



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO DE UN PILOTO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDROGENO
COMO FUENTE DE ENERGÍA PARA CAMIONES CAEX.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

VICENTE EMILIO SILVA GARRIDO

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERON MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONEL NUÑEZ LAZO
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Minera Los Pelambres

SANTIAGO DE CHILE
2022

DISEÑO DE UN PILOTO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDROGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA PARA CAMIONES CAEX.

En la actualidad y durante las próximas décadas, Chile y el mundo se verán enfrentados a nuevos desafíos generados por el cambio climático. El consumo elevado de combustible por parte de los motores de combustión presenta uno de los mayores desafíos. Dentro de la industria minera en Chile, se libera una cantidad importante de CO_2 a la atmósfera, contribuyendo con un total de 6.252.000 Ton de CO_2 anualmente, lo que representa un 5,4 % del total generado en Chile. Dentro del marco del Plan energético nacional, se pretende que para el año 2050, se eliminen totalmente las emisiones contaminantes por parte de la industria minera.

Como una alternativa a los motores de combustión, la tecnología de las celdas de combustible (FC) aparece como una de las posibles soluciones. Las celdas de combustible son dispositivos utilizados para generar energía eléctrica, por medio de una reacción electroquímica, pudiendo disminuir al mínimo la emisión de gases nocivos. Las celdas de combustible se han implementado como sustitutos o complementos en la generación de energía en la industria automotriz, entregando resultados positivos desde el punto de vista operacional. Se proyectan como una buena alternativa para vehículos de mayor tamaño, debido a las ventajas que presentan en cuanto a la posibilidad de generar sistemas híbridos con baterías para la recuperación de energía y la elevada densidad energética del combustible de H_2 .

Cerca del 80 % de las emisiones generadas por la Minera Los Pelambres (MLP), proviene del consumo de combustible por parte de sus camiones de extracción minera (CAEX), por esto, se ha planteado sustituir los motores de combustión por un sistema arreglo híbrido de celdas de combustible y baterías. Dentro de este marco, se genera el trabajo desarrollado en este documento, que tiene como objetivo el de dimensionar y diseñar un piloto que permita validar la tecnología de las celdas de combustible para camiones CAEX.

Para el desarrollo de este trabajo de título y la selección de equipos a utilizar, es necesario estudiar sobre las celdas de combustible y su aplicación en electro-movilidad, generando una visión amplia y actualizada de esta tecnología en constante desarrollo. Posterior a la selección de las tecnologías, se genera un ciclo de condición característico que modela el comportamiento de operación de los camiones. El ciclo de conducción es necesario para realizar un dimensionamiento de los principales equipos, por medio de un modelo de optimización que utiliza los registros de velocidad, pendiente y aceleración. Finalmente dentro del marco de la guía de proyectos especiales de hidrógeno, se diseñan una serie de pruebas, con el objetivo de obtener resultados que permitan demostrar el correcto funcionamiento de las celdas de combustible en condiciones de operación de la mina, y de los sistemas híbridos en condiciones de operación de la mina y sometidos a demandas de potencia representativas de la operación.

*A los que traen sus sueños a la realidad
y los valientes que nunca dejaron de intentarlo.*

Saludos

Agradecimientos

Luego de varios años de estudio, es difícil no estar agradecido con todas las personas que han formado parte de mi formación como profesional pero me gustaría hacer una mención especial para ciertas personas y grupos.

Primero quiero agradecer a mi familia, mi madre y padre me han acompañado durante todos estos años, brindándome todas las comodidades y cariño para que pueda despeñarme de la mejor forma en mis estudios. Desde sus vivencias y sabiduría he forjado mi visión por ayudar al resto y dar lo mejor de mi por un fin mayor.

Agradecer a mis buenos amigos de la universidad, con los cuales he compartido una infinidad de alegrías y alegrías, junto a ellos encontré un espacio donde poder crecer en otras aristas que muchas veces la universidad pone en segundo plano. El haber conocido gente integra con valores bien definidos, me ha ayudado a creer en los nuevos profesionales que aspiran a generar un cambio que colabore con el crecimiento de la sociedad chilena.

Mis amigos de la vida, en especial los de Scout, agradezco haberlos conocido, aunque me he distanciado muchos de ellos, son parte esencial de quien soy hoy como persona. Siempre guardo los lindos recuerdos que nos forjaron como jóvenes y que hoy forman parte de quienes somos.

Profesores y cuerpos docentes, agradezco haber contado con un gran número de buenos docentes, quienes con sus limitaciones pedagógicas siempre encontraron la forma de enseñar y acompañar en la formación de las nuevas generaciones.

Agradezco a Javiera por haber formado parte de esta etapa y sobre todo por haberme dado la fortaleza en los momentos de flaqueza.

Gracias Tomas, Solange y Camilo por ser esos compañeros de carrera que uno no sabía que necesitaba pero que se volvieron imprescindibles con el pasar de los semestres, agradezco a la vida por ponernos en el mismo camino.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción y Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Antofagasta Minerals (AMSA)	3
2.1.1. Minera los Pelambres (MLP)	3
2.2. Panorama energético	4
2.2.1. Panorama energético nacional	4
2.2.2. Panorama energético MLP	6
2.2.3. Estrategia nacional del Hidrógeno verde	7
2.3. Hidrógeno como vector energético	9
2.4. Camión CAEX	10
2.4.1. Camión CAEX 930E-4	10
2.4.2. Principales componentes CAEX 930E-4	10
2.4.2.1. Motor de tracción eléctrico	10
2.4.2.2. Motor de combustión	11
2.4.2.3. Alternador	12
2.4.3. Camión CAEX eléctrico	12
2.4.4. Camiones CAEX como HFCEV's	14
2.4.4.1. Mina Mogalakwena (Anglo American)	14
2.4.4.2. Grupo Weichai	14
2.4.4.3. CORFO-HYDRA	15
2.4.5. Prefactibilidad técnica y económica	15
2.4.6. Hoja de Ruta	16
2.5. Celdas de combustible	17
2.5.1. Tipos de FC a partir de Hidrógeno	18
2.5.2. Celda de Combustible de Membrada de intercambio protónico (PEMFC)	19
2.5.3. Pilas PEMFC	20
2.5.4. Fabricantes de pilas PEMFC	21
2.5.4.1. Horizon	21
2.5.4.2. Ballard	21
2.5.5. Baterías de Litio	22
2.6. Ciclos de conducción	23

2.7. Niveles de la madurez tecnológica (TRL)	24
3. Ciclo de conducción característico	25
3.1. Ciclo de conducción característico	26
3.2. Perfil de Potencia	29
3.2.1. Cálculo de potencia Instantánea	29
3.2.1.1. Fuerza de resistencia a la rodadura	29
3.2.1.2. Fuerza de resistencia aerodinámica	30
3.2.1.3. Fuerza gravitatoria	30
3.2.1.4. Cálculo de Energía consumida durante el ciclo	30
3.2.2. Resultados	31
4. Dimensionamiento y diseño del sistema PEMFC-Batería	32
4.1. Descripción del sistema	34
4.1.1. Modelado de la pila de PEMFC	35
4.1.2. Modelado de batería	36
4.2. Metodología	37
4.2.1. Problema de optimización	37
4.2.1.1. Optimización externa - Componentes de dimensionamiento de PSO	39
4.2.1.2. Optimización interna: restricción EM	41
4.3. Resultados	43
5. Diseño de Pruebas Piloto	44
5.1. Descripción General	45
5.1.1. Objetivos	45
5.1.2. Alcance	45
5.1.3. Responsabilidades	46
5.1.4. Planificación para pruebas piloto	47
5.1.5. Ubicación y condiciones climáticas	47
5.2. Consideraciones Normativas	48
5.2.1. Documentos	48
5.2.1.1. Equipos	48
5.2.1.2. Pruebas y operación	49
5.2.1.3. Seguridad	49
5.2.1.4. Complementarios	49
5.2.1.5. Estándares informativos	49
5.3. Pruebas para sistema de pila PEMFC	50
5.3.1. Equipos y componentes	50
5.3.1.1. Instrumentos de medición	50
5.3.1.2. Equipos complementarios	50
5.3.1.3. Diagramas de conexión	51
5.3.2. Pruebas de funcionamiento	51
5.3.2.1. Condiciones generales del ensayo	51
5.3.2.2. Módulos de prueba	52
5.3.2.2.1. Estado frío	52
5.3.2.2.2. Estado caliente	52
5.3.2.2.3. Arranque en frío	52

5.3.2.2.4.	Arranque en caliente	53
5.3.2.2.5.	Potencia nominal	53
5.3.2.2.6.	Potencia máxima	53
5.3.2.2.7.	Dinámica	53
5.3.2.2.8.	Dinámica de carga	54
5.3.2.2.9.	Estado estacionario	54
5.3.2.2.10	Hermeticidad	54
5.3.2.3.	Cálculos	54
5.3.2.3.1.	Flujo de combustible	54
5.3.2.3.2.	Potencia de la pila	55
5.3.2.3.3.	Eficiencia de la pila	55
5.3.2.4.	Resultados esperados	55
5.3.3.	Pruebas de mapeo de rendimiento	56
5.3.3.1.	Condiciones generales del ensayo	56
5.3.3.2.	Módulos de prueba	56
5.3.3.2.1.	Sensibilidad a la humedad	56
5.3.3.2.2.	Sensibilidad a la temperatura	57
5.3.3.2.3.	Sensibilidad a la presión	57
5.3.3.2.4.	Sensibilidad a la estequiometría	57
5.3.3.2.5.	Curva de polarización	58
5.3.3.2.6.	Voltamperometría	58
5.3.3.2.7.	Potenciometría	59
5.3.3.2.8.	Espectroscopia de impedancia	60
5.3.3.2.9.	Cruce de hidrógeno	61
5.3.3.3.	Descripción prueba de mapeo de rendimiento	62
5.3.3.4.	Cálculos	62
5.3.3.5.	Resultados esperados	63
5.4.	Pruebas para sistemas híbrido PEMFC-Batería	64
5.4.1.	Equipos y componentes	64
5.4.1.1.	Equipos Principales	64
5.4.1.2.	Equipos de medición	64
5.4.1.3.	Diagrama de conexión	65
5.4.2.	Pruebas de funcionamiento	65
5.4.2.1.	Condiciones generales del ensayo	65
5.4.2.2.	Descripción de prueba	65
6.	Resultados	66
7.	Conclusiones	67
7.1.	Trabajo propuesto	67
	Bibliografía	68
	ANEXOS	70
A.	Hoja técnica Komatsu 930E-4	71
B.	Hoja técnica Ballard's FCmove™-HD 70kW	76

Índice de Tablas

2.1.	Balance energético nacional de 2019. [4].	5
2.2.	Comparación de las características del Hidrógeno con otros combustibles de uso convencional.	9
2.3.	Especificaciones sistema eléctrico	11
2.4.	Especificaciones motor de combustión	12
2.5.	Tabla comparativa entre diferentes tipos de celdas de combustible.	19
3.1.	Características del ciclo seleccionado	27
3.2.	Especificaciones CAEX 930E-4	29
4.1.	Valores constantes para la FC	36
4.2.	Valores constantes para la Bateria	37
4.3.	Resultados de optimización	43
5.1.	Parámetros de entrada de prueba representativos específicos de la operación	56
5.2.	Parámetros de entrada prueba de voltamperometría.	59
5.3.	Parámetros de entrada prueba de potenciometría.	60
5.4.	Parámetros de entrada prueba de potenciometría.	61
5.5.	Parámetros de entrada prueba de Hidrógeno.	62

Índice de Ilustraciones

2.1.	Demanda de energía eléctrica en Chile proyectada ente 2020-2040 [3].	4
2.2.	Consumo Energético Mineras 2001-2019 [5].	5
2.3.	Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile entre 2011-2019 [6].	6
2.4.	Consumo Energético MLP 2019 [7].	6
2.5.	Proyección del mercado chileno de hidrógeno [2].	8
2.6.	Proyección de las 6 aplicaciones prioritarias por parte del gobierno [2].	8
2.7.	CAEX 930E-4.	10
2.8.	GDY106 Induction Traction Motors.	11
2.9.	Camión Caex asistido por sistema trolley.	13
2.10.	VAN para reacondicionamiento de camiones y cajas de camiones convencionales, para cada escenario de inversión potencial [11].	16
2.11.	Hoja de ruta para camiones CAEX de AMSA.	16
2.12.	Diagrama del principio de funcionamiento de celda de combustible con Hidrógeno como combustible.	17
2.13.	Diagrama esquemático de un módulo PEMFC (célula de combustible de membrana de intercambio de protones).	20
2.14.	Batería de litio.	22
2.15.	Ejemplo de ciclo de conducción.	23
3.1.	Planificación de tiempos y consumos para diferentes condiciones de operación .	26
3.2.	Vista superior de sectores de carga y descarga de la ruta	27
3.3.	Perfil de velocidades correspondientes al ciclo de conducción característico . .	28
3.4.	Perfil de alturas correspondientes al ciclo de conducción característico	28
3.5.	Potencia instantánea en función al ciclo de conducción	31
4.1.	Diagrama teórico del algoritmo.	33
4.2.	Diagrama del sistema propuesto	34
4.3.	Diagrama del sistema propuesto reducido	35
4.4.	Eficiencia de la FC en función a su potencia	36
4.5.	Modelo del circuito de la batería	37
4.6.	Diagrama de algoritmo de optimización de enjambre de partículas	40
4.7.	Diagrama de cálculo del vector de movimiento de cada partícula (PSO)	40
4.8.	Algoritmo de control optimo	42
5.1.	Minera los Pelambres	48
5.2.	Edificio de mantenciones Komatsu - Minera los pelambres	48
5.3.	Diagrama para los módulos de pruebas de pila PEMFC.	51
5.4.	Diagrama para las pruebas de pila PEMFC	65

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción y Motivación

El gran impacto producido por el cambio climático y la mayor conciencia sobre la importancia de este, ha generado una oportunidad para cambiar la forma en la que las industrias realizan sus procesos, junto a lo anterior, el desarrollo de políticas públicas que aspiran a la disminución en la emisión de gases de invernadero, a llevado a las empresas a encontrar nuevas tecnologías que permitan realizar los mismos procesos, priorizando las que afecten en menor medida al medio ambiente.

Hoy en día una de las mayores amenazas que enfrenta la sociedad chilena, es el elevado nivel de contaminación producido por la industria minera. Para el año 2019 la quema de combustibles fósiles [1] por parte de la industria minera contribuyo con 6.252 kTon de CO₂, correspondientes al 5,4% del total de CO₂ producido por el país.

Debido a las grandes cantidades de CO₂ que se producen a nivel industrial, el Estado de Chile esta tomando las medidas correspondientes para gestionar sus emisiones, es así como se ha definido un plan que apunta a disminuir a cero las emisiones de dióxido de carbono para el año 2050. Este Plan contempla la Estrategia nacional de hidrógeno verde [2], en donde el hidrógeno H₂ cumple un rol crucial en la forma de generar y consumir energía.

Nuevas soluciones tecnológicas de generación de energía buscan enfrentar el problema medioambiental, aprovechando la gran ventaja que posee Chile en la producción de combustible de Hidrógeno [2], entre ellas se destaca las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (FCPEM), que presentan la importante ventaja de no producir gases de invernadero. Las FCPEM han sido estudiadas e implementadas en electro-movilidad, presentado resultados positivos [2], por lo que se presentan como una alternativa para remplazar los motores de combustión tradicionales utilizados por los camiones CAEX, el principal contribuidor de las emisiones directas en minería.

La minera los pelambres (MLP) es consciente del problema generado por el elevado consumo de diésel por los CAEX, por lo que se encuentra evaluando la adopción tecnológica de la celdas de combustible. El presente trabajo de título, tiene el fin acelerar el proceso de validación de esta tecnología, para esto se desarrolla una serie de pruebas piloto con el objetivo verificar su funcionamiento en las condiciones de operación para su adopción tecnológica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo del proyecto es dimensionar y diseñar un piloto que a futuro permita validar la tecnología de las celdas de combustible (FC) para camiones CAEX en la Minera Los Pelambres (MLP).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar y describir la tecnología de celdas de combustible, en términos de sus principios, fabricantes de equipos y aplicaciones, particularmente aplicado en vehículos.
- Seleccionar el tipo de celda de combustible y el sistema de potencia apropiados para los camiones CAEX.
- Seleccionar y analizar los principales parámetros operativos de los camiones CAEX, para construir su ciclo de conducción característico de operación en la mina.
- Dimensionar los principales equipos que se ajusten a las demandas energéticas, dimensiones y condiciones de operación de los camiones.
- Elaborar un sistema de pruebas que permita evaluar el desempeño de un sistema híbrido de celdas de combustible como fuente de energía para un camión CAEX.

1.3. Alcances

- La selección y análisis de los principales parámetros operativos, se realiza para un recorrido que representa de mejor manera las inclinaciones y distancias de operación de los camiones, con el fin de obtener un ciclo de conducción característico de operación en la mina.
- Se propone un reacondicionamiento teórico del sistema de potencia, para solo un camión modelo de camión CAEX Komatsu 930E-4.
- En el presente trabajo de título no se consideran precios al momento de elegir la tecnología, debido a que se quiere enfatizar en los análisis técnicos, pero podría incluirse en una propuesta posterior para elegir los mejores componentes del punto de vista técnico-económico.
- Actualmente la empresa Engie en conjunto con la Universidad Católica están desarrollando para la MLP un estudio sobre las aplicaciones de Hidrógeno como fuente de energía para diferentes procesos (generadores de energía, transportes livianos y pesados). El estudio tiene en directa relación con este trabajo, por lo que se mantiene contacto con estas organizaciones, para complementar ambos trabajos.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Antofagasta Minerals (AMSA)

El grupo Antofagasta Minerals (AMSA) es el principal grupo minero privado de Chile y es uno de los 10 mayores productores de cobre del mundo. Está dedicado a la extracción, producción, transporte y venta de productos minerales, entre los que destacan el concentrado de cobre, cátodos de cobre y concentrado de molibdeno.

