.

Frecuencia [Hz]	Amplitud [m/s ²]
0.36	0.11
0.40	0.46
0.43	0.20
0.72	0.57
1.12	0.11
1.15	0.19
1.19	0.54
1.22	0.80
1.26	0.25
1.30	0.15
1.33	0.11
2.16	0.39
2.56	0.32
3.64	0.11
4.50	0.11

Cuadro 7.2: *Amplitud y frecuencias de los puntos de la Figura 7.4 con mayor amplitud.*

7.2. Discusión

Hasta este punto, se han obtenido resultados que no significan más que las condiciones bajo las cuales se desempeñaría una celda de combustible instalada en un LHD, desde un punto de vista de vibraciones. Es fundamental para esta discusión la comparación o el apoyo de estudios que tengan relación con vibraciones en celdas de combustible. Estos ayudan a la interpretación de los resultados obtenidos en esta memoria, infiriendo lo que podría llegar a suceder si una celda de combustible se instala en un LHD sin un sistema de amortiguación que lo proteja de las condiciones en las que se desempeñaría.

Por un lado, Banan et al. [14], [32] estudiaron a través de elementos finitos la propagación de la delaminación y rotura en la membrana de intercambio protónico cuando la celda es sometida a excitaciones armónicas que van desde los 5 a los 40 [Hz], con amplitudes que van desde 1 a 4 [g]. Ellos concluyeron que la vibración afecta inicialmente a la delaminación de

las capas de la celda. En esta memoria se observa que en los resultados mostrados en las Figuras 7.2 y 7.4 las frecuencias 6,80, 7,60, 11,45, 13,6 y 22,9 [Hz], entran en el rango de excitación del estudio comentado al inicio. Por otro lado, Las Figuras 7.1 y 7.3 muestra que las aceleraciones no sobrepasan 1 [g]. Tomando en cuenta lo mencionado hasta este punto, bajo las condiciones simuladas no es evidente que exista algún daño en la integridad de la celda, sin embarbo, teniendo en cuenta que las condiciones de un camino minero pueden llegar a ser más desfavorables que las que se han tomado en cuenta para este estudio, podría existir el escenario en que la celda sufra un aceleraciones mayores a las presentadas en los resultados y que se produzca un deterioro en su estructura mecánica y delaminación cuando el LHD avanza con una rapidez de 10 y 20 [km/h].

El artículo [33] menciona que en su estudio se hizo variar un banco de vibraciones entre 0 y 5 [Hz] por un tiempo de 150 [h]. En la Figura 7.1 se muestra la diferencia de desempeño de la celda a través de la curva de polarización, la cual entrega información del desempeño de la celda. Existe una influencia negativa en la curva debido a las vibraciones. Si el LHD avanza a una rapidez igual a 10 o 20 [km/h], los resultados de este estudio, 7.1 y 7.2, que pertenecen a las frecuencias manifestadas por el LHD en las simulaciones, muestran que todas las frecuencias entran en el rango de pruebas utilizado en el artículo. Por lo tanto, existe la probabilidad de que la celda instalada en el LHD tenga repercusiones negativas en su desempeño. Sin embargo, tampoco se puede aseverar con exactitud que será de esta manera ya que la información que se entrega en este artículo no es comparable en cuanto a la magnitud de la aceleración aplicada.

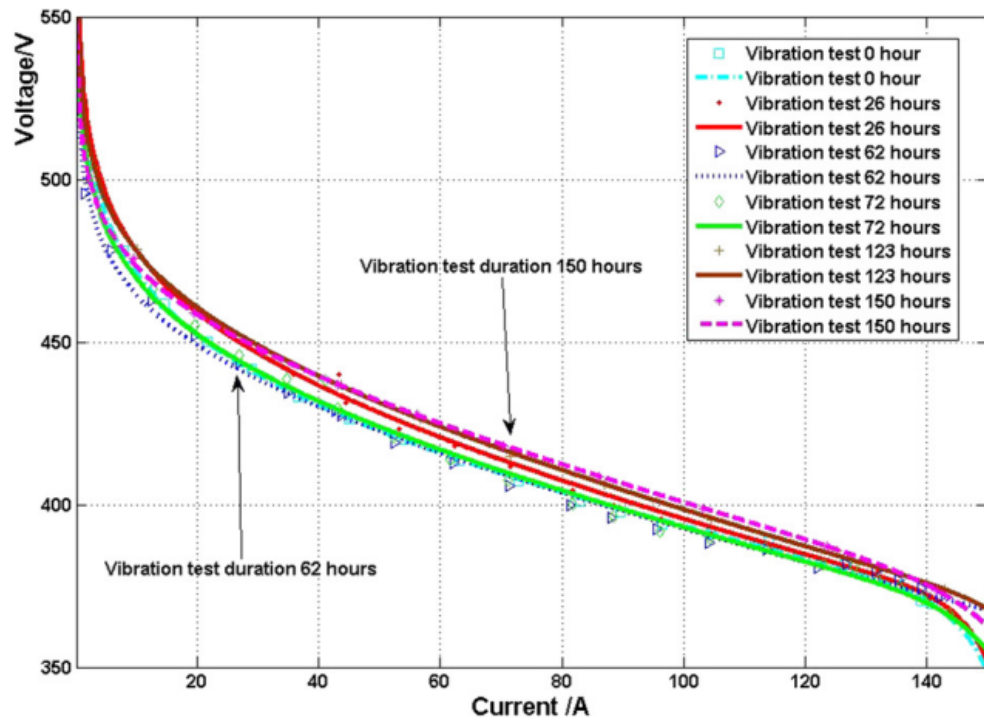
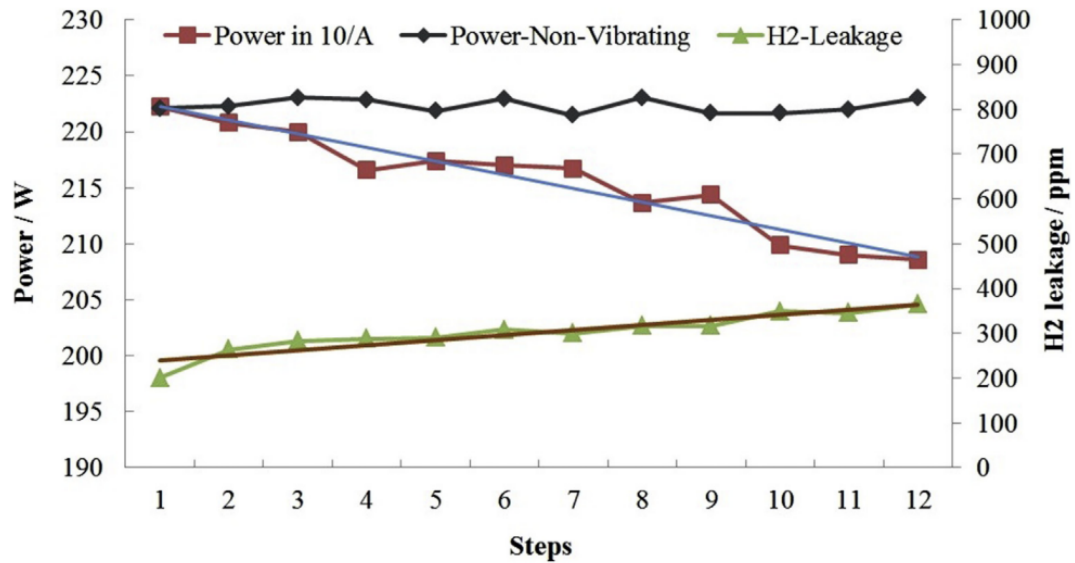


Figura 7.1: Curva de polarización de la celda de combustible bajo diferentes tiempos de vibración [33].

El artículo [16] señala que fueron estudiados los efectos a corto y a largo plazo. Una celda de 36 unidades que equivalen a una potencia de 500 [W] fue sometida a vibraciones por 2 [horas], aproximadamente, encendida y 44 [horas] apagada. Uno de las pruebas fue basada en un rango de que va desde 10 a 1000 [Hz], con una amplitud aceleración de 1,5 [g] (RMS). En la prueba corta duración no se observaron grandes cambios en el desempeño de la celda, sin embargo, en la prueba larga fueron detectados cambios significativos. La Figura 7.2 muestra la exposición de larga duración de este estudio donde se muestra el deterioro del desempeño durante las etapas de medición.



Efectos de la exposición a vibraciones a largo plazo. cada “step” hace referencia a la medición de parámetros cada 4 [horas] [33].

la exposición de larga duración a vibraciones mostró que se redujo la potencia en 6.6 [%], mientras que la filtración de hidrógeno aumentó en un 1 [%] cuando la corriente es de 10 [A]. Concluyeron, además, que los pernos de sujeción aflojados causaron una fuga de hidrógeno, pérdidas de resistencia óhmica y por lo tanto decaimiento en el desempeño. Los resultados de la memoria muestran que en ambas simulaciones, a 10 y a 20 [km/h], si existen frecuencias que entran en los rangos de el estudio mencionado, ver Apéndice E las tablas de resultados de frecuencias y amplitud. Aunque estas frecuencias captadas en la simulación son pequeñas en comparación a las del artículo, 1,5 [g], no es conveniente ignorarlas debido a que pueden ser perjudiciales al momento de instalar una celda en un LHD, y como es mencionado anteriormente, en un camino minero de peores condiciones que las tomadas en este estudio, podrían generar impactos de mayores aceleraciones que las del artículo.

La mayoría de los artículos publicados concluyen que existen degradaciones mecánicas y decaimientos en el desempeño de la celda. Comparando los parámetros de esta memoria con lo utilizados en los estudios, hay que darle cabida a la probabilidad de que si la celda no se instala con una protección o algún sistema de amortiguación de vibraciones, esta sufrirá daños a corto y largo plazo. Más aún, cuando los mismos estudios están constantemente advirtiéndolo que se necesita mas investigación sobre los efectos y consecuencias de las vibraciones sobre las celdas de combustible.

Finalmente, los resultados muestran, además de la información que se compara con la literatura, que las frecuencias aplicadas al sistema como entradas, se ven manifestadas en las Figuras 7.2 y 7.4 donde se observa en todas las verticales azules existe un peak de amplitud. Esto se traduce en que los resultados obtenidos concuerdan con los propuestos en la teoría, donde se indica que al excitar un cuerpo con una cierta frecuencia, esta será manifestada por el cuerpo, aunque

con diferente amplitud (ver ecuación 4.12). Además, se observa claramente la manifestación de la frecuencia natural ($1,7 [Hz]$, vertical roja en el las Figuras 7.2 y 7.4).

Capítulo 8

Conclusión y perspectivas

La confiabilidad en las celdas de combustibles es un concepto que tiene un alto grado de relevancia en el proyecto de electro-movilidad minera. Es vital que la instalación de la celda de combustible realice su función y que su desempeño sea óptimo bajo las condiciones de operación de un entorno minero subterráneo. Por esto, es que esta memoria es una pieza fundamental para obtener conocimiento teórico bajo el cual se desempeñará la celda de combustible desde un punto de vista vibracional, suministrando energía al LHD durante su operación.

Las frecuencias utilizadas para la estimulación del camión se ven manifestadas en las Transformadas de Fourier de ambos escenarios. Además, la frecuencia natural del modelo (LHD) se logra identificar en el capítulo Resultados y Discusión, en los gráficos 7.2 y 7.4. Esto se traduce en que el programa respondió de acuerdo a lo que dice la teoría.