Antofagasta Minerals tiene su origen en 1979 cuando su fundador Andrónico Luksic adquirió la empresa Ferrocarril Antofagasta Bolivia (FCAB), compañía que había iniciado sus operaciones en 1888. La empresa progresivamente se diversificó adquiriendo diferentes terrenos, esto condujo a una reestructuración organizacional de la cual AMSA se posiciona como la compañía encargada del negocio minero.

El Grupo opera en Chile con cuatro minas de cobre a rajo abierto, dos de las cuales producen además subproductos: molibdeno y oro. Las mineras son Minera Centinela, Minera Antucoya y Minera Zaldívar están localizadas en la región de Antofagasta. La Minera Los Pelambres se encuentra en la región de Coquimbo.

2.1.1. Minera los Pelambres (MLP)

Minera Los Pelambres es una empresa dedicada a la explotación y producción de concentrado de cobre y molibdeno. Perteneciente a Antofagasta Minerals S.A.(AMSA) el principal grupo minero privado a nivel nacional, es el tercer productor de cobre en Chile. La compañía opera desde fines de 1999 y posee una capacidad de procesamiento de 210 mil toneladas promedio diarias de mineral. Su yacimiento se ubica a 45 kilómetros al este de la ciudad de Salamanca y su puerto se sitúa en la comuna de los Vilos, en el sector de Punta Chungo, en la cuarta región de Chile, con coordenadas $31^{\circ} 36'$ latitud sur y $70^{\circ} 50'$ longitud este. Sus instalaciones recorren 210 kilómetros desde la cordillera al mar pasando por las comunas de Salamanca, Illapel y Los Vilos donde se encuentra su puerto de embarque, en un entorno donde coexisten otras comunidades y mas de mil habitantes, quienes desarrollan tradicionales actividades económicas como agricultura, ganadería de subsistencia, pesca y minería artesanal.

2.2. Panorama energético

2.2.1. Panorama energético nacional

Ha medida que Chile crece en población y se desarrolla industrialmente, mayor es la energía que se requiere para abastecer la creciente demanda energética, por lo que hoy en día, la producción y gestión de energía cumple un papel fundamental en el devenir del país. En consecuencia, existe el desafío de contar con los recursos energéticos suficientes y competitivos para apoyar este desarrollo.

Según el Coordinador eléctrico nacional, se proyecta un incremento en la demanda de energía eléctrica nacional hasta el 2040, en donde se aprecia un crecimiento sostenido para los próximos 20 años (figura 2.1). De lo anterior, es posible concluir que el comportamiento de la demanda energética total también se mantendrá al alza.

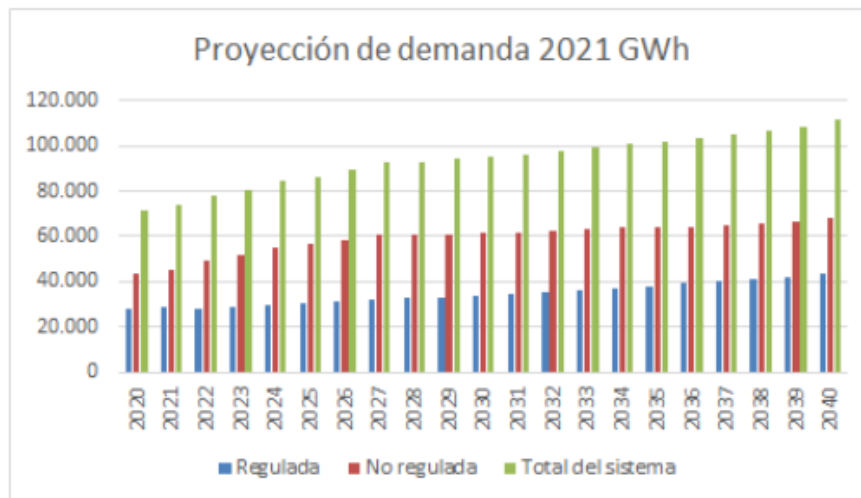


Figura 2.1: Demanda de energía eléctrica en Chile proyectada ente 2020-2040 [3].

El ministerio de energía, ha realizado un balance nacional de energía durante el año 2019 [4], donde se ha obtenido que la demanda energética total del país fue de 401.718,8 GWh. La tabla 2.1 informa el porcentaje energía consumida en el país provenientes de diversas fuentes, evidenciando el importante rol que cumple el petróleo dentro de la producción energética nacional. El petróleo y sus derivados representaron el 29,7% del consumo energético nacional, los que son utilizados principalmente en el proceso de combustión, donde se liberan gases nocivos para la salud y el medio ambiente, entre los cuales se encuentran gases como el Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x).

Tabla 2.1: Balance energético nacional de 2019. [4].

Fuente	Consumo [TJ]	Porcentaje [%]
Petróleo Crudo	119.169,4	29,7
Biomasa	94.342,7	23,5
Carbón	87.186,6	21,7
Gas Natural	65.086,9	16,2
Energía Hídrica	21.429,7	5,3
Energía Solar	6.415,2	1,6
Energía Eólica	4.892,7	1,2
Geotermia	2.018,8	0,5
Biogás	1.175,2	0,3
Total	401.718,8	100

Son diversos los consumidores de petróleo y sus derivados a lo largo de Chile, pero su principal consumidor son los motores de combustión, ampliamente utilizados en la generación de energía para toda clase de vehículos. Al 2019 la industria minera del cobre tuvo un consumo total de energía de 175.134 TJ, lo que representa alrededor del 14% del consumo del total país. De este total, 89.769 TJ son de la energía eléctrica y 85.365 TJ por consumo de combustibles. La figura 2.3 ilustra el consumo energético de electricidad (51,3% del total), el consumo energético de combustibles (48,7%) y la producción de cobre fino desde el 2001 al 2019.

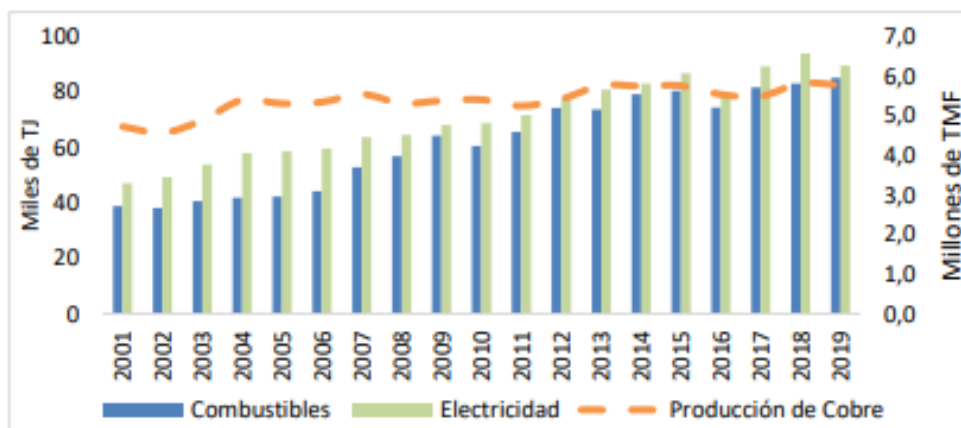


Figura 2.2: Consumo Energético Mineras 2001-2019 [5].

Los niveles de consumo de electricidad y combustible son preocupantes, debido a que estos consumos generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales pueden ser directas (combustibles) o indirectas (electricidad). Durante el año 2019 se registraron emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por un total de 16.366 mil toneladas de CO₂, equivalentes distribuidas en 6.252 mil toneladas de CO₂ por GEI directos (38,2% del total de emisiones de la minería del cobre) y 10.114 mil toneladas de CO₂ por GEI indirectos (61,8% del total).

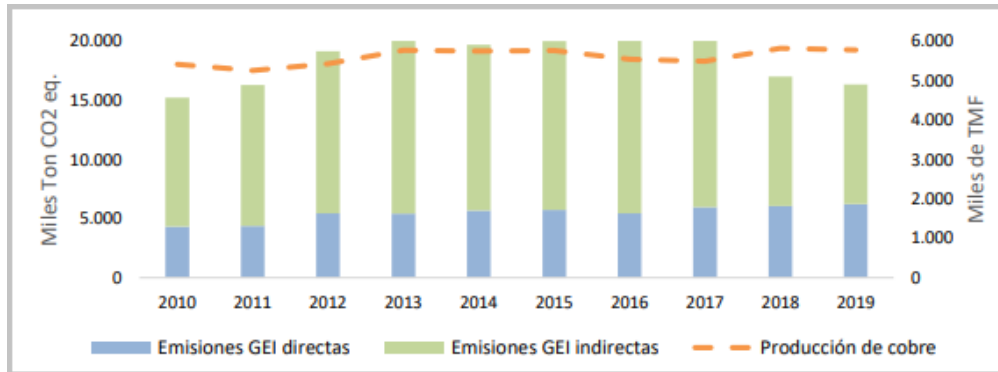


Figura 2.3: Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile entre 2011-2019 [6].

2.2.2. Panorama energético MLP

La Minera Los Pelambres es una de las mayores minas a rajo abierto del país, es el tercer productor de cobre en Chile y el noveno productor de cobre a nivel internacional. Al ser una minera de gran tamaño, se requiere de bastante energía para operar todos los equipos involucrados en el proceso de extracción, procesamiento y transporte del mineral. Durante el año 2019 el consumo de energía por parte de la mina fue de 8.120 TJ equivalentes a 2.255,5 GWh (figura 2.4), el total de energía eléctrica consumida fue de 1.353,3 GWh, mientras que el consumo de energía proveniente del diésel fue de un total de 902,2 GWh, representando un 60 % y 40 % respectivamente.

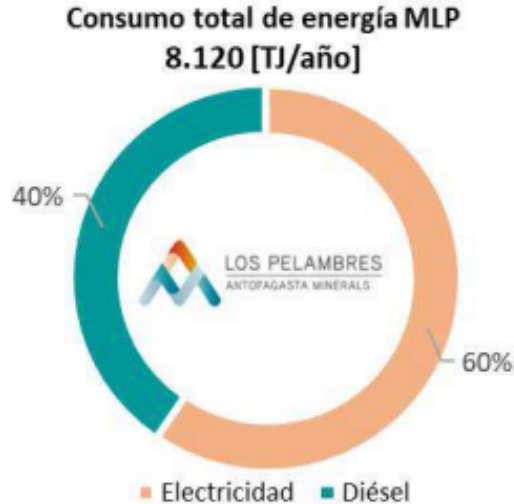


Figura 2.4: Consumo Energético MLP 2019 [7].

Dentro de todos los equipos de la mina, los camiones CAEX son uno de los mayores consumidores energéticos de MLP, debido a su elevado consumo del combustible diésel. Los camiones CAEX consumen un 78.6 % del total del diésel, correspondiente a un total de 91.213 m^3 de combustible. La MLP ha reportado al gobierno una emisión total de 251.580 Ton de CO_2 , correspondientes al 4 % del total de emisiones de GEI directos de CO_2 en minería.

2.2.3. Estrategia nacional del Hidrógeno verde

En respuesta a los niveles de contaminación y elevado consumo de combustible fósiles, el gobierno del Chile plantea sustituir los combustibles convencionales, por métodos de generación de energía mas limpia, que generen una disminución en la huella de carbono durante las próximas décadas.

Aprovechando las condiciones del territorio chileno para la generación de energías limpias, el gobierno de Chile emitió una propuesta para la transición de la matriz de combustibles con la intención de incorporar el Hidrógeno verde dentro de ella y que, a su vez sea un recurso competitivo en mercados locales e internacionales. La propuesta se inicio con mesas técnicas e interinstitucionales, consejos asesores, talleres y culminando con una consulta ciudadana respecto al tema, luego, a través de un plan de 3 etapas se espera poder aumentar la forma en que Chile utiliza estas nuevas fuentes energéticas limpias, en remplazo de los combustibles convencionales. Las etapas en cuestión están diferenciadas hacia los usos que se le pueden dar al Hidrógeno verde y a su situación en el mercado:

- Etapa 1: Enfocada en la aplicaciones que tengan una demanda fija, concentrada y de gran escala a nivel país como lo son: el uso doméstico, transporte de cargas y remplazo de amoniaco exportado, por el de uso local.
- Etapa 2: Aquí los esfuerzos serán concentrados en consorcio que estén en la escala de un uso energético de gigaWatts, como lo son: la minería, las matrices de distribución para combustibles gaseosos y el inicio del mercado de la exportación.
- Etapa 3: El objetivo en este punto es que a medida que los mercados internacionales realicen sus medidas descarbonificadoras, se espera: la ampliación de los mercados de exportación, diversificación de la aplicación de los combustibles derivados de Hidrógeno verde y la descarbonificación de los transportes marítimos y aéreos en rutas nacionales e internacionales.

Actualmente Chile realizo las discusiones preliminares asociadas al tema y se espera que con la ejecución del plan se pueda llegar al estado de apoyo de iniciativas demostrativas y proyectos piloto, se espera a futuro poder tener una matriz productora y económica en base a esta clase de combustibles. El objetivo es poder llevar el mercado del Hidrógeno verde y sus derivados a una situación de competencia frente al mercado local e internacional, esto es posible debido a las posibilidades de generación de energías renovables posibles a lo largo del territorio chileno.

En la figura 2.5, es posible apreciar la proyección en la producción del hidrógeno verde, enfatizando tanto como su uso en aplicaciones locales, en su posible venta y exportación.

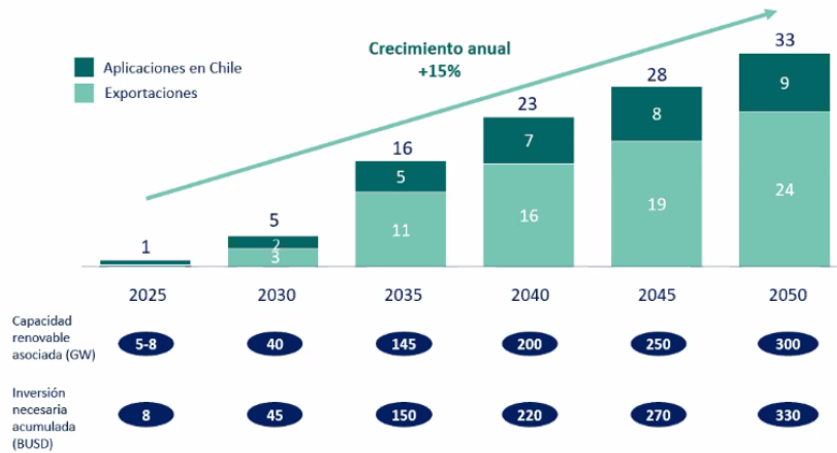


Figura 2.5: Proyección del mercado chileno de hidrógeno [2].

Se propone el despliegue y uso del hidrógeno verde en 6 aplicaciones prioritarias en Chile para construir un mercado local, donde se iniciará una industria local mediante esfuerzos y regulación que incentiven la producción y que fomenten la demanda de este elemento limpio y sus derivados.

El foco estará en las aplicaciones que se encuentren más cerca de mercado y/o que presenten una demanda establecida, concentrada y de gran escala. Así, se generará conocimiento, infraestructura y cadenas de suministro que permitirán a Chile acceder a mercados de exportación

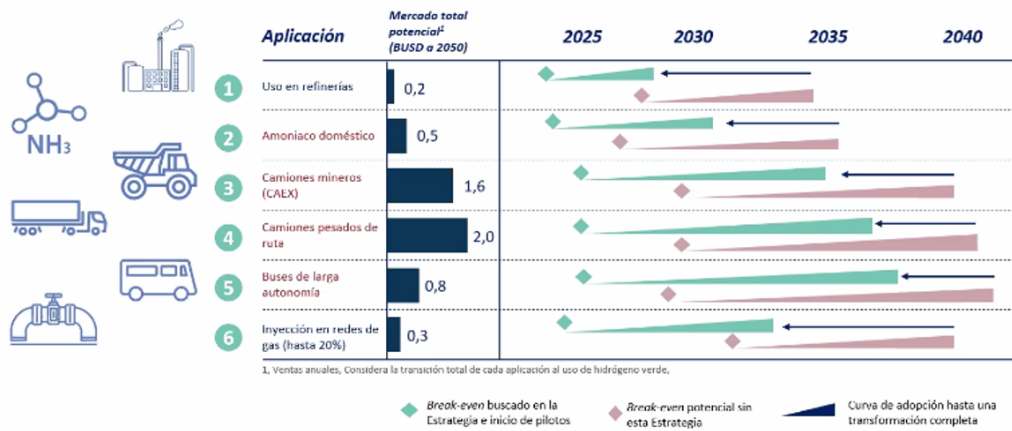


Figura 2.6: Proyección de las 6 aplicaciones prioritarias por parte del gobierno [2].

En la figura 2.6, es posible apreciar que el inicio de pilotos aplicados en CAEX tiene una proyección para el año 2025.

2.3. Hidrógeno como vector energético

El Hidrógeno es el elemento mas ligero y abundante en el universo, pero en la Tierra raramente se encuentra en estado libre, debido a su naturaleza altamente reactiva, suele encontrarse formando, junto a otros elementos, formando moléculas como por ejemplo el agua o hidrocarburos.

Una propiedad para tener en consideración, es el rol del Hidrógeno como un vector energético, esto refiere a que tiene la capacidad de transportar y almacenar una gran cantidad de energía. El Hidrógeno tiene la propiedad de almacenar mayor contenido energético por unidad de masa que la gasolina o el Propano (tabla 2.2,).

Tabla 2.2: Comparación de las características del Hidrógeno con otros combustibles de uso convencional.