Realizando un estudio bibliográfico de los efectos e impactos de las vibraciones, en general, se obtiene una gran cantidad de parámetros para tener en consideración al momento de obtener los resultados de las simulaciones realizadas. No hay duda de que la celda de combustible podría sufrir consecuencias negativas en su desempeño o en su integridad física producto de las vibraciones. Los valores de los resultados de este estudio no mostraron que existirá un impacto negativo en el desempeño de la celda debido a que no se alcanzan aceleraciones relevantes que se hayan podido comparar con los artículos mencionados, pero las condiciones de operación de un LHD pueden llegar a ser más riesgosas que las tomadas en cuenta (camino), como impactos con un Haul Dump o al momento de cargar el mineral. Estas condiciones no han sido incorporadas en la simulación. Por ello, si al momento de que la celda sea instalada en el LHD no contiene alguna protección o aislante de vibración, es muy probable que existan decaimientos en el desempeño de la celda o problemas de integridad mecánica. Estas consecuencias se traducen en costos de mantención, confiabilidad y de operación, y por lo tanto en pérdidas económicas. Además, se recomienda generar un dispositivo protector aislante de vibraciones y golpes para la celda. Existen varias técnicas de protección de dispositivos contra vibraciones y golpes. Buscando en la literatura pueden encontrarse técnicas como el aislamiento pasivo de vibraciones y masa sintonizada pasiva, como ejemplos para tener presente.

Debido al efecto pandemia Covid 19, no fue posible tomar mediciones experimentales en terreno de las vibraciones que se producen en el punto de interés del LHD (ubicación aproximada en la cual se instalará la celda de combustible en el LHD). Por este motivo, el plan consistió en capturar las mediciones de vibraciones que se producen en un modelo teórico basado en las dimensiones reales de los LHDs, parámetros obtenidos en artículos sobre vibraciones en LHDs que fueron citados y cálculos obtenidos a partir de bibliografía. Además, se añadieron condiciones desfavorable de caminos otorgados por la norma ISO 8608, norma de caminos, la cual fue fundamental para generar un escenario correcto para someter el modelo a simulaciones.

Como fue mencionado anteriormente en el capítulo Capítulo 2 de esta memoria, en casos muy particulares, las vibraciones resultan beneficiosas para un buen desempeño de la FC, y es por esto que también es recomendable continuar con el estudio del desempeño de las PEMFC bajo duras condiciones de trabajo como lo son las vibraciones. Se puede agregar, además, el factor temperatura y humedad, ya que en condiciones de minería subterránea, estos factores suelen causar cambios en el desempeño de los dispositivos electrónicos o mecánicos. Además, la implementación de celdas de combustible, trae una disminución importante de gases contaminantes en los túneles mineros, que como consecuencia trae abaratar costos en ventilación, pero ,por otro lado, traerá un aumento en la humedad y temperatura en el ambiente, por lo tanto, se debe continuar con estudios más profundos.

Finalmente, dentro de los puntos claves que contiene el proyecto CORFO, marco donde se desarrolla este estudio, es importante no dejar pasar la oportunidad de tomar las mediciones experimentales de vibraciones en un LHD en operación. Tener más datos experimentales será beneficioso para un análisis en particular otros tipos de vibraciones recibidos en LHD en producción, como por ejemplo, cuando la pala recoge o deposita el material.

Se han cumplido los objetivos que se describen en el capítulo 1. Además, fue agregado un capítulo sobre las futuras aplicaciones móviles para Codelco en temas de hidrógeno y tecnología de celdas de combustibles.

Recomendaciones A pesar de que las amplitudes de las aceleraciones captadas en este estudio no representan una amenaza para la funcionalidad de la celda, es importante tener en cuenta que en terreno los factores como la forma de conducción del LHD, condiciones de camino minero y/o condiciones ambientales influirán en el desempeño de la celda. Por esto, se señalan recomendaciones a seguir para continuar con el proyecto de electro-movilidad minera.

- Se recomienda estudiar los puntos señalados en la Figura 8.1 desde una perspectiva de vibracional debido ya que en esta memoria solo se analizó un punto de interés, ubicado en el plano “XZ”, a lo que habría eventualmente que agregarle la componente espacial “Y”. La distribución espacial de los nuevos componentes implementados en el LHD se muestran en [21] y en el capítulo 3 de esta memoria.

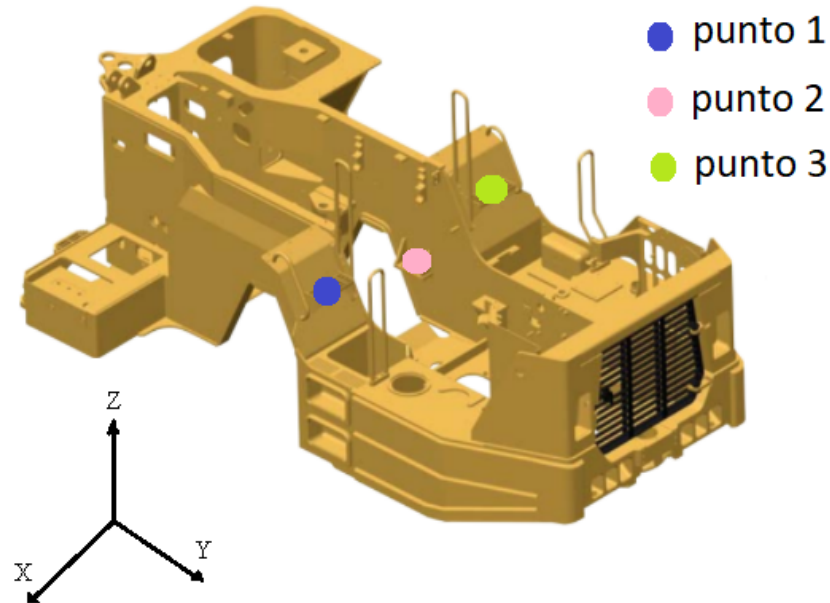


Figura 8.1: Ejemplos de puntos de medición de vibraciones en chasis de un LHD.

- Estudiar la orientación de la celda. Existen artículos que se han dedicado a estudiar el desempeño de la celda cuando tiene diferentes orientaciones. Los resultados muestran mejoras o decaimientos en sus curvas de polarización.
- Tomar las vibraciones reales de un LHD en operación. En la Figura 8.1 se observa el chasis de un LHD y donde posicionar los acelerómetros que medirán las vibraciones.
- Conseguir señales vibratorias reales captadas en medios de transporte en operación en ambientes de condiciones adversas (camino de bajo clase “average” según norma ISO 8608).
- Se recomienda desarrollar un modelo dinámico genérico y adecuado de una PEMFCs para obtener una respuesta acertada de desempeño y también diseñar un sistema efectivo y robusto de protección basado en el sistema modelo genérico mencionado. Idealmente, el modelo genérico debe contemplar desde los pernos de compresión de la celda, que estudios citados en los capítulos 2 y 7 muestran que pierden torque para la compresión de las celdas bajo vibraciones, hasta la composición de los materiales de la cual está hecha la celda, debido a que con esto se puede obtener una curva de polarización (curva característica de las celdas) y por lo tanto el desempeño de la misma.

Capítulo 9

Futuras aplicaciones para Codelco

A nivel país, es importante tener en cuenta todos los esfuerzos y desafíos que se llevan a cabo en las diferentes áreas de trabajo del territorio nacional. Ésto con el fin de lograr la ansiada transición energética que busca encontrar alternativas energéticas no contaminantes. Por esto, el objetivo de este capítulo es mencionar algunas alternativas o futuras aplicaciones donde el hidrógeno, en la gran minería busca ser incorporado, abriendo nuevas oportunidades de estudio para la empresa y sus memoristas.

Chile es el mayor productor de cobre del mundo; sin embargo, no ha sido capaz de crear un ecosistema de innovación en su entorno que genere nuevas tecnologías para uso local y para exportación. El Programa Nacional de Innovación en Minería, Alta Ley, estableció una “hoja de ruta” para avanzar hacia un ecosistema virtuoso de creación de valor entre la minería, sus proveedores e instituciones de investigación y desarrollo. Entre sus metas está tener 250 proveedores de clase mundial en minería al 2035 [34].

La Figura 9.1 presenta un roadmap de planificación de la electro-movilidad en la División El Teniente, de Rancagua.

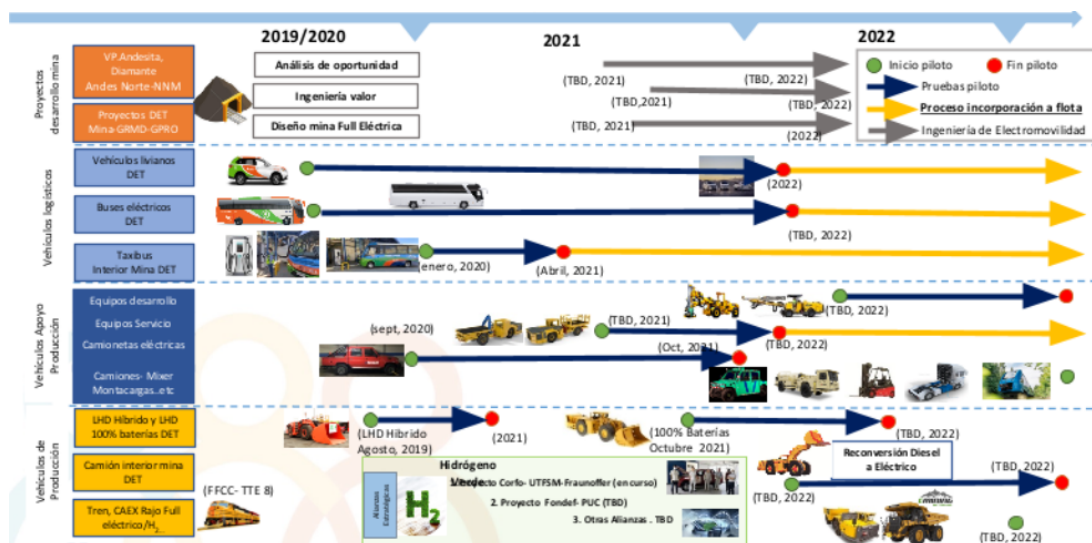


Figura 9.1: *Planificación programa de electro-movilidad de la División El Teniente.*

El sector minero posee alrededor de mil camiones *highclass* de 300 toneladas. Cada uno de estos camiones tiene una demanda de 2.5 [MW], lo que significaría una demanda equivalente a 2500 [MW], correspondiente a aproximadamente un 20 [%] de la demanda eléctrica total de Chile. Por esto último, para poder avanzar a una minería más verde y sustentable, se recomienda comenzar a avanzar con los análisis técnicos-económicos de la implementación del hidrógeno en los camiones CAEX, como vehículos de producción. En Además, se necesita la pronta incorporación del sistema del hidrógeno en vehículos livianos de logística y de apoyo a la producción. Por otro lado, la Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde planea reemplazar el hidrógeno gris por hidrógeno verde en refinerías, generar amoniaco verde. Estos dos ejemplos pueden ser muy beneficiosos para el Teniente. Se recomienda generar un estudio al respecto. Por otro lado, Sudáfrica ha incorporado a su flota de camiones un nuevo camión CAEX potenciado su flota con la tecnología a base de hidrógeno. Esto ocurrió en la mina Mogalakwena. El camión de 2 [MW] ha sido impulsado por la empresa Anglo American y es el primero en su tipo, que genera más energía que su predecesor diésel.

Apéndice A

Catálogo de Celdas

PRODUCT NAME	POWER RATING (KW)	APPLICATION-TAILORED FEATURES	VOLTAGE OUTPUT (V _{DC})	CURRENT OUTPUT (A _{DC})	PEAK EFFICIENCY-(% _{LHV})	DIMENSIONS (L X W X H)	MASS-(KG)
Celerity	60	Integration-ready; Optimized voltage and form factor; Extra-reliability design; Cold weather package; IP rated enclosure	300...640	0 to 200	53	800x375x980 ¹	275
CelerityPlus	60	Drop-in installation; Optimized voltage and form factor; Extra-reliability design; Cold weather package; IP rated enclosure	300...640	0 to 200	53	800x375x980 ¹	275
HD90	99	Fully integrated BOP; Lower voltage/higher current; low temp start/shutdown	180...360	0 to 500	55	1582x1085x346 ¹	360
HD180	198	Fully integrated BOP; Lower voltage/higher current; low temp start/shutdown	180...360 (2x)	0 to 500	55	1582x1085x690 ¹	720

Figura A.1: Catálogo de celdas que pueden ser instaladas en el LHD. Las propuestas son HD90 y HD180.