	Hidrogeno	Gasolina	Propano
Poder Calorifico Interior(kJ/gr)	120	43	46
Densidad Gas (kg/Nm ³)	0,090	-	2,010
Densidad Energetica Gas (MJ/Nm ³)	10,8	-	92,5
Densidad Liquido (kg/l)	0,071	0,733	-
Densidad Energetica liq. (MJ/l)	10,8	31,5	-
Limites de inflamabilidad (%)	4,0-75	1,0 - 7,6	-
Limites de detonacion (%)	18,3 - 59	1,1 - 3,3	3,1 - 7
Minima energia de activacion (mJ)	0,02	0,24	0,26
Temp De comb Espontanea	858	501 - 744	760
Emisiones (mg CO ₂ /kJ)	0	80	65
Visibilidad de la llama	No	Si	Si
Toxicidad (combustible/emisiones)	No/No	Si/Si	Si/Si

El Hidrógeno puede ser obtenido por medio de cualquiera de las fuentes de energía primaria (energía solar, energía eólica y energía hidráulica) o fuentes de energía renovables, lo que genera el beneficio de poder convertir el sistema energético actual en un sistema menos contaminante. Otro beneficio del H₂ se presenta durante el proceso de su combustión, dado que no se producen subproductos nocivos, solo se produce agua y calor, convirtiéndose en un combustible mas ecológico para algunos medios de transporte que utilizan H₂ como fuente de energía por medio de combustión.

Adicionalmente, el Hidrógeno posee la gran ventaja de complementarse con el vector energético mayormente utilizado, es decir, con la electricidad. El excedente de electricidad producida en cualquier fuente de generación puede se transformada en H₂, por medio de un electrolizador. El Hidrógeno almacenado puede ser nuevamente transformado en electricidad empleando una pila de combustible, o se podría emplear directamente como combustible.

2.4. Camión CAEX

2.4.1. Camión CAEX 930E-4

Los camiones CAEX son vehículos pesados diseñados para transportar grandes cargas de materia, actualmente la Minera los Pelambres cuenta con 56 camiones Komatsu 930E-4 (figura 2.7), los cuales desempeñan el trabajo de cargar y transportar el depósito mineral extraído de la mina. Los camiones son cargados mediante palas para luego se transportados hasta los chancadores primarios.

Los CAEX 930E-4 tienen una capacidad de carga de 290 Toneladas, se encuentran operativos entre 17 a 18 horas por día, el resto del tiempo se encuentran detenidos por algún contratiempo o mantenimiento. Mensualmente las flotas de camiones transporta un aproximado de 13.000 kTon, consumiendo un aproximado de 115.530 L de diésel mensualmente.



Figura 2.7: CAEX 930E-4.

2.4.2. Principales componentes CAEX 930E-4

Se detallan algunos elementos relevantes para el desarrollo de este trabajo de título (otros detalles sobre el resto de componentes y dimensiones se encuentran en el anexo A).

2.4.2.1. Motor de tracción eléctrico

La rueda motorizada utilizada por el camión es la GDY-106 (figura 2.8), esta sirve como eje del camión, transmisión y motor de tracción AC. La energía eléctrica se aplica al motor de tracción de AC. El motor eléctrico gira y la fuerza de rotación se transfiere a través del eje de transmisión al portador de engranajes de alta velocidad, a través del piñón solar al portador de engranajes de baja velocidad que está atornillado al tubo de torsión que, a su vez, está atornillado a el cubo de la rueda. El vehículo se impulsa a medida que giran los neumáticos que están montados en el cubo de la rueda, mas detalles son expuestos en la 2.3.

En el retardo dinámico (el medio principal de reducción de velocidad), la energía mecánica

Tabla 2.3: Especificaciones sistema eléctrico

Alternador	GTA-41
Soplador en línea de doble impulsor	340 m ³ /min
Control	AC Torque control System
Ruedas Motorizadas	GDY106 Induction Traction Motors
Velocidad (Maximo)	64,5 km/h

del camión en movimiento es convertida en energía eléctrica por el motor de tracción de AC y esta energía eléctrica se disipa como calor a través de las rejillas de resistencia de frenado para desacelerar el vehículo.

La salida del alternador suministra energía eléctrica a los dos motores de rueda que van en la caja del eje trasero. Las ruedas motorizadas utilizan motores de inducción AC trifásicos con energía AC de onda total. Los motores, cada uno con su propio inversor, están conectados en paralelo a través de la salida rectificadora del alternador. Los inversores cambian el voltaje rectificado a AC, conectando y desconectando el voltaje DC aplicado.

El voltaje y frecuencia de salida AC se controla para producir un deslizamiento y eficiencia óptimos en los motores de tracción. A bajas velocidades el inversor actúa como un modulador de amplitud de pulso (PWM), a mayores velocidades el inversor funciona como modulador de onda cuadrada para poder convertir el voltaje DC a voltaje AC. El voltaje en el enlace DC (salida del rectificador del alternador principal) varía entre 600 [V] y 1400 [V] durante la propulsión y entre 600 [V] y 1500 [V] durante el retardo.

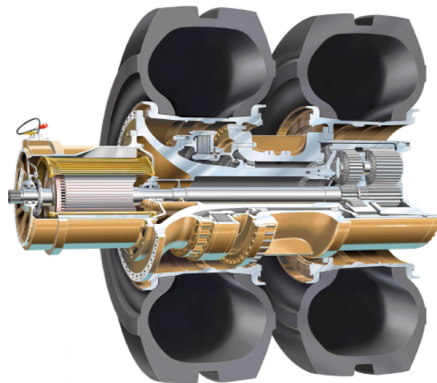


Figura 2.8: GDY106 Induction Traction Motors.

2.4.2.2. Motor de combustión

Actualmente es el motor mas utilizado, pero esta alternativa de generación de energía contamina mediante el proceso de combustión de donde saca la energía para mover el tren de potencia y así al vehículo, algunas de sus principales características son expuesta en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Especificaciones motor de combustión

Modelo	Komatsu SSSA16V160
Combustible	Diessel
Capacidad de estanque Gasolina	4542 L
Número de cilindros	16
Ciclo operativo	4 ciclos
Potencia de frenado nominal	2014 kW @1900 rpm
Poder al volante	1902 kW @1900 rpm
Peso	9608 kg

2.4.2.3. Alternador

El alternador, G.E Modelo GTA-26, es de rotor de ocho polos salientes, trifásico, autoexcitado con estator conectado en estrella y devanados terciarios. Está montado solidariamente al motor diesel y es movido por el cigüeñal. El rotor del alternador en la parte delantera se conecta directamente al cigüeñal del motor diesel a través de una palanca adaptadora y una placa flexible. En la parte trasera (lado de los anillos colectores), el rotor está soportado por un rodamiento de bolas.

El motor diesel acciona un alternador en línea a velocidad del motor. El alternador produce corriente AC que es rectificadora a DC dentro del gabinete de control principal. La corriente DC rectificada se vuelve a convertir en AC por medio de grupos de dispositivos llamados “inversores”, también dentro del gabinete de control principal. Cada inversor consta de seis módulos de fase bajo el control de una unidad de accionamiento de compuerta (GDU). La GDU controla la operación de cada módulo de fase.

Cada módulo de fase contiene un interruptor en estado sólido enfriado por aire conocido como tiristor de desconexión de compuerta (GTO). El GTO activa y desactiva un ciclo a diversas frecuencias para crear una señal de energía AC desde el suministro DC.

2.4.3. Camión CAEX eléctrico

Debido a los elevados niveles de contaminación generados por los camiones CAEX, AMSA ha decidido la adopción de nueva tecnología que le permitan migrar progresivamente a una minería más responsable con el cuidado del medio ambiente. Se plantea generar un cambio en el sistema de potencia de los camiones, de esta forma se busca eliminar el uso de motores de combustión interna. La alternativa de la utilización y generación de energía eléctrica se ha posicionado como la principal solución para el cambio.

Debido a que en la actualidad no existen camiones eléctricos de la envergadura y requisitos de potencia como los CAEX, se propone generar la adopción tecnológica de dos nuevas fuentes de energía para los camiones. La primera se plantea como una solución a corto plazo, consiste en la incorporación de un sistema de asistencia de potencia trolley (figura 2.9), que entrega directamente corriente al los camiones en los puntos donde se requiera de una mayor potencia. La segunda es la migración progresiva de los sistemas de diésel a sistemas eléctricos híbridos (HFCEV: Hybrid Fuel Cell Electric Vehicle).



Figura 2.9: Camión Caex asistido por sistema trolley.

Dentro de los sistemas de generación de potencia que utilizan hidrógeno como combustible, se opta por la implementación el sistema híbrido de pilas con batería, debido su nula contaminación y sus buenos desempeños en aplicaciones de electro-movilidad, mostrado que es un buen candidato para la su uso en vehículos de gran tamaño [8].

2.4.4. Camiones CAEX como HFCEV's

Los camiones son potenciados por pilas de celdas de combustible de hidrógeno (Capítulo 2.5) como fuente de energía primaria y baterías de litio como fuente de energía secundaria. Estos camiones aun no están disponibles de manera comercial, debido que hace solo unos años estos sistemas han vuelto a ser una buena opción, debido a que se han disminuido los precios de fabricación de sus componentes.

Los principales componentes como lo son las pilas de combustible y las baterías de litio son detalladas en las secciones 2.5 y ?? respectivamente. Además de contar con estos equipos, se destaca el uso tanques de hidrógeno como sustitutos a los tanques de gasolina, de convertidores de corriente y de contar con un freno regenerativo para recuperar la energía que se disipa usualmente durante el freno.

Entre otras de sus ventajas están su mayor eficiencia en comparación a los vehículos convencionales con motor de combustión interna, el rápido tiempo en el cual se llena el estanque en comparación con los otros autos eléctricos y finalmente tributación preferencial y subsidios a la compra que esta recibiendo por parte de los gobiernos [9]

Algunas mineras y empresas a lo largo del mundo, se han planteado la adopción de sistemas híbridos con celdas de combustible como fuente de energía para los camiones de extracción minera, pero han tenido que desarrollar esta tecnología para acelerar su procesos de adopción, a continuación se presentan los casos mas relevantes y la situación actual en la que se encuentran.

2.4.4.1. Mina Mogalakwena (Anglo American)

NPROXX está completando actualmente la fabricación de un nuevo e innovador sistema de tanque de combustible de hidrógeno, que está diseñado para impulsar los camiones de extracción minera más grandes del mundo, para una mina perteneciente a Anglo American en Sudáfrica. El camión propulsado por hidrógeno se probará en la mina Mogalakwena de Anglo American, la mina de platino a cielo abierto más grande del mundo, con proyección a que estos camiones se desplieguen en otras operaciones de Anglo American en todo el mundo.

La entrega del módulo de la planta de energía a Sudáfrica se ha retrasado ligeramente debido a la pandemia de COVID-19, pero NPROXX espera que el vehículo esté operativo en la segunda mitad de 2021 y se anticipan extensas pruebas en terreno, entre 2022-2023.

2.4.4.2. Grupo Weichai

La minera de origen chino, junto a CRCC Yongji y Ballard Power Systems presentaron el prototipo de camión minero de 200 Toneladas, que funciona con un sistema híbrido de baterías de litio e Hidrógeno a fines del año 2019. El vehículo cuenta con 4 celdas de combustibles de 85(kW) cada una, lo que generaría una potencia de 340 (kW), valores que según la empresa son todavía bajos, en comparación de los 800 (kW) que necesitarían para un operación minera, aunque se espera que a futuro estos valores puedan aumentar y así poder entra en la fase de producción de más camiones.

Se esperaba que el camión entra en fase de pruebas mineras en el año 2021, pero no se encuentra más información del estado actual del proyecto.

2.4.4.3. CORFO-HYDRA

La agencia chilena CORFO, junto al consorcio HYDRA se encuentran desarrollando un proyecto que involucra la construcción de camiones mineros impulsados por sistemas híbridos de pilas de Hidrógenos y baterías de litio. Se ha construido un prototipo con potencias de 60 (kW) para la pila y 140 (kWh) para la batería.

Actualmente el proyecto está en la fase de estudios de viabilidad ingenieril, se espera que en los próximos semestres se pueda implementar los prototipos en terreno y que para 2023 se pueda convertir un camión con funcionamiento en base a Diesel en uno híbrido, luego en 2025 con el uso de las plantas productoras de Hidrógeno verde que se esperan instalar en el país, se pueda convertir toda una flota de una mina en específico, lo que permitiría acercarse a cumplir el objetivo de la descarbonización [10].

2.4.5. Prefactibilidad técnica y económica

En el año 2020 se ha realizado un estudio de prefactibilidad del uso camiones híbridos con de celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) en grandes camiones mineros [11], en el cual se ha comparado la adopción tecnológica en el año 2020 y en el 2030, a partir de este se detallan las principales conclusiones presentadas de este estudio.

- Los costos de una flota de CAEX reacondicionados y la misma flota de camiones sin reacondicionar, presentan una diferencia económica significativa entre ellos para el 2020. La diferencia radica en los altos costos actuales de la tecnología PEMFC. Sin embargo, se espera que el costo de compra de PEMFC disminuya continuamente hasta 2030.
- El costo de producción actual de H_2 causa un impacto importante en los costos operativos. En Chile, el costo de producir H_2 renovable a partir de la electrólisis del agua varía de 5 a 6 USD / kg H_2 . Si se cumplen las proyecciones de la AIE, cuando el costo de producción de H_2 renovable en Chile alcance los 2 USD / kg, el uso de H_2 como combustible será económicamente competitivo con el uso de Diesel.
- El estudio de prefactibilidad reveló que es técnica y económicamente más viable invertir en CAEX minero modernizado con H_2 PEMFC y batería de iones de litio en 2030 y no en 2020. Para el escenario 2020, es económicamente más viable invertir en CAEX convencional equipado con motor de combustión interna alimentado con Diesel en lugar de camiones equipados con batería y tecnología H_2 . Sin embargo, para los escenarios de 2020 y 2030, la tecnología H_2 es técnicamente más viable que el motor diésel, debido a las mayores eficiencias actuales y proyectadas de las celdas de combustible, en comparación con los motores diésel (ver figura 2.10).

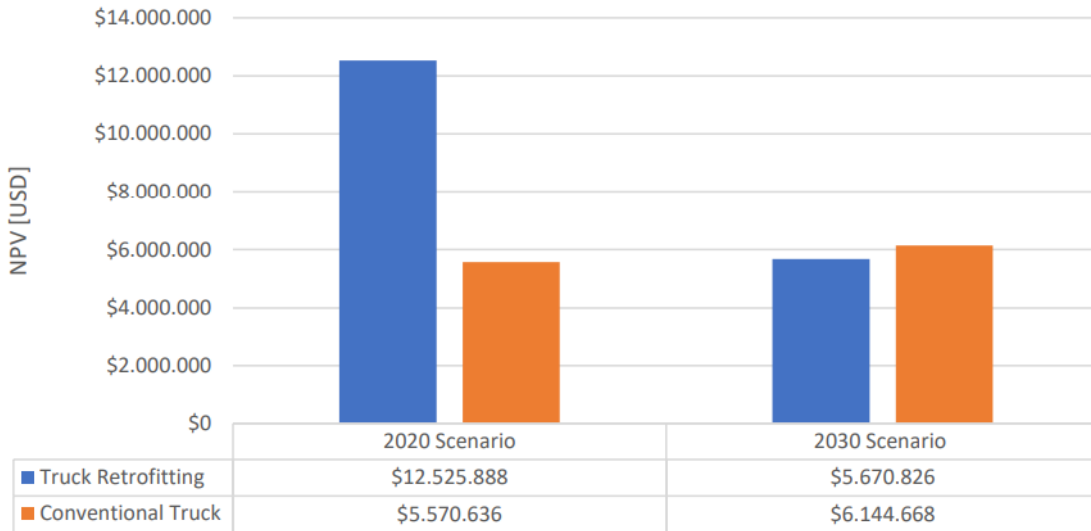


Figura 2.10: VAN para reacondicionamiento de camiones y cajas de camiones convencionales, para cada escenario de inversión potencial [11].

2.4.6. Hoja de Ruta

AMSA elabora una hoja de ruta (figura 2.11) para abordar el problema latente generado por su contaminación, cumpliendo su visión de ser una empresa proactiva e innovadora en los ámbitos económico, social y ambiental. Dado esto, la minera decide incorporar e invertir en las tecnologías de generación de energía a partir de hidrógeno, tecnologías que se alinean con su visión.

Grandes compañías han comenzado a desarrollar las aplicaciones de hidrógeno en camiones pesados de minería (sección 2.4.4), abriendo el mercado y generando la oportunidad de posicionarse como uno de los principales impulsores de esta tecnología. El estudio de pre-factibilidad técnica y económica (sección 2.4.5), señala que la incorporación de las celdas de combustible será una opción rentable y competitiva para el 2030.

La planificación esta en función de cumplir con los planes de eficiencia energética y de carbono neutralidad desarrollados por parte del gobierno de Chile [12] [13].

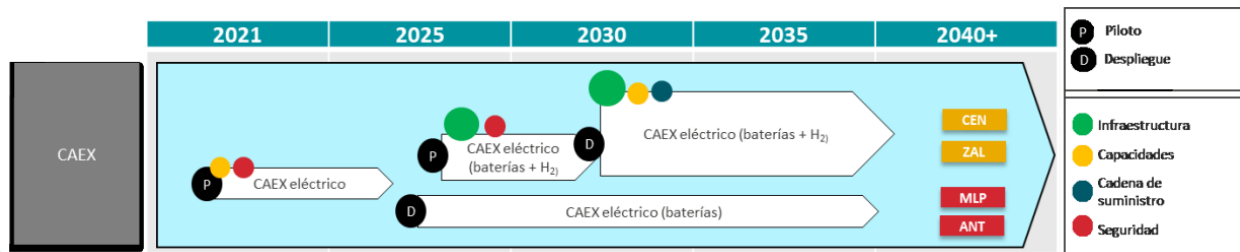


Figura 2.11: Hoja de ruta para camiones CAEX de AMSA.