Apéndice B

LHD Sandvik Toro LH410

Especificaciones técnicas LHD Sandvik Toro LH410



Figura B.1: *LHD Sandvik Toro LH410.*

CAPACITIES	
Maximum tramping capacity	10 000 kg
Break out force, lift	20 390 kg
Break out force, tilt	19 340 kg
Standard bucket	4.0 m ³
SPEEDS FORWARD & REVERSE (LEVEL/LOADED) WITH VOLVO TAD11140VE ENGINE	
1st gear	5.5 km/h
2nd gear	10.2 km/h
3rd gear	17.5 km/h
4th gear	31.7 km/h
BUCKET MOTION TIMES	
Raising time	6.7 sec
Lowering time	4.3 sec
Dumping time	2.7 sec
OPERATING WEIGHTS*	
Total operating weight	28 500 kg
Front axle	12 850 kg
Rear axle	15 650 kg
LOADED WEIGHTS*	
Total loaded weight	38 500 kg
Front axle	28 250 kg
Rear axle	10 250 kg

Figura B.2: Características generales del LHD Sandvik Toro LH410.



Figura B.3: Características generales del LHD Sandvik Toro LH410.

OPERATIONAL CONDITIONS AND LIMITS	
Environmental temperature	From -20°C to +50°C
Standard operating altitude	With engine Volvo TAD1140VE from -1500 m to +3000 m at 25°C without rated power derate
REQUIREMENTS AND COMPLIANCE	
Compliance with 2006/95/EC Low voltage directive	
Compliance with 2004/108/EC Electromagnetic compatibility directive	
Compliance with 2006/42/EC Machinery directive (Equipment for EU area, achieved with relevant options)	
Design based on EN 1889-1. Machines for underground mines. Mobile machines working underground. Safety. Part 1: Rubber tyred vehicles.	
Design based on MDG 15. Guideline for mobile and transportable equipment for use in mines. (Equipment for Australia, achieved with relevant options)	
Electrical system based on IEC 60204-1. Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements	
CONTAINS FLUORINATED GREENHOUSE GASES (closed cabin option) Refrigerant R134a under pressure max 38 bar/550 PSI: Filled weight: 2.0 kg CO ₂ e: 2,860 tons GWP: 1430 Information based on the F Gas Regulation (EU) No 517/2016	
POWER TRAIN	
ENGINE	
Diesel engine	Volvo TAD1140VE
Output	235 kW @ 2100 rpm
Torque	1568 Nm @ 1300 rpm
Number of cylinders	In-line 6
Displacement	10.84 l
Cooling system	Liquid cooled and piston pump driven cooler fan
Combustion principle	4-stroke, direct injection, turbo with intercooler
Air Filtration	Two stage filtration, dry type
Electric system	24 V
Emissions	Tier 2, Euro Stage II
Ventilation rate	CANMET 8.07 m ³ /s MSHA 16,000 CFM
MSHA	16,000 CFM
Particulate index	MSHA 5,500 CFM
Exhaust system	Catalytic purifier and muffler with Proventia thermal insulation system exhaust pipe
Average fuel consumption at 40% load	26 l/h
Fuel tank refill capacity	280 l
CONVERTER	
Dana C5472	With lock-up
TRANSMISSION	
Power shift transmission with modulation	Dana transmission with automatic gear shift control, four gears forward and reverse
AXLES	
Front axle, spring applied hydraulic operated brakes. Fixed.	Kessler D102, limited slip differential
Rear axle, spring applied hydraulic operated brakes. Oscillating ± 8°.	Kessler D102, limited slip differential
TIRES	
Tire size (Tires are application approved. Brand and type subject to availability.)	18,00x25 L5S 28 ply
OPERATOR'S COMPARTMENT	
CABIN (Cabin option replaces the standard canopy)	
ROPS certification according to EN ISO 3471	
FOPS certification according to EN ISO 3449	
Sealed, noise suppressed and over pressurized cabin with air conditioning and heating	
Sound absorbent material to reduce noise	
Laminated glass windows	
Cabin mounted on rubber mounts to the frame to reduce vibrations	
Air conditioning unit located outside the cabin to reduce noise inside the cabin	
Cyclone pre-filter for A/C device	
Adjustable joysticks	
No high pressure hoses in the operator's compartment	
Inclinometers to indicate operating angle	
Emergency exit	
Floor washable with water to reduce dust	
Three-point contact access system with replaceable and colour coded handles and steps	
12 V output	
Remote circuit breaker switch	
CANOPY (Standard)	
ROPS certification according to EN ISO 3471	
FOPS certification according to EN ISO 3449	
Adjustable joysticks	
No high pressure hoses in the operator's compartment	
Inclinometers to indicate operating angle	
Emergency exit	
Floor washable with water to reduce dust	
Three-point contact access system with replaceable and colour coded handles and steps	
12 V output	
Remote circuit breaker switch	
OPERATOR'S SEAT	
Low frequency suspension	
Height adjustment	
Adjustment according to the operator's weight	
Padded and adjustable arm rests	
Two-point seat belt	
Fore-aft isolation (with cabin option)	
Adjustable lumbar support (with cabin option)	
Selectable damping (with cabin option)	

Figura B.4: Características generales del LHD Sandvik Toro LH410.

CONTROL SYSTEM, DASHBOARD AND DISPLAYS

Sandvik Intelligent Control system
Critical warnings and alarms displayed as text and with light
7" color display with touch screen functionality, adjustable contrast and brightness
Illuminated switches on instrument panel
My Sandvik Digital Services Knowledge Box™ on-board hardware

MEASURED SOUND LEVEL

The sound pressure level and sound power level at the operator's compartment (open canopy) have been determined in stationary conditions on high idle and at full load, with engine Volvo Penta TAD1140VE Tier 2.
Sound pressure level 94 dB.
Sound power level 118 dB.