2.5. Celdas de combustible

Las celdas de combustible (FC) son dispositivos utilizados para aprovechar la energía de un combustible para producir electricidad a partir de una reacción electroquímica. En comparación con los motores de combustión que funcionan quemando el combustible, las FC convierten la energía del combustible en energía mecánica, que posteriormente se puede transformar en energía eléctrica.

Dentro de las clasificaciones de las celdas de combustible, la principal se basa en los reactantes utilizados, en particular el combustible. Entre los combustibles más utilizados se encuentran el Hidrógeno, el Metano, el Metanol y el Monóxido de Carbono. Para las FC que utilizan hidrógeno como combustible, se suele utilizar Oxígeno para completar la reacción electroquímica, dado que se encuentra de forma natural en el aire.

Aunque el Hidrógeno también puede ser utilizado como combustible para motores de combustión, en las celdas de combustible tiene la ventaja de una mayor eficiencia, esto se consigue gracias a su principio de funcionamiento, que consiste en disociar una molécula de hidrógeno (H_2), liberando un par de electrones que viajan de un lado para el otro de la pila generando la corriente eléctrica (ecuación 2.1), luego los átomos de Hidrógeno se asocian con Oxígeno para formar agua (H_2O) como remanente (ecuación 2.2).

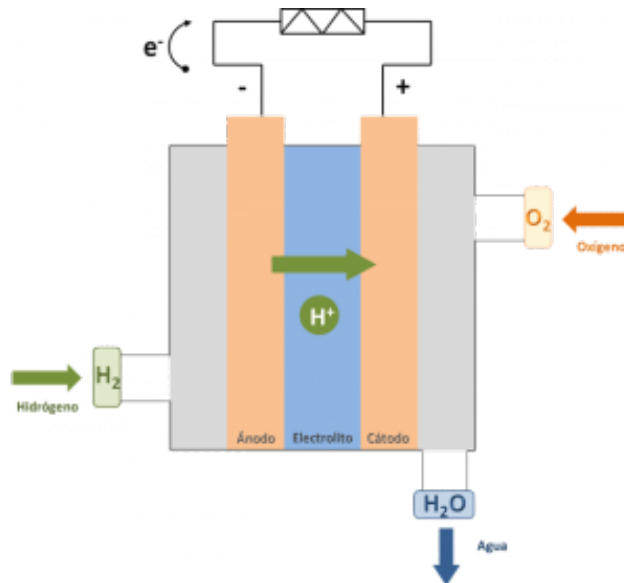


Figura 2.12: Diagrama del principio de funcionamiento de celda de combustible con Hidrógeno como combustible.

La ecuación 2.1 representa la reacción de oxidación del Hidrógeno que ocurre en el ánodo, mientras que la ecuación 2.2 muestra la reacción de reducción del Oxígeno con la formación de agua en el cátodo. Durante la edición de hidrógeno se liberan dos electrones que se hacen pasar por un circuito para la producción de electricidad, mientras los iones de hidrógeno se transportan a través de un electrolito. Finalmente, los electrones e iones de hidrógeno llegan al cátodo, donde reaccionan con el oxígeno y forman agua (figura 2.12).

2.5.1. Tipos de FC a partir de Hidrógeno

Como se menciona anteriormente, existen diferentes maneras de clasificar la celdas de combustible como son: el material utilizado para su fabricación, el rango de potencia que producen, hasta el tipo de combustible que usan. A continuación, se detallan los tipos de celdas de combustible que utilizan hidrógeno como combustible, clasificadas en función al electrolito que utilizan.

- Alcalina (AFC): Este tipo de celdas, utilizan una membrana alcalina para dejar pasar los protones del combustible, esta solución alcalina es susceptible de contaminación por dióxido de carbono (CO_2) con facilidad. Debido a esto, sólo se puede emplear oxígeno puro, o por lo menos aire purificado. Es una de las celdas más desarrolladas tecnológicamente, alcanzando una efectividad de las más elevadas en este tipo de tecnologías, llegando a alcanzar un rendimiento del 70 %.
- Ácido fosfórico (PAFC): Utilizada para producción estacionaria y raramente como alimentación principal de vehículos pesados, este tipo de celda es relativamente nueva, tienen un costo mayor debido a las cantidades altas de platino que se deben utilizar en los catalizadores de la misma. Cabe destacar que son bastante pesadas en relación a su potencia debido a la baja eficiencia que tienen. Este tipo de celda es el más desarrollado comercialmente y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y varias terminales aeroportuarias.
- Membrada de intercambio protónico (PEMFC): utilizada en aplicaciones donde se necesite una densidad de potencia alta. Este tipo de celdas de combustible se caracterizan por trabajar a bajas temperaturas, ser robustas y eficientes. Utilizadas en el mercado de transporte por sus características, esta celda es la propuesta para el presente trabajo de título (sección 2.5.2).
- Carbonato fundido (MCFC): operan a altas temperaturas, lo que las hace compatibles con ciclos de cogeneración y las eximen de necesitar catalizadores de metales nobles (platino). Esta característica hace posible obtener unas eficiencias de hasta un 85 %. Ya que funcionan a altas temperaturas no necesitan de tecnologías para reformar componentes de combustibles (gas natural, biogás) en Hidrógeno, lo que reduce su costo y su complejidad. Por ello también pueden funcionar con metano. Se encuentran en desarrollo para aplicaciones en centrales eléctricas, militares e industriales.
- Óxido sólido (SOFC): al igual que las celdas de carbonato fundido, estas operan a altas temperaturas, hasta unos 1000 °C. No necesitan catalizadores de metales nobles, y pueden reformar componentes de combustibles en hidrógeno como en las MCFC. Están siendo desarrolladas para uso en centrales eléctricas con gas natural y biogás. Es la

más versátil en cuanto a combustibles, ya que puede funcionar con hidrógeno, metano y metanol. La mayor desventaja de este tipo de celdas es la degradación de componentes en la misma debido a las altas temperaturas de operación.

Tabla 2.5: Tabla comparativa entre diferentes tipos de celdas de combustible.

Tipo de pila	Electrolito	Catalizador	Temperatura de Operacion (°C)	Potencia	Eficiencia eléctrica (%)
PEMFC	Polimero Solido	Platino	80-95	0,1 - 100 (KW)	40 - 60 (pila) 30 - 50 (sistema)
AFC	Solucion de Hidroxido de Potasio en Agua	Metales no preciosos	105-245	10 - 100 (KW)	60 - 70 (pila) 62 (sistema)
PAFC	Acido Fosforico Liquido	Platino sobre base de carbono	180-205	>10 (MW)	55 (pila) 36 - 42 (sistema)
SOFC	Solido Ceramico	Material de los electrodos (no Platino)	800-1000	>100 (KW)	60 - 65 (pila) 50 - 60 (sistema)
MCFC	Carbonatos Alcalino sobre una matriz	Material de los electrodos (no Platino)	650	100 (W)	50 - 60 (pila) 47 (sistema)

2.5.2. Celda de Combustible de Membrada de intercambio protónico (PEMFC)

La celda de combustible de membrana de intercambio protónico, PEM por sus siglas en inglés (Proton Exchange Membrane) se caracteriza por ser uno de los tipos más versátiles entre los tipos de celdas de combustible. Pueden encontrarse en un rango de bajas a altas potencias, poseen altas eficiencias, altas densidades de potencia y una alta durabilidad que las hacen perfectas para una gran serie de aplicaciones [14].

Como su nombre lo indica, emplea una membrana que solo permite pasar protones a través de ella, desde el ánodo hacia el cátodo. Las membranas que se suelen utilizar como electrolito se basan en un polímero sulfonado llamado politetrafluoroetileno (PTFE), y se encuentran en el mercado de las celdas de combustible con el nombre NAFION [15].

Las PEMFC trabajan a bajas temperaturas, entre un rango de 50 °C a 120 °C, lo que presenta una ventaja notable en términos de durabilidad y en aplicaciones donde el tiempo de puesta en operación tenga que ser rápido. Sin embargo, la razón principal por la cual trabajan a bajas temperaturas es debido al electrolito, al ser una membrana protónica, necesita de estar hidratada para que su conductividad iónica sea suficiente para dejar circular protones, haciendo que las temperaturas de operación estén por debajo de los 100 °C para evitar problemas de deshidratación de la membrana, y con ello pérdidas en la conductividad.

Debido a tales características, estas celdas son utilizadas en los sectores de transporte, producción estacionaria, y en el sector portátil. En el sector de transporte son utilizadas en autobuses, automóviles, camiones y vehículos pequeños. Debido a la evolución de las tecnologías verdes en los últimos años, el interés por desarrollar las mismas en el sector del transporte ha ido aumentando.

En cuanto a combustible, este tipo de celda puede funcionar con dos tipos de combustible: Hidrógeno puro ((H_2O)) o metanol [CH_3OH]. En el sector del transporte se utiliza hidrógeno puro, dejando el metanol para otras aplicaciones, debido a las bajas eficiencias que derivan de su uso (las PEMFC con metanol se utilizan en el sector portátil por el fácil manejo de este combustible).

2.5.3. Pilas PEMFC

Este trabajo se centra en las pilas de hidrógeno y más concretamente en las denominadas Pilas (PEMFC). Las Pilas PEMFC son equipos de generación de energía eléctrica constituidos por unidades de PEMFC conectadas.

Un módulo de PEMFC consta de una pila (varias unidades de PEMFC), una unidad de suministro de hidrógeno, una unidad de suministro de aire y una unidad de refrigeración, En la figura 2.13 se muestra un diagrama esquemático de un módulo PEMFC.

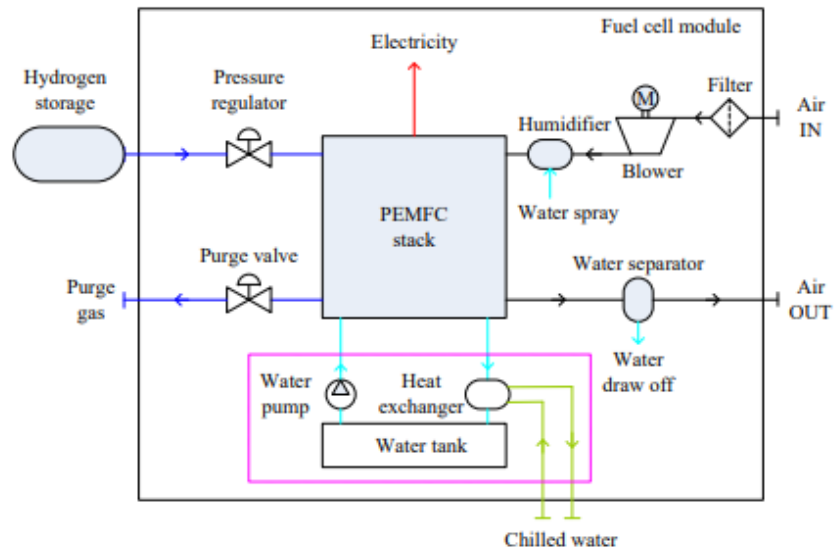


Figura 2.13: Diagrama esquemático de un módulo PEMFC (célula de combustible de membrana de intercambio de protones).

El hidrógeno está contenido dentro del tanque de almacenamiento en estado licuado criogénico o en estado comprimido con una presión de 350–700 bar. La presión de hidrógeno está regulada por el regulador de presión. Después de la pila de celdas de combustible, una válvula de purga en la salida de la cámara del ánodo se abre periódicamente para evitar que el voltaje de la celda disminuya por debajo de cierto límite [16].

Se puede instalar un humidificador y un separador de agua antes del regulador de presión y después de la válvula de purga, para humidificar el hidrógeno y eliminar el agua del gas de purga respectivamente [16]. Además, los componentes auxiliares entre la entrada y la salida de combustible de la chimenea podrían emplearse para la recirculación de hidrógeno [17]. El aire filtrado es presurizado por un soplador de aire y luego humidificado para mantener el desempeño de la membrana de polímero dentro de las celdas de combustible. El agua del aire residual se separa mediante un condensador antes de descargarse al exterior del módulo. El calor generado por la chimenea es evacuado por un módulo de refrigeración, que consta de un depósito de agua, una bomba de agua y un intercambiador de calor. La temperatura del agua de enfriamiento en la entrada de la chimenea se controla ajustando el flujo de agua enfriada y en la salida de la chimenea se regula ajustando el flujo de agua de enfriamiento a través de la chimenea [16].

2.5.4. Fabricantes de pilas PEMFC

2.5.4.1. Horizon

La primera empresa de pilas de combustible autosuficiente del mundo. Independientes de la tecnología y centrados en el comercio, su ambición es lograr objetivos de descarbonización sostenible sin depender de subsidios gubernamentales, creando la primera y única empresa de pilas de combustible rentable del mundo.

La celda mas potente que tienen dentro del mercado es la VL 30-100. Ofrece una alta densidad de potencia, con una fácil integración, el VL 30 a VL100 se puede usar fácilmente en automóviles, autobuses, automóviles de pasajeros y vehículos de logística. Los VL 30 a VL100 también son adecuados para la generación de energía estacionaria.

2.5.4.2. Ballard

El proveedor líder mundial de soluciones innovadoras de energía limpia que ofrece un rendimiento superior a un costo operativo reducido. Los módulos motrices de Ballard para vehículos pesados lideran la industria de celdas de combustible en rendimiento, durabilidad, costo del ciclo de vida y experiencia general en carretera.

Con una potencia neta de 50kW a 100kW, los módulos de servicio pesado de Ballard brindan soluciones flexibles para sus aplicaciones móviles, incluidos autobuses, camiones y trenes ligeros.

La línea de FCmove™, es la plataforma más reciente para módulos de potencia de servicio pesado basada en la pila FCgen®-LCS, es la culminación de más de 8 generaciones de desarrollo de productos en Ballard. La plataforma FCmove™ ofrece una solución de energía de celda de combustible compacta, totalmente integrada y robusta con un bajo costo total del ciclo de vida. Está disponible con versiones de 70kW y 100kW. Los productos FCmove™ están diseñados específicamente para una fácil integración en autobuses y camiones con configuraciones tanto de techo como de bahía de motor.

2.5.5. Baterías de Litio

La batería de iones de litio, también denominada batería Li-Ion, es un dispositivo con dos o tres celdas de energía diseñado para el almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, junto con el poco efecto memoria que sufren, o su capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido diseñar acumuladores ligeros, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados a las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo como es la electromovilidad.



Figura 2.14: Batería de litio.

2.6. Ciclos de conducción

Los ciclos de conducción son estudios estadísticos basados en la velocidad de un vehículo, en una región determinada. Esto permite generar un perfil de velocidades en función al tiempo (Figura x), entregando una caracterización del funcionamiento del vehículo, convirtiéndolos en una herramienta muy útil para la industria automotriz.

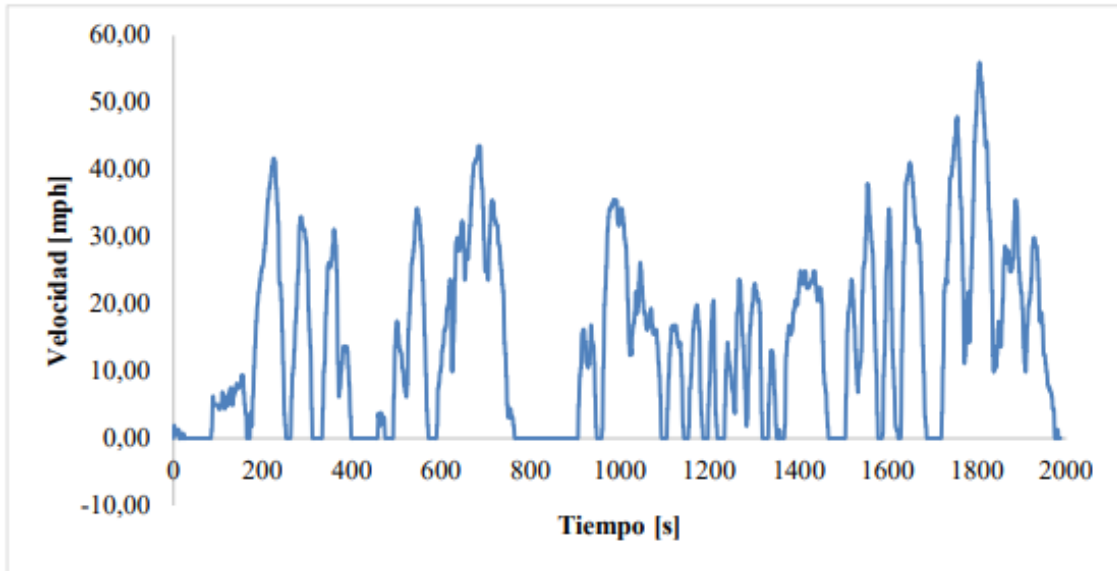


Figura 2.15: Ejemplo de ciclo de conducción.

Generalmente se puede clasificar en dos grupos, dependiendo del intervalo de tiempo y las velocidades (constantes o variables):

- Ciclos de conducción de estado estable: poseen períodos prolongados a velocidades constantes, con rampas a aceleración constante y tramos a velocidad constante.
- Ciclos de conducción transitorios: implican muchos cambios en el perfil de velocidad, es decir, son series de la velocidad del vehículo en función al tiempo, estas se obtienen de mediciones de velocidad cuando el vehículo se moviliza de un lugar a otro, representan los cambios de velocidad típicos de la conducción.