FRAME**REAR AND FRONT FRAME**

High strength structure with optimized material thicknesses. Reduced own weight for higher overall hauling capacity and long structural lifetime. Welded steel construction.
Central hinge with adjustable upper bearing
Rear tanks are bolted to frame, hydraulic tank and cabin base are both bolted and welded to frame
Automatic central lubrication

HYDRAULICS

Door interlock for brakes and boom, bucket, and steering hydraulics
Oil cooler for hydraulic and transmission oil, capability up to 52°C ambient temperature
ORFS fittings
MSHA approved hoses
Hydraulic oil tank capacity 240 l
Sight glass for oil level, 2 pcs

STEERING HYDRAULICS

Full hydraulic, centre-point articulation, power steering with two double acting cylinders. Steering lock. Steering controlled by electric joystick	
Steering main valve	Open circuit type
Steering hydraulic cylinders	125 mm, 2 pcs
Steering and servo hydraulic pumps	Piston type

BUCKET HYDRAULICS

The oil flow from steering hydraulic pump is directed to bucket hydraulics when steering is not used.	Joystick bucket and boom control (electric), equipped with piston pump that delivers oil to the bucket hydraulic main valve.
Boom system	Z-link
Lift cylinders	160 mm, 2 pcs
Dump cylinder	200 mm, 1 pc
Main valve	Open circuit type
Pump for bucket hydraulics	Piston type, LS controlled

BRAKES

Service brakes are spring applied, hydraulically operated multidisc wet brakes on all wheels. Two independent circuits: one for the front and one for the rear axle. Service brakes also function as an emergency and parking brake. Brake system performance complies with requirements of EN ISO 3450, AS2958.1 and SABS 1589.
Neutral brake
Automatic brake activation system, ABA
Electrically driven emergency brake release pump
Brake oil tank capacity 75 l

ELECTRICAL EQUIPMENT

MAIN COMPONENTS	
Alternator	24 V, 100 A
Batteries	2 x 12V, 145 Ah
Starter	24 V, 5,5 kW
Driving lights	LED lights: 4 pcs in front 4 pcs in rear 4 pcs in cabin
Working lights	LED light, 1 pc under boom
Parking, brake and indicator (blinkers) lights	LED lights: 2 pcs in front 2 pcs in rear
Control system with 7" color display, 5 modules, inbuilt system diagnostics	
Reverse alarm	
Flashing beacon	

INCLUDED SAFETY FEATURES

FIRE SAFETY
Portable fire extinguisher, 12 kg
Hot side – cold side design
Isolation of combustibles and ignition sources
Heat insulation on exhaust manifold, turbo, and isolated exhaust pipe

ENERGY ISOLATION

Lockable main switch, ground level access
Emergency stop push buttons according to EN ISO 13850: 1 pc in cabin and 2 pcs in rear
Pressure release in the expansion tank cap
Automatic discharge for pressure accumulators (brake system and pilot circuit)
Frame articulation locking device
Wheel chocks and brackets

DOCUMENTATION

STANDARD MANUALS	
Operator's Manual	English and other EU languages
Maintenance Manual	English and other EU languages
Parts Manual	English
Service and Repair Manual	English, Russian
ToolMan	2 x USB stick in pdf format, includes all the manuals
Decals	English, Finnish, Swedish, Spanish, Russian, French, Polish, Portuguese, Turkish, German, Norwegian, Estonian, Chinese

Figura B.5: Características generales del LHD Sandvik Toro LH410.