Los ciclos de conducción son usados principalmente para estimar ciertos parámetros de desempeño en vehículos, entre los parámetros más relevantes estimados se encuentran el consumo específico de combustible (SFC) y el índice de emisiones (IE) de contaminantes al ambiente. Además, a partir del estudio y análisis de los ciclos de conducción, es posible obtener nuevos diseños y homologaciones de vehículos ya existentes.

2.7. Niveles de la madurez tecnológica (TRL)

Los niveles de madurez de la tecnología, más conocidos por sus siglas inglesas TRLs: Technology Readiness Levels. Este concepto surge en la NASA pero posteriormente se generaliza para aplicarse a cualquier proyecto, desde su idea original hasta su despliegue. Más en concreto un TRL es una forma aceptada de medir el grado de madurez de una tecnología.

No se puede considerar el mismo grado o nivel de innovación el que se aborda cuando se realiza un determinado proyecto si se parte para su realización de tecnologías maduras o de tecnologías probadas con éxito en entornos reales (TRL 8 - TRL 9) y y que pueden encontrarse disponibles de forma libre o mediante licencia, que el que se aborda a partir de tecnologías que se encuentran en fase de desarrollo y validación (TRL 4 - TRL 7) o el que se aborda a partir de tecnologías que se encuentran todavía en un nivel más básico, a nivel de idea o de prueba de concepto (TRL 1 – TRL 3).

Se consideran 9 niveles que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real:

- TRL 1: Principios básicos observados y reportados
- TRL 2: Concepto y/o aplicación tecnológica formulada.
- TRL 3: Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.
- TRL 4: Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.
- TRL 5: Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.
- TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante
- TRL 7: Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.
- TRL 8: Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.
- TRL 9: Sistema probado con éxito en entorno real

Cuando se habla de entorno relevante se pretende indicar un entorno con unas condiciones que se aproximan o simulan suficientemente a las condiciones existentes en un entorno real o de misión.

Capítulo 3

Ciclo de conducción característico

El presente trabajo, plantea reacondicionar uno de los camiones CAEX de la empresa, sustituyendo algunos elementos correspondientes al tren de potencia actual, por componentes que permitan migrar a un sistema de potencia híbrido, correspondiente a un FCHEV (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle). El principal componente sustituido es el motor de combustión, que será remplazado por un sistema híbrido compuesto de un arreglo de celdas de combustible y baterías.

El camión CAEX 930E-4, cuenta con una carrocería bastante amplia, debido a su gran tamaño, esto presenta un beneficio para el diseño de sistemas de potencia, permitiendo generar una amplia gama de posibles configuraciones. Desafortunadamente, el concepto de hibridación aumenta la complejidad del diseño, este tren motriz requiere considerar más parámetros de diseño y control, restricciones, acoplamiento entre las diferentes partes, nuevos modos de funcionamiento, etc. Además, la exploración del espacio de diseño se vuelve cada vez más grande y compleja debido a las múltiples posibilidades de combinación de diseño y estrategia de gestión energética.

Existen diversas metodologías de dimensionamiento que abordan el problema. Un método sencillo es utilizar un enfoque escolástico, considerando las condiciones de operación del sistema. Con este modelo es posible obtener un primer acercamiento a los requerimientos de los componentes, generando una primera aproximación al dimensionamiento de los componentes. Otras metodologías utilizan un enfoque sistemático con optimización individual, primero realizan una optimización de tamaño (PSO), luego una estrategia de gestión de energía óptima (PMP) y finalmente una validación. Esta estrategia presenta algunas limitaciones dependiendo de la complejidad del sistema; pueden ser computacionalmente exigentes y tener una convergencia prematura a un mínimo local.

Para abordar este problema, se ha dividido este capítulo en tres partes, en primera instancia, se construye un ciclo de conducción característico para la operación de los CAEX en la minera los pelambres, el cual entrega información necesaria para realizar el dimensionamiento. Posteriormente, se calcula la potencia instantánea para el movimiento del vehículo, que se utiliza para representar la demanda energética del vehículo. Finalmente, se calculan las principales características del sistema a implementar, por medio de un modelo de enfoque sistemático con optimización individual.

3.1. Ciclo de conducción característico

Para la elaboración del ciclo de conducción característico en la operación de los camiones CAEX, se utilizan una serie de datos (velocidad instantánea, pendiente y tiempo entre mediciones) provenientes de mediciones realizadas durante las operación de camiones a lo largo del año 2021.

Producto del constante cambio en los caminos y en la estructura interna de la mina, es que las rutas van variando en función al crecimiento de la mina, es por esto, que se ha considerado elaborar un ciclo de conducción, que cuente con una ruta que represente de mejor manera las condiciones de operación dentro de la mina.

Para la selección de la ruta utilizada, se han considerado los siguientes criterios:

- Distancia promedio recorrida: Se considera una ruta que tenga una distancia entre la carga y descarga, cercana al promedio de todas las rutas.
- Frecuencia de recorridos: Se considera una ruta que sea frecuentemente utilizada.
- Tiempo en operación: Se considera una ruta que tenga una distribución de tiempos en pendiente similar al planificado (Figura 3.1).
- Pendientes: Se considera una ruta que represente de mejor manera la topografía de la mina. Los camiones se consideran en subida o bajada, cuando las pendientes son superiores o inferiores a los 6° y -6° respectivamente.

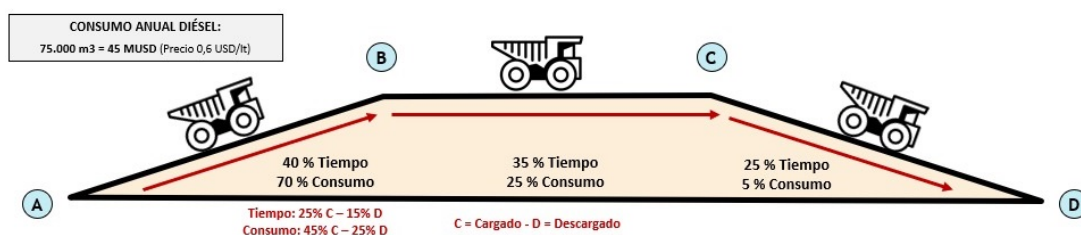


Figura 3.1: Planificación de tiempos y consumos para diferentes condiciones de operación

Se selecciona una ruta que es frecuentemente utilizada en la fase de explotación actual de la mina (Fase 9). Los detalles de la ruta son presentados en la Tabla (3.1), junto a esto, se presenta una visión en elevación de los sectores de carga y descarga (Figura 3.2).

Tabla 3.1: Características del ciclo seleccionado

Lugar de carga	F9SE
Lugar de descarga	CH-1
Distancia Promedio (km)	7,45
Tiempo Promedio (s)	3000
Tiempo entre mediciones (s)	30
Pendiente de subida ($^{\circ}$)	6
Pendiente de bajada ($^{\circ}$)	6
Carga promedio (Ton)	300

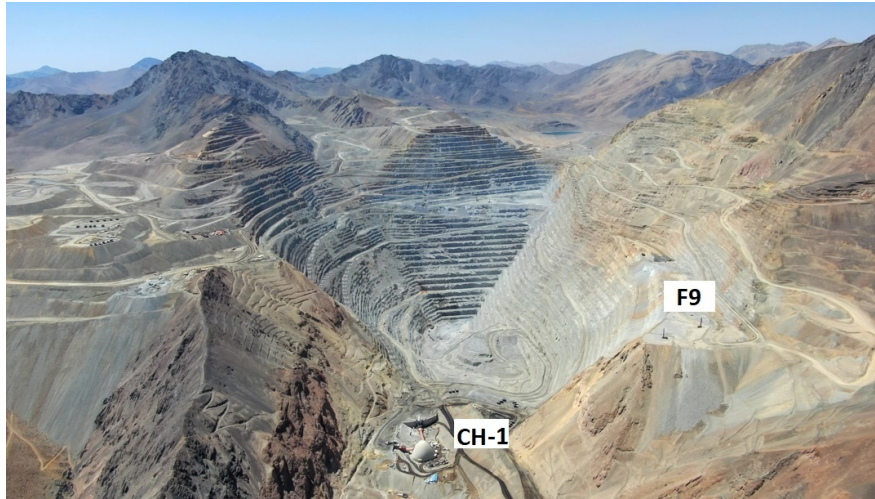


Figura 3.2: Vista superior de sectores de carga y descarga de la ruta

Para la elaboración de un ciclo, se considera que el camión arranca descargado en la zona de chancado (CH-1), luego sube hacia F9 para ser cargado y finaliza desplazándose nuevamente a CH-1 para la descarga.

Como se cuenta con una gran cantidad de viajes e información para esta ruta, se considera tomar 6 ciclos de operación, lo mas similares posible a lo esperado para esta ruta (según la figura 3.1), eliminando el ruido de los datos provenientes de las detenciones no planificadas. Finalmente con la complementación de los 6 ciclos, se obtiene el ciclo característico para la ruta (Figura 3.3).

La construcción del ciclo se elabora en un libro Excel, parametrizando el ciclo a través del tiempo y la velocidad. posteriormente se utiliza el ciclo para conocer los valores de potencia y energía necesarios para la operación, esta información es utilizada en el cálculo y diseño de los elementos del nuevo sistema de propulsión.

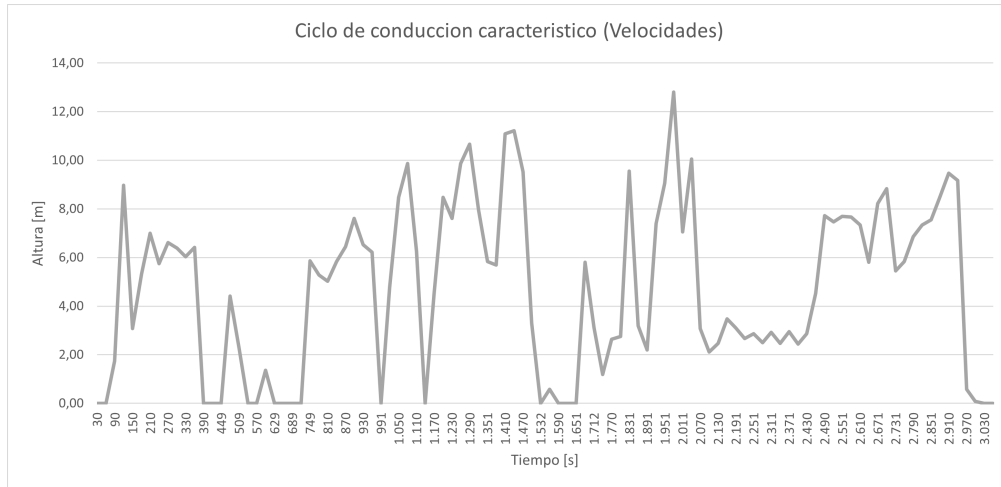


Figura 3.3: Perfil de velocidades correspondientes al ciclo de conducción característico

Se presenta el perfil de alturas en función al tiempo (Figura 3.4), perfil que muestra la variación de altura a lo largo de la ruta, verificando que durante la ruta se presentan todas las configuraciones de operación dentro de la mina (subida-descargado, planicie-descargado, bajada-descargado, subida-cargado, planicie-cargado y bajada-cargado).

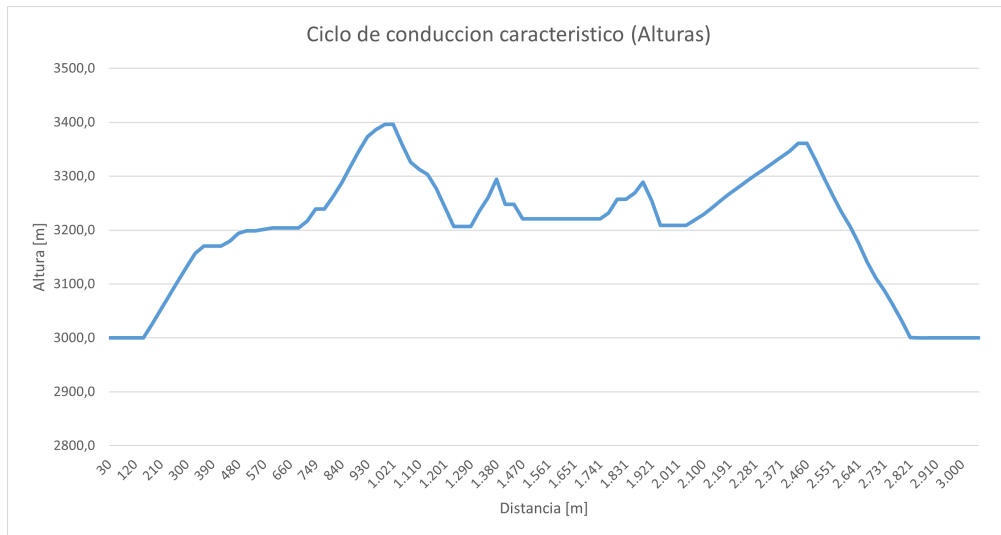


Figura 3.4: Perfil de alturas correspondientes al ciclo de conducción característico

3.2. Perfil de Potencia

Para la obtención de las especificaciones que conforman el sistema de pila de combustible-batería, se calcula la potencia en la ruedas basado en el Modelo Integral de Consumo de Energía de Vehículos Eléctricos (CPEM). La potencia será la base para el cálculo del resto de especificaciones del nuevo diseño.

La potencia, se obtiene a partir del tiempo y la velocidad del ciclo característico, junto a a serie de datos del vehículo base que se pueden localizar en la ficha técnica adjunta en el Anexo A).

Tabla 3.2: Especificaciones CAEX 930E-4

Largo (m)	15,6
Ancho (m)	8,69
Alto (m)	7,37
Superficie frontal (m^2)	64,04
Coefficiente de rodadura (%)	2
Peso (kg)	9.608
Peso con carga (kg)	320.98

3.2.1. Cálculo de potencia Instantánea

Se dispone de un conjunto de datos de tiempo y velocidad, con los cuales se obtiene la potencia que requiere el vehículo en cada instante del ciclo de conducción.

La potencia total necesaria para el movimiento del vehículo, se calcula como el producto de la velocidad por la suma de diferentes fuerzas que actúan sobre el vehículo, se puede obtener a través de la ecuación 5.3.

$$P = \frac{v}{n_t} \cdot (F_f + F_w + F_g + m_v \cdot \frac{dv}{dt}) \quad (3.1)$$

P: Potencia empleada por el vehículo

v: Velocidad

n_t : Rendimiento de la tracción

F_f : Fuerza de resistencia aerodinámica

F_w : Fuerza de resistencia a la rodadura

F_g : Fuerza de gravitatoria

m_v : Masa del vehículo

dv/dt : Variacion de velocidad

3.2.1.1. Fuerza de resistencia a la rodadura

Es la fuerza que se produce por el rozamiento del vehículo con el suelo al desplazarse a una cierta velocidad, se obtiene a partir de la ecuacion 5.2.

$$F_f = m_v \cdot g \cdot f_r \quad (3.2)$$

F_f : Fuerza de resistencia a la rodadura
 m_v : Masa del vehículo
 g : Aceleración de gravedad
 f_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura

El coeficiente de resistencia para un camión Komatsu 930E-4 se estima en un 2% (para camión cargado y vacío).

3.2.1.2. Fuerza de resistencia aerodinámica

Es la fuerza que se produce por el rozamiento del vehículo con el aire al desplazarse a una cierta velocidad, se obtiene a partir de la ecuación 5.1.

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot p \cdot A_f \cdot C_D \cdot (v + v_W)^2 \quad (3.3)$$

F_w : Fuerza de resistencia aerodinámica
 p : Densidad del aire
 A_f : Área frontal del vehículo
 C_D : Coeficiente aerodinámico
 v : Velocidad
 v_w : Velocidad del viento (Se considera igual a cero)

3.2.1.3. Fuerza gravitatoria

Es la fuerza que ejerce la tierra sobre el vehículo, esta puede positiva o negativa dependiendo del signo de la pendiente, se obtiene a partir de la ecuación 3.4.

$$F_g = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.4)$$

F_g : Fuerza de gravitatoria
 F_g : Fuerza de gravitatoria
 g : Aceleración de gravedad
 α : Ángulo de la pendiente

3.2.1.4. Cálculo de Energía consumida durante el ciclo

Para el cálculo de la energía consumida durante el ciclo, se calcula la energía consumida por unidad de distancia, para ello se utiliza la energía consumida en el ciclo entre la distancia recorrida en el ciclo (Ecuación 3.5).

$$E_l = \frac{E}{L} \quad (3.5)$$

Con la obtención de la potencia en cada instante, Se calcula la energía que consumirá el vehículo a lo largo del ciclo. Para ello se integra la potencia en función al tiempo (Ecuación 3.6).

$$E = \int_0^t P(t) \cdot dt \quad (3.6)$$

3.2.2. Resultados

A contar de todos los datos obtenidos y calculados, por medio de Excel, se obtiene la potencia instantánea para cada instante de tiempo del ciclo. De este modo podemos obtener la figura 3.5.

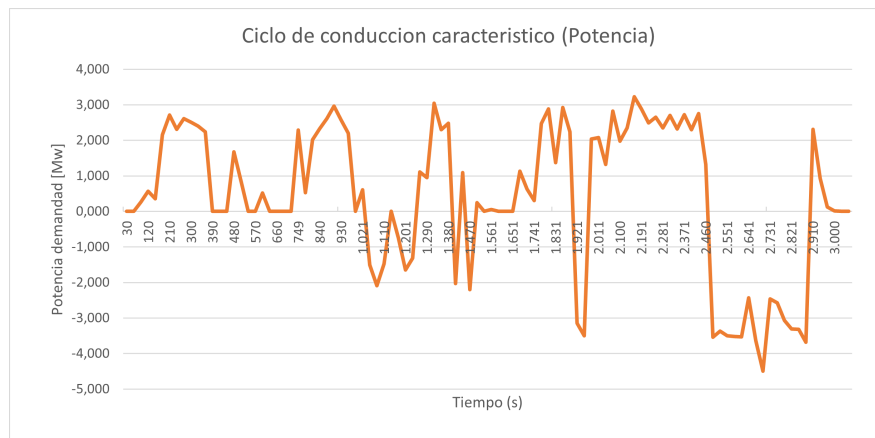


Figura 3.5: Potencia instantánea en función al ciclo de conducción

Observando la gráfica, se aprecia que existen potencias negativas durante el recorrido, esto ocurre en las partes de frenado del ciclo, usualmente con pendiente negativa. La potencia negativa, será empleada por el sistema de recuperación de energía de frenado para cargar la batería eléctrica.

Capítulo 4

Dimensionamiento y diseño del sistema PEMFC-Batería

Uno de los objetivos del diseño óptimo en sistemas de generación de energía, es determinar los principales parámetros que afectan el diseño del sistema. En tecnologías y sistemas simples, la mejor solución se puede obtener mediante un enfoque analítico directo, en otros casos más complejos, es necesario utilizar técnicas numéricas que consideren las interacciones entre los componentes del sistema. Los enfoques de optimización estándar pretenden maximizar el criterio en torno a un punto operativo específico.

Un problema de utilizar enfoques de optimización estándar para dimensionar el sistema híbrido de PEMFC-Batería, es la convergencia en mínimos locales. Para evitar la convergencia prematura y alcanzar el óptimo global, se han estudiado y desarrollado diferentes métodos iterativos directos [18] [19], como son las optimizaciones de colonias de hormigas (ACO), algoritmos genéticos (GA), optimizaciones de enjambres de partículas (PSO) y programación secuencial cuadrática (SQP).

Otro problema del diseño óptimo es el tiempo de convergencia para obtener las soluciones, el cual depende en gran medida del tamaño del espacio de búsqueda de diseño. Por lo tanto, para lograr un buen equilibrio entre el tiempo de cálculo y la precisión, se requiere un conocimiento profundo del sistema estudiado, identificando las variables más sensibles para limitar su rango dinámico.

Para una optimización más precisa en aplicaciones automotrices, se puede limitar aún más el espacio de búsqueda considerando casos de uso típicos, lo que permite proponer un diseño reducido. En este tipo de modelos, todas las variables de control instantáneas son parámetros de ajuste, obteniendo a una formulación sobredimensionada. Por el contrario, los algoritmos dedicados permiten encontrar trayectorias óptimas, los más utilizados para este tipo de aplicaciones son el Principio Mínimo de Pontryagin (PMP) [20] [21] y la programación dinámica (DP).

Los parámetros de dimensionamiento y control son altamente dependientes, por lo que se planea utilizar una metodología combinada. Dos optimizaciones son combinadas a través de dos bucles de optimización, uno interno y otro externo como se presenta en la figura (4.1).

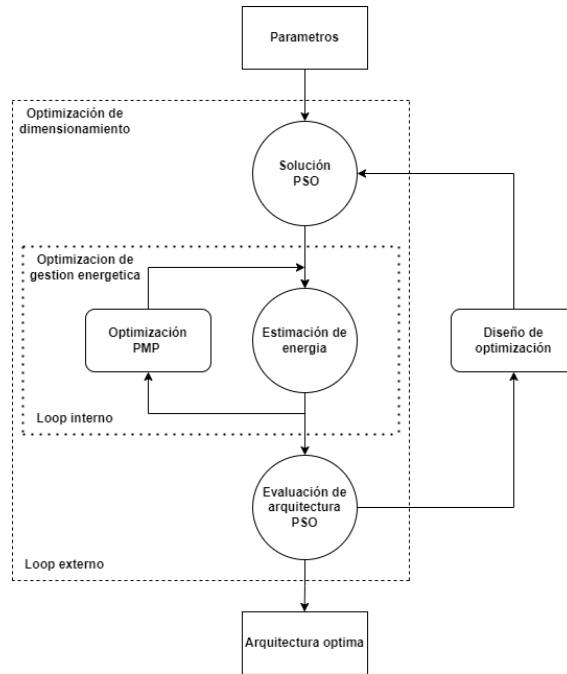


Figura 4.1: Diagrama teórico del algoritmo.

La optimización del dimensionamiento de los componentes del sistema PEMFC-Batería se realiza en el bucle externo. Para este caso, el uso de algoritmos genéricos es una buena alternativa gracias a flexibilidad y precisión. desafortunadamente son descartados para este trabajo debido a su elevada complejidad. Es por esto, que se utiliza una optimización que se adapta de mejor manera al caso de estudio, la optimización de enjambres de partículas (PSO). La simplicidad de implementación y el tiempo de cálculo reducido de la PSO, se adaptan de buena forma al caso en estudio.

Para la consideración de los parámetros de control dentro de la optimización, se introduce un criterio basado en el consumo energético. El bucle interno (figura 4.1) permite optimizar el consumo de combustible del ciclo general para cada dimensionamiento específico. Las estrategias de DP y PMP son altamente utilizadas para el control óptimo aplicado a los problemas de gestión de la energía, ambas utilizan la teoría de control óptimo para abordar los métodos de optimización global.

La técnica DP basada en el principio de optimalidad de Bellman, garantiza la solución óptima considerando todas las soluciones posibles (búsqueda exhaustiva). Por otro lado, el PMP produce una única trayectoria óptima minimizando la función de Hamilton, ventaja computacional significativa, gracias a una respuesta más rápida para el diseño de espacios grandes. Por lo que se utiliza esta ultima para diseño óptimo.

Para gestionar de forma eficiente la interacción entre bucles, cada uno intercambia información relevante. La gestión de energía (PMP) necesita el dimensionamiento de la arquitectura y las limitaciones resultantes de ella, mientras que el dimensionamiento (PSO) necesita los resultados de (PMP) para evaluar la arquitectura propuesta. Este enfoque aumenta la velocidad de convergencia y su precisión.

4.1. Descripción del sistema

El modelo híbrido de arquitectura global propuesto [22], es un arreglo energético entre el sistema de energía (PEMFC-Batería) y una carga (Motor eléctrico). La elección de la estructura se basa en trabajos previos que tratan de las posibles configuraciones de PEMFC-Batería [23]. Esta arquitectura utiliza convertidores de corriente conectado a cada fuente para regular las corrientes eléctricas, por lo tanto, es muy adecuado para un diseño y una gestión de energía óptimos en relación con sus grados de libertad.

La figura 5.3 expone la arquitectura propuesta. Los componentes sistema a destacar son:

- Pila de celdas de combustible: Fuente de energía principal, alimentada por un estanque de H_2 .
- Batería: Fuente de energía secundaria y medio de almacenamiento para la energía proveniente del freno regenerativo.
- Estanque de Hidrógeno: Suministra con combustible la pila PEMFC.
- Motor eléctrico: exige al sistema híbrido la potencia necesaria para el movimiento del vehículo.

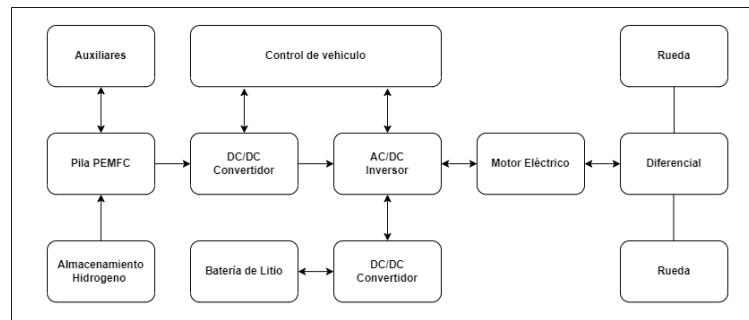


Figura 4.2: Diagrama del sistema propuesto

La figura 4.3 presenta un modelo reducido del sistema propuesto, el sistema reducido es usado para el modelado energético, donde se representan los diferentes flujos de energía, las interacciones y restricciones de los componentes. La fuente primaria es un modelo de pila FC estático basado en su eficiencia energética (sección 4.1.1). La fuente secundaria es un circuito eléctrico clásico que modela la batería (detallado en el capítulo 4.1.2). Ambas fuentes deben cumplir con la demanda energética necesaria para el movimiento del camión, representado por un ciclo de carga obtenido en la sección 3.2.

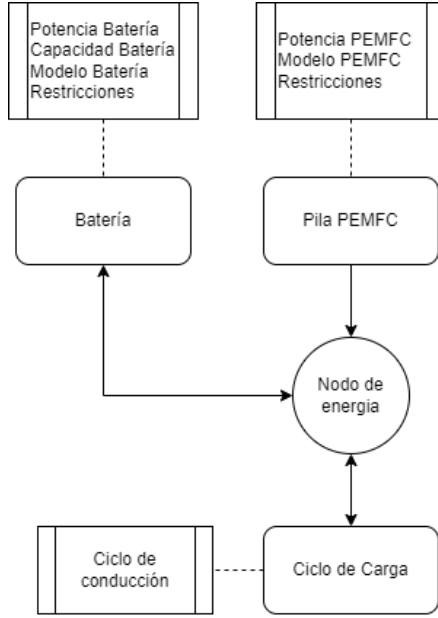


Figura 4.3: Diagrama del sistema propuesto reducido

Los modelos seleccionados son simples, pero precisos para representar los flujos de energía, aceptar una complejidad adicional puede permitir considerar fenómenos específicos, lo que aumentaría el tiempo de procedimiento. El modelo planteado permite obtener comportamientos realistas del sistema con un tiempo de cálculo aceptable (minutos / horas en lugar de días / semana).

4.1.1. Modelado de la pila de PEMFC

Se compone de varias celdas conectadas en serie y/o en paralelo para proporcionar la potencia de salida deseada (voltaje y corriente). En condiciones de baja dinámica, se puede considerar como una fuente de voltaje en serie con 3 dipolos eléctricos que representan fenómenos óhmicos, cinéticos y de transferencia de masa.

La relación entre el voltaje de la pila (V_{FC}) y la corriente de salida i_{FC} está dada por las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3. La figura 4.4 muestra el comportamiento de la eficiencia FC en función a la potencia, los valores de las constantes utilizadas son expuestos en la tabla 4.3.

$$V_{FC} = N(E_{Cel} \cdot R \cdot j_{stack} - A \cdot \ln(j_{stack} + j_1) - m \cdot \exp(n \cdot j_{stack})) \quad (4.1)$$

$$j_{stack} = \frac{I_{stack}}{A_{Cel}} \quad (4.2)$$

$$I_{stack} = \alpha + (1 + \beta)i_{FC} + \gamma(i_{FC})^2 \quad (4.3)$$

con:

A_{Cel} : área de cada celda.

N: número de celdas en la pila.

E_{Cel} : voltaje de la celda reversible.

R: resistencia específica del área de la membrana.

A: coeficiente de Tafel.

I_{stack} : Corriente de la pila.

m y n: coeficientes de la ecuación de transferencia de masa.

α , β) y γ son coeficientes de segundo orden que aproximan I_{stack} como función de la corriente de salida i_{FC} .

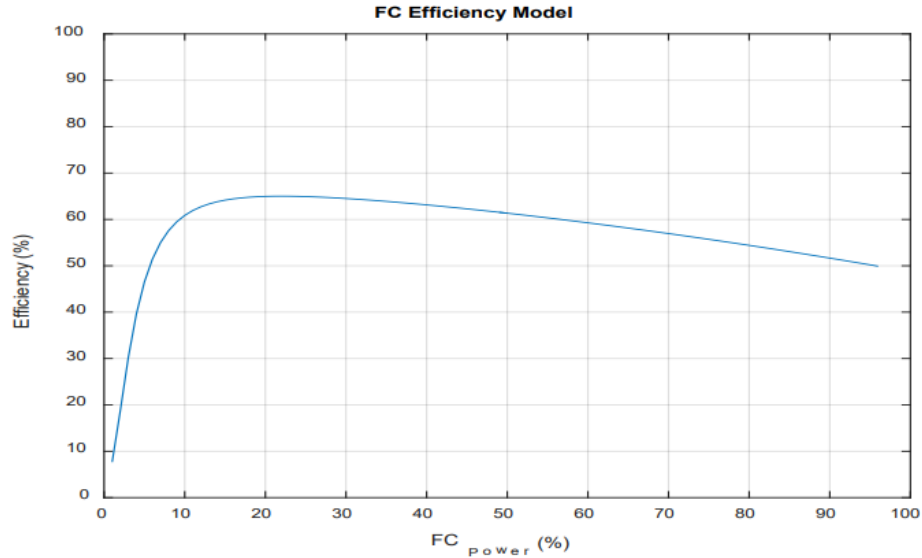


Figura 4.4: Eficiencia de la FC en función a su potencia

Tabla 4.1: Valores constantes para la FC

A	0,03	[V]
m	$2,11 \times 10^5$	[V]
n	8×10^{-3}	[cm ² /mA]
α	0,029	[-]
β	0,971	[-]
γ	-8×10^{-4}	[-]

4.1.2. Modelado de batería

Un paquete de baterías de litio es seleccionado (sección 2.5.5), se puede escalar de acuerdo con su número de celdas y sus capacitancias. Puede modelarse en una amplia gama de condiciones de funcionamiento, el modelo incluye una fuente de voltaje ideal U_{OC} (para definir el voltaje de circuito abierto de la batería), las resistencias internas y las capacitancias equivalentes (Figura 4.5). Las resistencias internas incluyen la resistencia óhmica (R_O) y la resistencia de polarización (R_P). La capacitancia equivalente (C_{Tr}) se usa para describir la respuesta transitoria durante la carga y descarga (ecuación 4.4).

$$Bateria = \begin{cases} U_{bat} = U_{oc} - U - R_0 i_{BAT} \\ \frac{dU}{dt} = -\frac{U}{R_p C_{Tr}} + \frac{i_{BAT}}{C_{Tr}} \\ SOC(t) = SOC_0 + \frac{\eta_{BAT}}{3600 \cdot C_{BAT}} \int i_{BAT} dt \\ SOE(t) = \frac{W(t)}{W_{Rated}} = \frac{SOC}{C_{BAT}} \end{cases} \quad (4.4)$$

con:

U_{BAT} : Voltaje de batería.

i_{BAT} : Corriente de batería.

C_{BAT} : Capacidad de la batería.

SOE : Estado de energía.

SOC : Estado de carga.

W : Energía nominal.

W_{Rated} : Energía almacenada real.

Tabla 4.2: Valores constantes para la Bateria

R_O	0.072	$[\Omega]$
R_P	0.021	$[\Omega]$
C_{Tr}	1214	$[F]$

A pesar de la pérdida de capacidad de MTD a lo largo del tiempo (pérdidas de calendario y pérdidas de ciclo), la eficiencia energética de MTD permanece casi constante y se fijó en el valor medio del 90 %.

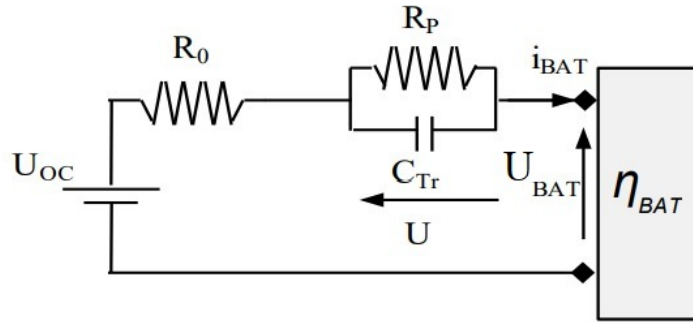


Figura 4.5: Modelo del circuito de la batería

4.2. Metodología

Para el dimensionamiento de sistema híbrido, se construye el modelo de optimización descrito en la sección 4.1. Se utiliza el programa Matlab para representar las interacciones de los componentes mediante el procedimiento descrito a continuación.

4.2.1. Problema de optimización

El proceso de optimización busca el mejor conjunto de parámetros del sistema, para lograr este resultado, tiene como objetivo minimizar una función de costo a partir de estos parámetros. En el presente caso, es el consumo de energía de la arquitectura el que obviamente está

influenciado por el ciclo de conducción (ecuación 4.5). Para realizar su evaluación global, el algoritmo prueba varios valores de los siguientes parámetros:

- PFC : Potencia FC
- PBAT : Potencia Batería
- CBAT : Capacidad Batería

Considerando la arquitectura del modelo, el balance de potencia (ecuacion 4.6 y los límites de tamaño (ecuacion 4.7).

La función de coste basada en EM optimiza el consumo al encontrar el mejor ciclo de potencia FC de la arquitectura probada teniendo en cuenta las limitaciones físicas y el dimensionamiento propuesto.

La descripción matemática de dichos problemas de optimización se puede presentar de la siguiente manera:

- Función de coste que es el criterio para minimizar: (consumo de energía)

$$J = \Sigma_{load\ Cycle} [P_{FC}(t) \cdot T_e] \quad (4.5)$$

- Modelo del sistema: (balance de energía)

$$P_{load} = \eta_{FC} \cdot P_{FC}(t) + \eta_{BAT} \cdot P_{BAT} \quad (4.6)$$

- Restricciones: (diseño)

$$\begin{aligned} P_{FCmin} &< P_{FC}(t) < P_{FCmax} \\ P_{BATmin} &< P_{BAT}(t) < P_{BATmax} \\ C_{BATmin} &< C_{BAT}(t) < C_{BATmax} \end{aligned} \quad (4.7)$$

- Restricciones: (gestión de la energía)

$$SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max} \quad (4.8)$$

Donde, J, PFC, BAT, PLoad, SOC, FC, BAT, Te y CBAT son función de costo, fuentes de energía, potencia de carga, estado de carga, convertidores de eficiencia, tiempo de muestreo, capacidad BAT. PFCmin / max, PBATmin / max, CBATmin / max y SOCmin / max son valores máximo / mínimo.