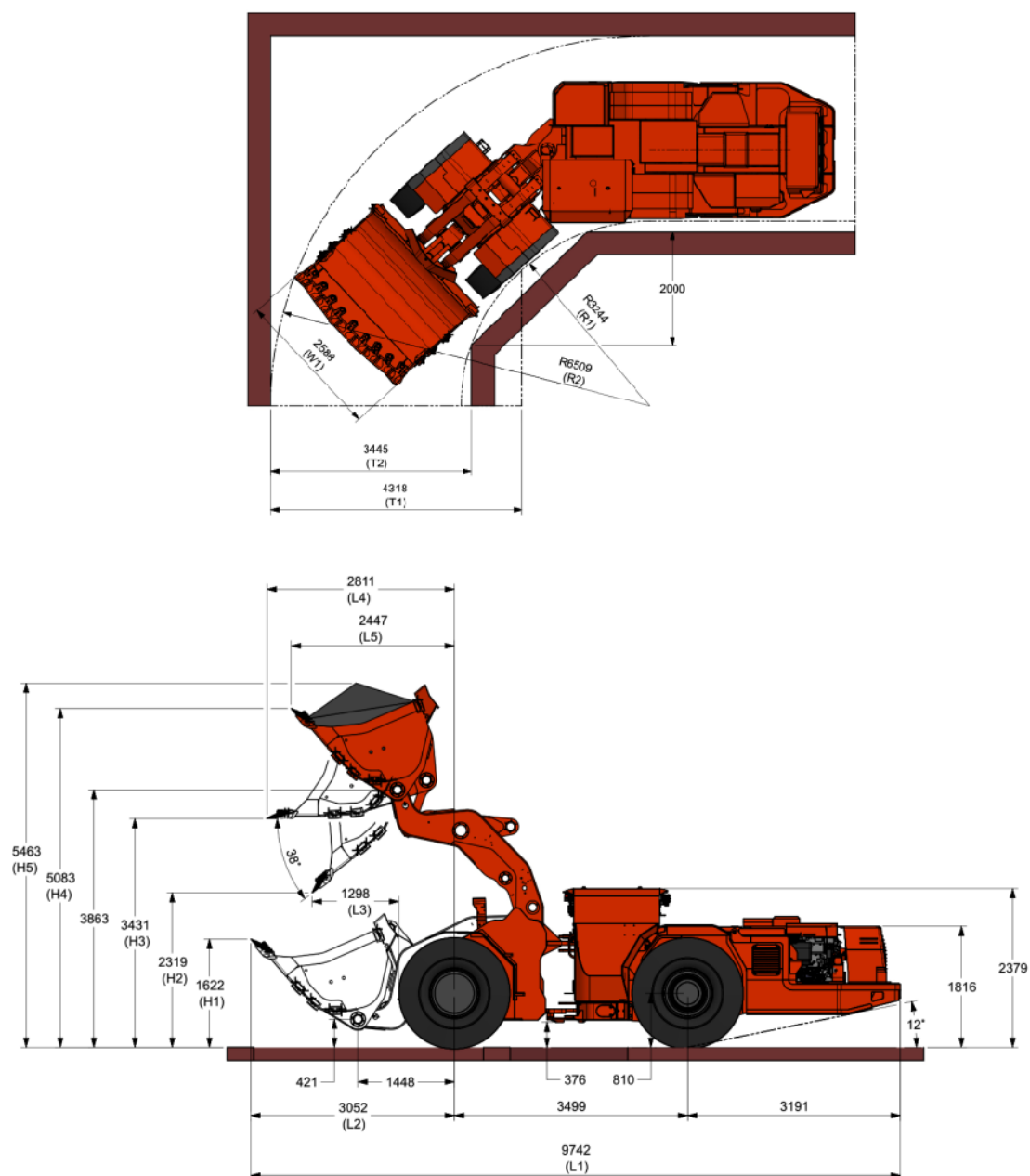


Figura B.6: Dimensiones del LHD Sandvik Toro LH410.

Apéndice C

Especificaciones técnicas de rueda de un LHD

YOKOHAMA
GL - YLA

2. Información técnica del neumático

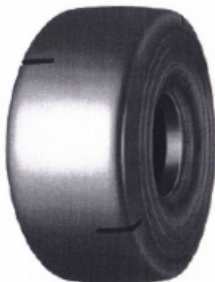
Y69K

L-5S BANDA LISA EXTRA PROFUNDA
REFORZADO

Aplicación: Cargadores frontales y
equipos subterráneos



Especificaciones



Neumático reforzado, con banda lisa y profunda para una mayor vida útil y gran resistencia al corte. El perfil lateral modificado disminuye los cortes en la pared lateral.

Tamaño	PR	Tipo	Construcción	Código TRA	Aro (Pul)	Diámetro externo Inflado (mm)	Ancho total Inflado (mm)	Radio de carga estático (mm)	Ancho de carga estático (mm)	Profundidad original (mm)	Especificación
29.5-29	34	T/L	Bias - Reforzado	L-5S	25.00-3.5	2.019	782	938	820	107,7	CP

Especificaciones de operación (Normas Técnicas TRA - Tire & Rim Association)

Distancia máxima Una via (mt)	Velocidad máxima (Km/h)	Presión (psi)				(Max.)
76	10	Carga (Kg)	65	69	73	76
			19.500	20.000	20.600	21.200

Importante:
Producto con aplicación incompatible / diferente de las especificaciones implica en pérdida de garantía del fabricante. Para aplicaciones diferentes, por favor, consulte al departamento técnico de Yokohama.

Figura C.1: Especificaciones técnicas de una rueda utilizada en un LHD tipo LHD Sandvik Toro LH410.

Apéndice D

Código creado y utilizado en el lenguaje R para realizar la Transformada de Fourier

Code:

```
datos<-read.csv("Senalvibracion.csv",dec=",")
colnames(datos)<-c("tiempo","acceleracion")
n<-length(datos$acceleracion)
p<-fft(datos$acceleracion)
nUniquePts<-ceiling(n/2+1)
p<-p[1:nUniquePts]
p<-abs(p)
p<-p/n
p<-p*2
pdf(file="fft_plot_acc_time_10kmh",width=8,height=7)
par(mar=c(5,5,4,2))
plot(datos$tiempo,datos$acceleracion,type="l",main="Aceleracionenfunciondeltiempo10[km/h]",xlab="Tiempo[s]",ylab=expression("Aceleracion[m/~s^2~]"))
dev.off()
```

Apéndice E

Tablas de frecuencias capturadas

Frecuencia [Hz]	Amplitud [m/s ²]
0.32	0.07
0.36	0.12
0.40	0.46
0.43	0.20
0.47	0.07
0.68	0.06
0.72	0.59
0.76	0.07
1.01	0.06
1.04	0.08
1.08	0.10
1.12	0.14
1.15	0.23
1.19	0.58
1.22	0.76
1.26	0.55
1.30	0.69
1.33	0.26
1.37	0.17
1.40	0.13
1.44	0.11
1.48	0.09
1.51	0.08
1.55	0.08
1.58	0.07
1.62	0.06
1.66	0.06
1.69	0.06
1.73	0.05
1.76	0.05
1.80	0.05
2.02	0.05
2.05	0.05
2.09	0.06
2.12	0.08
2.16	0.42
2.23	0.17
2.27	0.11
3.64	0.10

Cuadro E.1: Amplitud y frecuencias de los puntos de la Figura 7.2 que sobrepasan la amplitud de 0,05 [m/s²].

Frecuencia [Hz]	Amplitud [m/s ²]
0.32	0.06
0.36	0.11
0.40	0.46
0.43	0.20
0.47	0.08
0.68	0.07
0.72	0.57
0.76	0.06
1.08	0.07
1.12	0.11
1.15	0.19
1.19	0.54
1.22	0.80
1.26	0.25
1.30	0.15
1.33	0.11
1.37	0.09
1.40	0.08
1.44	0.07
1.48	0.06
1.51	0.05
2.12	0.05
2.16	0.39
2.56	0.32
3.64	0.11
4.50	0.11

Cuadro E.2: *Amplitud y frecuencias de los puntos de la Figura 7.4 que sobrepasan la amplitud de 0,05 [m/s²].*

Bibliografía

- [1] F. Campos, *Estudio técnico-económico del uso de hidrógeno en aplicaciones de electromovilidad en Codelco División El Teniente*. PhD thesis, Universidad Técnica Federico Santa Maria, 2019.
- [2] S. S. Rao, *Vibraciones mecánicas*. México: Pearson Educación, 2012. OCLC: 1055448254.
- [3] R. Brantes Abarca and J. Cantallop Araya, “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019,” 2020.
- [4] “CODELCO - Corporación Nacional del Cobre , Chile,” 2020.
- [5] V. Dörner, “Innovación y sostenibilidad en la minería caso de Electromovilidad en El Teniente,” 2020.
- [6] “Tecnologías del Hidrógeno y Perspectivas para Chile 2019 - 4e Chile.”
- [7] “Effect of strengthened road vibration on performance degradation of PEM fuel cell stack - ScienceDirect.”
- [8] A. Haji Hosseinloo and M. M. Ehteshami, “Shock and vibration effects on performance reliability and mechanical integrity of proton exchange membrane fuel cells: A critical review and discussion,” *Journal of Power Sources*, vol. 364, pp. 367–373, Oct. 2017.
- [9] V. Palan, W. S. Shepard, and K. A. Williams, “Removal of excess product water in a PEM fuel cell stack by vibrational and acoustical methods,” *Journal of Power Sources*, vol. 161, pp. 1116–1125, Oct. 2006.
- [10] D. P. Wilkinson, H. H. Voss, and K. Prater, “Water management and stack design for solid polymer fuel cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 49, pp. 117–127, Apr. 1994.
- [11] V. Palan and W. S. Shepard, “Enhanced water removal in a fuel cell stack by droplet atomization using structural and acoustic excitation,” *Journal of Power Sources*, vol. 159, pp. 1061–1070, Sept. 2006.
- [12] G. Diloyan, M. Sobel, K. Das, and P. Hutapea, “Effect of mechanical vibration on platinum particle agglomeration and growth in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell catalyst layers,” *Journal of Power Sources*, vol. 214, pp. 59–67, Sept. 2012.

- [13] R. Banan, A. Bazylak, and J. Zu, “Combined effects of environmental vibrations and hygrothermal fatigue on mechanical damage in PEM fuel cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 1911–1922, Jan. 2015.
- [14] R. Banan, A. Bazylak, and J. Zu, “Effect of mechanical vibrations on damage propagation in polymer electrolyte membrane fuel cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 14764–14772, Nov. 2013.
- [15] L. Breziner, P. Strahs, and P. Hutapea, “Effect of Vibration on the Liquid Water Transport of PEM Fuel Cells,” vol. 6, Nov. 2009.
- [16] S. J. Imen and M. Shakeri, “Reliability Evaluation of an Open-Cathode PEMFC at Operating State and Longtime Vibration by Mechanical Loads,” *Fuel Cells*, vol. 16, pp. 126–134, Feb. 2016.
- [17] N. Rajalakshmi, S. Pandian, and K. S. Dhathathreyan, “Vibration tests on a PEM fuel cell stack usable in transportation application,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 3833–3837, May 2009.
- [18] C.-W. Wu, B. Liu, M.-Y. Wei, and W. Zhang, “Mechanical Response of a Large Fuel Cell Stack to Impact: A Numerical Analysis,” *Fuel Cells*, vol. 15, no. 2, pp. 344–351, 2015.
eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/fuce.201400153>.
- [19] Y. Hou, X. Zhang, X. Lu, D. Hao, L. Ma, and P. Li, “AC impedance characteristics of a vehicle PEM fuel cell stack under strengthened road vibrating conditions,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 18362–18368, Oct. 2014.
- [20] Y. Hou, D. Hao, J. Shen, P. Li, T. Zhang, and H. Wang, “Effect of strengthened road vibration on performance degradation of PEM fuel cell stack,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 5123–5134, Mar. 2016.
- [21] A. Sanchez, “Desafíos de la electromovilidad de alta potencia,” 2020.
- [22] J. Salva Aguirre, “Modelo unidimensional de una pila de combustible tipo PEM y validación experimental,” 2012.
- [23] T. D. Gillespie, *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.
- [24] J. A. C. O, F. A. M. A, and J. A. C. O, “Del análisis de fourier a las wavelets análisis de fourier,” *Scientia et Technica*, vol. 1, May 2007. Number: 34.
- [25] L. A. L. C and D. C. Toloza, “Análisis frecuencial y de la densidad espectral de potencia de la estabilidad de sujetos amputados,” *TecnoLógicas*, vol. 23, no. 48, pp. 1–16, 2020.
- [26] L. Gao, F. Ma, and C. Jin, “A Model-Based Method for Estimating the Attitude of Underground Articulated Vehicles,” *Sensors*, vol. 19, p. 5245, Jan. 2019. Number: 23 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- [27] Y. Yin, S. Rakheja, and P.-m. Boileau, “Multi-performance analyses and design optimisation of hydro-pneumatic suspension system for an articulated frame-steered vehicle,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 57, pp. 1–26, Mar. 2018.
- [28] A. Tonkovich, Z. Li, S. DiCecco, W. Altenhof, R. Banting, and H. Hu, “Experimental observations of tyre deformation characteristics on heavy mining vehicles under static and quasi-static loading,” *Journal of Terramechanics*, vol. 49, pp. 215–231, June 2012.
- [29] M. Avesh and R. Srivastava, “Modeling simulation and control of active suspension system in Matlab Simulink environment,” *2012 Students Conference on Engineering and Systems*, 2012.
- [30] J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*. New York: John Wiley, 3rd ed ed., 2001.
- [31] A. Ahmadi, G. Farrahi, K. reza kashyzadeh, S. Azadi, and K. Jahani, “A comparative study on the fatigue life of the vehicle body spot welds using different numerical techniques: Inertia relief and Modal dynamic analyses,” *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 14, pp. 67–81, Jan. 2020.
- [32] R. Banan, A. Bazylak, and J. Zu, “Combined effects of environmental vibrations and hygrothermal fatigue on mechanical damage in PEM fuel cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 1911–1922, Jan. 2015.
- [33] Y. Hou, B. Zhou, W. Zhou, C. Shen, and Y. He, “An investigation of characteristic parameter variations of the polarization curve of a proton exchange membrane fuel cell stack under strengthened road vibrating conditions,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 11887–11893, Aug. 2012.
- [34] S. de la República, “H2V Iniciativa Hidrógeno Verde,” 2020.