4.2.1.1. Optimización externa - Componentes de dimensionamiento de PSO

El algoritmo PSO se basa en la inteligencia de enjambre (comportamiento social de las aves), que realiza un mecanismo de búsqueda basado en el movimiento de una población (partículas N). Utiliza la aleatoriedad y el intercambio de información entre partículas para identificar la mejor posición (valores de variable óptimos).

Cada partícula es una solución potencial al problema de optimización y se representa mediante un vector de información (dimensiones M) que incluye variables de optimización (posición) y parámetros almacenados (memoria) de la siguiente manera:

$$vector_{particle} = \begin{bmatrix} Position \begin{cases} P_{FC} \\ C_{BAT} \end{cases} \\ Memory \begin{cases} Fitness(cost) \\ Particle\ best \\ Global\ best \\ speed \end{cases} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

El espacio de búsqueda está definido por variables de optimización considerando las especificaciones del usuario. La figura 4.6 representa el proceso de diseño de PSO de la optimización del tamaño utilizando los siguientes pasos.

1. Paso inicial: el algoritmo genera un enjambre de partículas; cada partícula se define por su posición y aptitud (costo de la partícula). En el paso de inicialización, el algoritmo coloca cada partícula en una posición aleatoria con una velocidad aleatoria en el campo. Permite la inicialización del vector de partículas.
2. Paso de evaluación: Luego, cada partícula se evalúa iterativamente considerando la función de costo (EM - optimización interna). Pueden ocurrir dos escenarios: si el costo real es mejor que los logrados en las iteraciones anteriores, la información se almacena (actualiza la memoria). De lo contrario, se mantienen el mejor costo y la posición anteriores (mantenga la memoria).

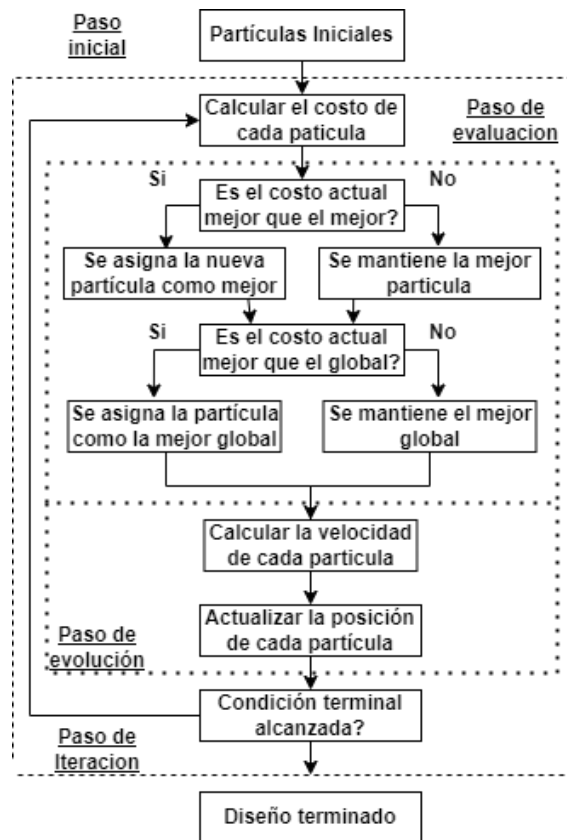


Figura 4.6: Diagrama de algoritmo de optimización de enjambre de partículas

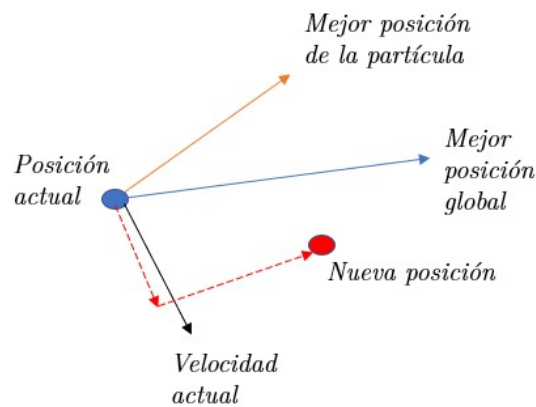


Figura 4.7: Diagrama de cálculo del vector de movimiento de cada partícula (PSO)

3. Paso de evolución: Después de la evaluación de costos, el algoritmo mueve cada partícula basándose en tres submovimientos. El principio de funcionamiento se ilustra en la figura

4.7. La partícula quiere continuar su último movimiento (Inercia), la partícula quiere volver a su mejor posición (egoísmo) y la partícula es atraída por la mejor posición conocida en este momento en el campo (comportamiento social). Cada submovimiento se pondera: el egoísmo y el comportamiento social por un coeficiente aleatorio y la inercia por un coeficiente decreciente (Damp) para permitir una amplia exploración al inicio y un apropiado comportamiento final convergente.

4. Prueba y paso iterativo: las condiciones de parada están relacionadas con el número de iteración y la generación de evolución promedio. Si se alcanzan, el algoritmo se detiene con la mejor solución actual. De lo contrario, el proceso iterativo continua.

El PSO es relevante considerando su baja complejidad (pocos parámetros de diseño) y su eficiencia (alta velocidad de convergencia, corto tiempo de cálculo y precisión) en comparación con otros métodos de optimización.

4.2.1.2. Optimización interna: restricción EM

I - Enfoque principal de Pontryagin OC

El PMP es una técnica muy poderosa en la teoría del control óptimo (OC). Permite identificar una trayectoria óptima única para el ahorro de energía minimizando la función de Hamilton. Esta solución se define utilizando las condiciones de optimalidad necesarias para que el sistema sea globalmente óptimo.

El proceso de optimización se puede resumir en un problema matemático. Consiste en minimizar el consumo de hidrógeno FC durante el ciclo de conducción. El consumo de energía total de FC refleja el consumo de hidrógeno.

El PMP requiere la definición de función hamiltoniana (H) dada por:

$$H = P_{FC} \cdot T_e - \lambda \cdot [SOE(t+1) + SOE(t)] \quad (4.10)$$

El estado de energía BAT (SOE) se selecciona como la variable de estado del sistema y se puede describir como:

$$SOE(t+1) = SOE(t) - P_{BAT} \cdot T_e \quad (4.11)$$

Minimizar la energía total de FC implica la división de potencia entre FC y BAT. La función hamiltoniana debe minimizarse en cada tiempo (t) para proporcionar la trayectoria de control óptima $u^*(t)$ dada por la potencia FC PFC. Esto permite introducir las condiciones de optimalidad necesarias de la siguiente manera:

$$u^*(t) = \operatorname{argmin} H[SOE(t), P_{FC}(t), \lambda(t)] \quad (4.12)$$

Donde (t) son las variables de optimización de co-estado (multiplicadores de Lagrange equivalentes), y se pueden calcular utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \lambda(i)} = SOE(i+1) \\ \frac{\partial H}{\partial SOE(i)} = -\lambda(i+1) \end{cases} \quad (4.13)$$

Además de las restricciones instantáneas impuestas a los componentes de potencia debido a los límites físicos (ecuaciones 6 - 9), se deben respetar los valores límite restringidos.

$$\begin{aligned} SOE_{min} < SOE(t) < SOE_{max} \\ [SOE(end) - SOE(Init)] < \epsilon \end{aligned} \quad (4.14)$$

Donde, H , PFC , BAT , Te , y SOE son la función hamiltoniana, las fuentes de energía, el tiempo de muestreo, la variación de energía admisible y el estado de la energía. SOE_{min} / \max y $SOE(End) / (Init)$ son valores máximos / mínimos y valores iniciales / finales

Además, se considera que una limitación dinámica de la potencia FC (1kW / s) aborda su dinámica lenta limitada principalmente por la respuesta de tiempo del compresor de aire.

Para un ciclo de conducción dado, la trayectoria de control óptima conduce con el conocimiento del valor inicial del co-estado (0). Esta identificación es el paso más crítico para identificar la solución de trayectoria óptima. Su diseño debe minimizar el hamiltoniano (ecuación 11) en cada momento y satisfacer la condición terminal (ecuación 16). Para ello, se utiliza un método de dicotomía para encontrar este parámetro (0) según el parámetro de ajuste ()

Como se presenta en la Tab. 2 el CO recibió algunos insumos con información útil para definir una estrategia de ME. De acuerdo con la arquitectura probada (una partícula con un tamaño), el algoritmo OC prueba en cada paso de tiempo, todos los comandos permitidos (del 0% al 100% de la potencia FC) y evalúa su aptitud considerando el criterio de consumo. La figura 4.8 presenta este algoritmo.

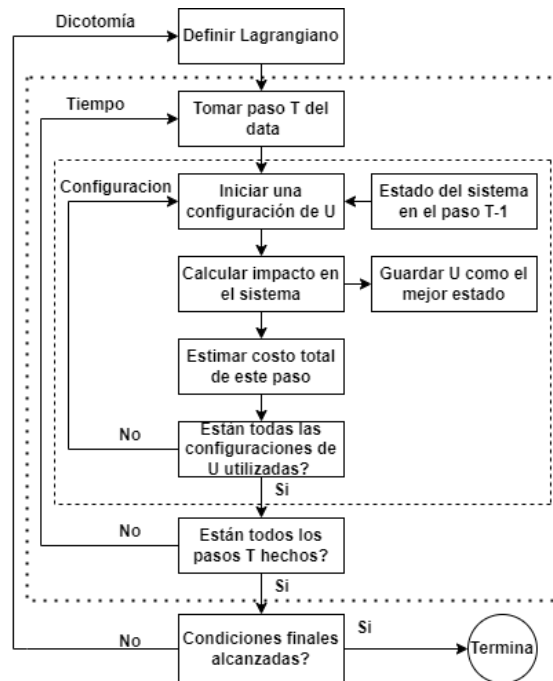


Figura 4.8: Algoritmo de control optimo

- Dicotomía: El valor inicial del co-estado (0) se define de antemano mediante un método

de dicotomía para un ciclo de conducción determinado. La variación global de SOE debe ser pequeña (ϵ), lo que permite que la misma escala estime el consumo de CF para diferentes ciclos de conducción y estrategias de gestión de la energía. La elección del parámetro (ϵ) está relacionada con la condición del terminal y afecta directamente la división de potencia entre FC y BAT.

- Ciclo de tiempo: en este ciclo, el ciclo de conducción se evalúa paso a paso para identificar cada comando óptimo. Esto implica establecer la trayectoria óptima para el ahorro de energía.
- Método de disparo: este método utiliza un proceso iterativo para evaluar todos los comandos asignados.

4.3. Resultados

Los resultados de la programación entregan que los equipos seleccionados deben cumplir con las condiciones expuestas en la tabla 4.3: Se requiere una pila de combustible que entre

Tabla 4.3: Resultados de optimización

P_{FC}	217	[kw]
P_{Bat}	580	[kw]
C_{Bat}	200	[kwh]

un total de 217 kW, por lo que se plantea utilizar 4 pilas de celda de combustible de 70 kw conectadas, suponiendo que estas pueden entregar el total de la energía sin perder eficiencia en la conexión. Es por esto que se postula la utilización de 4 pilas modelo Ballard's FCmove™-HD (Anexo B). Para el caso de la batería se requiere un batería que tenga una potencia de 580 kw y una capacidad de 200 kwh.

Capítulo 5

Diseño de Pruebas Piloto

Para habilitar e implementar una nueva tecnología que se encuentra actualmente en desarrollo, se debe realizar una serie de procedimientos previos, con el fin de validar su madurez tecnológica, así garantizar una implementación exitosa de la tecnología.

Actualmente los sistemas híbridos de pilas de combustibles con baterías como fuente de energía para camiones mineros pesados han sido escasamente probados y aplicados (sección 2.4.4). Según el Sernageomin, el nivel de madurez tecnológica (TRL) de las celdas de combustible aplicadas como fuente de energía en camiones mineros es de 6, por lo que aún es necesario desarrollar y validar la tecnología en entornos reales para su implementación.

El objetivo de esta prueba piloto es demostrar el funcionamiento de un sistema de potencia híbrido, verificando su correcto funcionamiento en condiciones de operación reales, para hacer esto, se plantea primero validar el correcto funcionamiento de las celdas por si solas, para luego incorporar el sistema de potencia a un prototipo del tren de potencia, que permita realizar pruebas de funcionamiento.

Se proponen y detallan una serie de pruebas a las que deberá ser sometido el prototipo, para así verificar que un nuevo sistema cumple con las demandas de potencia a las que están sometidos los trenes de potencia actuales, todo esto considerando las condiciones reales de operación de la mina, sometiendo el prototipo a los elevados niveles de polvo y las condiciones climáticas desfavorables de la mina.

Durante el año 2021 el Sernageomin a desarrollado una guía que recibe por nombre implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería"[24]. Esta guía es utilizada como referencia al momento de diseñar la prueba piloto, con el fin de que las pruebas cumplan con los diferentes requisitos solicitados por el ministerio de minería.

5.1. Descripción General

Actualmente algunos prototipos de sistemas de potencia híbridos (PEMFC-Baterías) diseñados para ser utilizados en camiones CAEX, están siendo probados y validados en entornos relevantes (TRL 6) (sección 2.4.4), por lo que según la planificación del gobierno, se planea que durante los próximos semestres sera necesario realizar pruebas piloto en entornos reales, para proceder con la implementación de la tecnología.

Es por esto que se plantea una serie de pruebas piloto con el objetivo de demostrar el correcto funcionamiento del prototipo del sistema de generación de potencia compuesto por las pilas de combustible y batería seleccionada (sección 4.3), en un entorno real, en las condiciones de operación de la misma mina.

Debido a que las celdas de combustible no han sido probadas en las condiciones de operación de MLP, en primera instancia se plantea la realización de una serie de pruebas para verificar el correcto funcionamiento de las pilas, evaluando y contrastando los resultados con lo esperado por el fabricante, para esto se utiliza un banco de pruebas diseñado para validar el correcto funcionamiento de las celdas.

Posterior a las primeras pruebas sobre la celda, se realizan pruebas sobre el sistema PEMFC-Batería, incorporando mas elementos al banco de prueba, para representar de mejor forma el funcionamiento dentro del camión minero.

Las pruebas se realizan dentro del edificio de mantención de camiones CAEX, dentro de la mina, cercano a la ruta por donde se encuentran trabajando lo camiones. Se requiere de un Jefe de proyecto, un ingeniero de proyectos, un asesor de prevención de riesgo, un administrador de contratos y un experto técnico.

5.1.1. Objetivos

Objetivo General

- Demostrar el correcto funcionamiento de un sistema de potencia híbrido diseñado para camiones CAEX, en las condiciones de operación reales de la MLP.

Objetivos Específicos

- Validar el correcto funcionamiento de la celda de combustible según lo notificado por el fabricante, en condiciones de operación de la minera.
- Validar el funcionamiento del sistema la celda de combustible y la batería en las condiciones de operación de la mina, para cumplir con el ciclo de operación propuesto.

5.1.2. Alcance

- La pruebas han sido diseñadas para validar un sistema híbrido (PEMFC-Baterías) general, por lo que, de no contar con las tecnologías propuestas en la sección (4.3, es posible

aplicar este procedimiento a otro sistema similar.

- Para la realización de este piloto se requiere un sistema que haya alcanzado un nivel de madurez tecnológico importante (TRL 6), con el fin disminuir la posibilidad de que el sistema no cumpla con las pruebas, además de contar con información importante con la cual complementar este trabajo.
- Se espera que las pruebas de este piloto puedan demostrar el sistema en un entorno real (TRL 7).
- Las pruebas se dividen en dos grupos, agrupados por el sistema involucrado de cada uno de estos:
 - Pruebas de funcionamiento pila PEMFC.
 - Pruebas de funcionamiento sistema PEMFC-Batería
- Las pruebas de celdas de combustible siguen las especificaciones de prueba elaboradas por el Centro de desarrollo de la industria de equipos del ministerio de industria y tecnología de la información de China.[25].
- Las pruebas de eficiencia de las celdas de combustible siguen las especificaciones de pruebas elaboradas por Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH) de la unión europea.[26].
- Con el fin de que el piloto cumpla con los diferentes requisitos solicitados por el ministerio, debido a que no se ha desarrollado una regulación nacional específica, se deben adoptar otras normas, códigos o prácticas en la evaluación de estos, los que se describen en la guía de implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible [24].
- Las pruebas deben realizarse en un espacio diseñado para contener los equipos necesarios, este lugar debe contar con las medidas de seguridad pertinentes para el trabajo con hidrógeno [24]. La ubicación debe ser lo mas cercana posible al lugar por donde transitan los camiones, de modo de poder captar y utilizar los mismos niveles de humedad, polvo y concentración de oxígeno en el aire.
- Se utilizara hidrógeno verde proveniente del proceso de la electrolisis de energías renovables.

5.1.3. Responsabilidades

- Jefe de Proyecto: Es responsable que este procedimiento sea aprobado, difundido, conocido y aplicado por el personal involucrado en la prueba. Provee los recursos necesarios para el cumplimiento de este procedimiento y apoyar guiando a los miembros del equipo para el correcto desempeño de los objetivos asociados a la validación.
- Ingeniero de proyectos: Conocer, aplicar y difundir este procedimiento a todo el personal involucrado en las actividades de pilotaje. Apoyar, gestionar y supervisar la prueba de pilotaje.

- Asesor de prevención de riesgo: Asesorar y recomendar en el cumplimiento de normativas vigentes y programas de seguridad y salud. Identificar riesgos y establecer controles críticos en las actividades desarrolladas.
- Administrador de contrato: Gestionar los recursos involucrados en la operación de la prueba piloto y velar por el cumplimiento de los hitos del proyecto.
- Experto técnico: Revisar este procedimiento para mantenerlo vigente de manera que sea consistente con las innovaciones tecnológicas y/o cambios operacionales que tenga el proceso. Verificar que la tecnología esté en óptimas condiciones para el desarrollo de la prueba y levantar alerta sobre componentes y/o desviaciones del funcionamiento.

5.1.4. Planificación para pruebas piloto

Para la planificación de los plazos para la elaboración de las pruebas pilotos descritas, se plantea el cumplimiento de ciertos hitos.

- Se espera que las pruebas sean programadas dentro de los plazos diseñados por la hoja de ruta de AMSA (figura 2.11), por lo que las pruebas descritas deben realizarse antes del 2025, donde se pretende aumentar el grado de madurez tecnológica, realizando pruebas sistemáticas en los camiones.
- Para la realización de las pruebas es necesario que la madurez tecnológica de los sistemas híbridos de PEMFC y Baterías haya alcanzado un nivel de 6.
- Previo al desarrollo de las pruebas es necesario contar con todos los equipos y componentes descrito en este capítulo, por lo que es necesario considerar los tiempos para contar con estas tecnologías.
- Se espera poder completar las pruebas en un plazo de 4 a 6 meses, donde se tiene como referencia otros proyectos realizados de la misma envergadura.

5.1.5. Ubicación y condiciones climáticas

El proyecto se realizara en la cuarta Región de Coquimbo, en la comuna de Salamanca (ver figura 5.1), dentro de la sala de mantenimiento, en las inmediaciones de la mina, ubicada dentro de la minera los pelambres a 3.000 metros sobre el nivel del mar ($31^{\circ}44'10.3''S$ $70^{\circ}29'31.8''W$, marcado en rojo en la figura 5.2).

La mina al estar ubicada en la mitad de la cordillera de Los andes, se encuentra sometida a un clima adverso, con una temperatura promedio de $2,5^{\circ}C$, durante el año se alcanzan temperaturas máximas de $28,5^{\circ}C$ y mínimas de $-18,3^{\circ}C$. En la mina se prestan un promedio de 0.3 mm de precipitaciones anuales, con un máximo de 76,4 mm en invierno y un mínimo 0,0 mm en verano. Es importante destacar que en invierno la mina ocasionalmente se cubre de nieve.

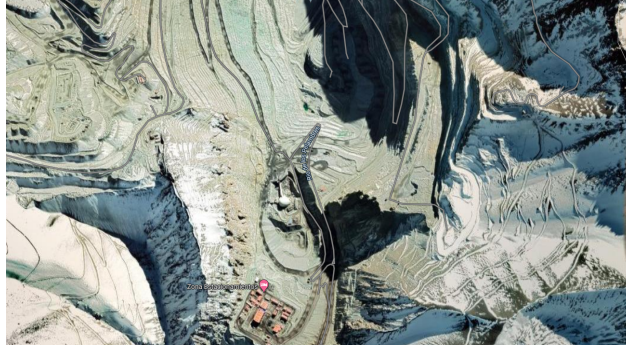


Figura 5.1: Minera los Pelambres



Figura 5.2: Edificio de mantenciones Komatsu - Minera los pelambres

5.2. Consideraciones Normativas

En esta sección se presentan las normas técnicas nacionales e internacionales en las que se basa el diseño, construcción y operación de las instalaciones del proyecto y que serán utilizadas para respaldar los estándares de seguridad del proyecto.

5.2.1. Documentos

5.2.1.1. Equipos

- Especificaciones técnicas PEMFC modelo Ballard's FCmove™-HD (Anexo B)
- Especificaciones técnicas Batería.
- Especificaciones técnicas Motor eléctrico GDY-106 .
- Especificaciones técnicas Alternador G.E Modelo GTA-26.

5.2.1.2. Pruebas y operación

- Reglamento (CE) 79/2009
- Reglamento CEPE 134
- GTR13-ECE/TRANS/180/Add.13/ 2013
- IEC 62282 Fuel cell technologies
- NFPA 2 cap. 14-15-16-17-18
- NFPA 2 cap. 10-11-12
- SAE J2579 Standard for Fuel Systems in Fuel Cell

5.2.1.3. Seguridad

- Minera Los Pelambres – AMSA: Procedimiento prevención y actuación COVID19.
- Ley N° 16744. Seguro Social contra accidentes del trabajo y enfermedades profesionales.
- D.S. N° 40. Sobre prevención de riesgos profesionales.
- D.S. 594 Condiciones sanitarias y ambientales básicas de los lugares de trabajo.

5.2.1.4. Complementarios

- Implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería.
- ISO 15916 Basic consideration for the safety of hydrogen systems

5.2.1.5. Estándares informativos

- CGA G-5- 2017 Hydrogen
- CGA G-5.3 Commodity Specification for Hydrogen
- CGA H-4 Terminology Associated with Hydrogen Fuel Technologies
- CGA P-28 OSHA Process Safety Management and EPA Risk Management Plan Guidance Document for Bulk Liquid Hydrogen Systems
- ISO/TR 15916 Basic considerations for the safety of hydrogen systems

5.3. Pruebas para sistema de pila PEMFC

5.3.1. Equipos y componentes

A continuación se presentan los equipos y componentes necesarios para realizar las pruebas. No se mencionan equipos y elementos menores como soportes integrales, líneas de conexión, valvulas, tuberías y sistemas de apoyo.

5.3.1.1. Instrumentos de medición

- Medidor de voltaje
- Medidor de corriente
- Medidor de temperatura (Termómetro)
- Medidor de flujo
- Medidor de presión
- Medidor de peso

5.3.1.2. Equipos complementarios

- Computador
- Unidad de Control
- CMS
- Regulador de presión
- Humedificador
- Filtro de aire
- Compresor
- Fuente de alimentación secundaria
- Intercambiador de calor
- Bomba

5.3.1.3. Diagramas de conexión

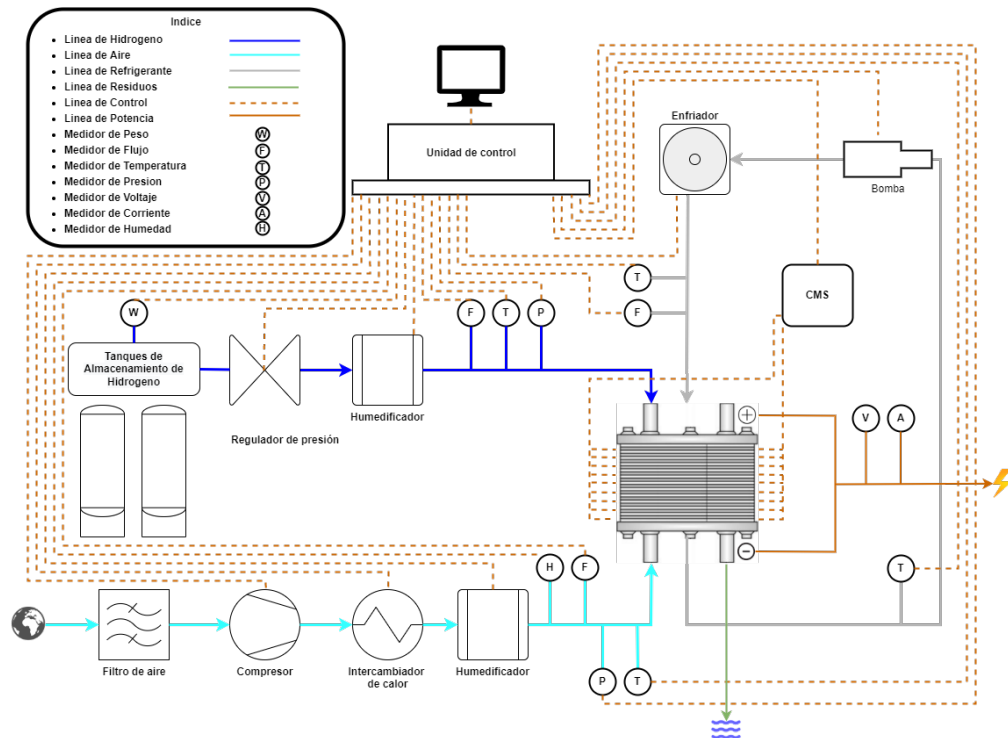


Figura 5.3: Diagrama para los módulos de pruebas de pila PEMFC.

5.3.2. Pruebas de funcionamiento

Primero se realizan las pruebas para una pila de celda de combustible, luego se repiten las pruebas para un arreglo de pilas conectada en serie.

Estas pruebas tienen como objetivo validar el correcto funcionamiento de la celda según lo notificado por el fabricante.

5.3.2.1. Condiciones generales del ensayo

- La frecuencia de recopilación de datos durante la prueba no debe ser inferior a 5 Hz, y los datos deben tener una precisión de 2 decimales, a menos que se indique lo contrario.
- Los sistemas de la pila de combustible deben estar completos y preparados para funcionar.
- Contar con un estanque y un sistema de admisión de H₂ que cumpla con los requerimientos de la PEMFC.
- La fuente de alimentación secundaria (DC12V, DC24, etc) es utilizada para descargar la corriente producida.
- Se utiliza el equipo CMS para obtener las potencias individuales de algunas celdas.

- Se debe llenar el estanque del refrigerante y no volver a maniobrar durante todas las pruebas.
- Durante la prueba, no se permite agregar refrigerante..
- Preparar todos los equipos para contar con las condiciones de operación descritas por el fabricante de la PEMFC.
- La primera prueba en realizarse es la prueba 5.3.2.2.10., si la prueba no cumple los requisitos no es posible realizar las pruebas.
- Al finalizar las pruebas (5.3.2.2.2.-5.3.2.2.9.) se recomienda volver a realizar la prueba 5.3.2.2.10.
- El consumo de hidrógeno es medido por el flujometro, pero se calcula adicionalmente mediante la ecuación 5.1.
- Para el arreglo de las tres pilas, se considera que la potencia nominal sera tres veces la especificada.

5.3.2.2. Módulos de prueba

5.3.2.2.1. Estado frío

1. Se prepara la celda para que la temperatura interna de la pila (temperatura de salida del refrigerante) sea la misma que la temperatura ambiente.
2. Para garantizar que la temperatura interna sea la misma que la temperatura ambiente, se deja reposar el equipo por al menos 12 h, en el lugar de las pruebas.

La pila también puede ser sometida a pruebas bajo cero.

5.3.2.2.2. Estado caliente

1. Se prepara la celda para que la temperatura interna de la pila, se encuentra en el rango de temperatura de funcionamiento normal (especificada por el fabricante).
2. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, mantener el motor de pila de combustible funcionando a una determinada potencia; mientras tanto, controlar la temperatura de salida del refrigerante de la pila de celdas de combustible; una vez que la temperatura de salida del refrigerante de la pila de celdas de combustible alcanza la temperatura normal de funcionamiento, se considera que el motor de celdas de combustible alcanza el estado caliente.

5.3.2.2.3. Arranque en frío

1. La prueba comienza con la pila en estado frío.
2. se mide el tiempo de arranque y el voltaje de salida de la pila para todo momento.
3. Poner en funcionamiento la celda de combustible de acuerdo a el procedimiento de arranque especificado por el fabricante.
4. Después del arranque, mantener funcionando la pila de manara estable durante 10 minutos a baja velocidad.

5.3.2.2.4. Arranque en caliente

1. La prueba comienza con la pila en estado caliente.
2. Medir el tiempo de arranque y el voltaje de salida de la pila para todo momento.
3. Poner en funcionamiento la celda de combustible de acuerdo a el procedimiento de arranque especificado por el fabricante.
4. Después del arranque, mantener funcionando la pila de manera estable durante 10 minutos a alta velocidad.

5.3.2.2.5. Potencia nominal

1. La prueba comienza con la pila en estado caliente.
2. Medir el voltaje y corriente de salida de la pila para todo momento
3. Medir el consumo de hidrógeno en todo momento.
4. Operar durante 60 minutos a la potencia nominal declarada por el fabricante.

5.3.2.2.6. Potencia máxima

1. La prueba comienza con la pila en estado caliente.
2. Medir el voltaje y corriente de salida de la pila para todo momento.
3. Medir el consumo de hidrógeno en todo momento.
4. Operar durante 10 minutos a la potencia nominal declarada por el fabricante.
5. Operar durante el tiempo máximo admisible (según limitaciones técnicas del fabricante) a la potencia máxima declarada por el fabricante.

5.3.2.2.7. Dinámica

1. La prueba comienza con la pila en estado caliente.
2. Medir el voltaje y corriente de salida de la pila para todo momento.
3. Medir el consumo de hidrógeno en todo momento.
4. Medir tiempo de respuesta entre el 10 % y el 90 % de la potencia nominal.
5. Operar durante 1 minuto a la potencia mínima de respuesta dinámica.
6. Aumentar progresivamente la potencia hasta llegar a la potencia máxima de respuesta dinámica, luego mantener por 10 minutos a la potencia que se alcanzo.

5.3.2.2.8. Dinámica de carga

1. La prueba comienza con la pila en estado caliente.
2. Medir el voltaje y corriente de salida de la pila para todo momento.
3. Medir el consumo de hidrógeno en todo momento.
4. Medir tiempo de respuesta entre el 10 % y el 90 % de la potencia nominal.
5. Operar durante 1 minuto a potencia máxima de la respuesta dinámica.
6. Disminuir progresivamente la potencia hasta llegar a la variación mínima de potencia, luego mantener por 10 minutos a la potencia que se alcanza.

5.3.2.2.9. Estado estacionario

1. La prueba comienza con la pila en estado caliente.
2. Medir el voltaje y corriente de salida de la pila para todo momento.
3. Medir el consumo de hidrógeno en todo momento.
4. Operar el sistema para 10 potencias de operación, comenzar con el 10 % de la potencia máxima, operar durante 3 minutos.
5. Aumentar en 10 % la potencia y volver a mantener por tres minutos, hasta que se alcance la potencia máxima.

5.3.2.2.10. Hermeticidad

1. Cerrar las válvulas de escape de pila.
2. Llenar el sistema de celdas con hidrógeno (cátodos y ánodos) hasta alcanzar una presión de 50kPa, cerrar válvula de admisión y mantener la presión estable dentro de la celda durante 20 minutos.
3. Llenar el sistema de celdas con hidrógeno (cátodos y ánodos) con hidrógeno, ajustando las presiones de operación (200kPa), cerrar todas las válvulas y mantener por 20 minutos.
4. Abrir válvulas de salida sin encender el equipo, medir la caída de presión de los gases.

5.3.2.3. Cálculos

5.3.2.3.1. Flujo de combustible

$$m_{H_2} = (p_o - p_f) \cdot g \quad (5.1)$$

p_o : Peso del estanque de H_2 antes de prueba. p_f : Peso del estanque de H_2 después de prueba.

m_{H_2} : Flujo másico de Hidrógeno.

5.3.2.3.2. Potencia de la pila

$$P_f = U_f \cdot I_f \quad (5.2)$$

P_w : Potencia de la pila.

U_v : Tensión de la pila.

I_a : Intensidad de corriente de la pila.

5.3.2.3.3. Eficiencia de la pila

$$\eta = \frac{P_f}{m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (5.3)$$

η : Eficiencia de la pila.

LHV_{H_2} : Poder calorífico del Hidrógeno.

5.3.2.4. Resultados esperados

Resultados esperados para la prueba de Potencia nominal.

- Se espera un correcto funcionamiento de la pila, debido a que se esta operando en condiciones favorables para el sistema.
- La potencia de salida del sistema de pilas para la prueba de potencia nominal, debe estar siempre entre el 97 % y el 103 % de la potencia nominal.
- la potencia de salida promedio del sistema de pila de combustible no debe ser inferior al valor declarado.
- El voltaje promedio de una sola celda no debe ser inferior a 0,6 V.

5.3.3. Pruebas de mapeo de rendimiento

El rendimiento de una pila de combustible se ve afectado por las variaciones en las condiciones de funcionamiento, estas condiciones incluyen la variación de parámetros, tales como, humedad, temperatura, presión y estequiometría. Caracterizar el desempeño de una pila de celdas de combustible en función estos parámetros es crucial para optimizar las condiciones de operación. Por lo tanto, esta prueba se utilizará para mapear el rendimiento de una pila de celdas de combustible frente a estos parámetros operativos.

5.3.3.1. Condiciones generales del ensayo

- La prueba esta dividida en 10 módulos de prueba, esto debido que algunos de los módulos deben hacerse en mas de una oportunidad.
- En los primeros 5 módulos (pruebas 5.3.3.2.1.-5.3.3.2.5.) se mide el voltaje de salida de una celda y de la pila completa, variando un algunos parámetros de entrada.
- En los últimos 5 módulos (pruebas 5.3.3.2.6.-5.3.3.2.9.) se realizan pruebas estequiométricas. que pueden analizar fuentes de polarización del apilamiento de celdas bajo carga, su distribución entre las celdas individuales, así como los fenómenos que afectan la durabilidad del rendimiento.
- En la tabla 5.5 se observan los valores constantes que se recomiendan para pruebas en vehículos y en parámetros que representan las condiciones de operación de la mina.
- Se espera un tiempo mínimo de 30 minutos entre cada uno de los módulos.
- La duración esperada de toda la prueba es 40 horas aproximadamente.

Tabla 5.1: Parámetros de entrada de prueba representativos específicos de la operación

Parámetros	Símbolo	Vehículos	Minera	Unidad
Temperatura PEMFC (entrada de refrigerante)	T_{stack}	80	68	[°C]
Temperatura de entrada del reactivo	$T_{air.in}$	85	73	[°C]
Estequiometría de combustible (H_2)	λ_{fuel}	1,3	1,4	[kw]
Estequiometría del oxidante (aire)	λ_{ox}	1,5	1,6	[-]
Humedad relativa del combustible	RH_{fuel}	50	40	[-]
Temperatura del punto de rocío del combustible	DP_{fuel}	63,5	48,2	[°C]
Humedad relativa oxidante	RH_{ox}	30	50	[%]
Oxidante de temperatura de punto de rocío	DP_{ox}	52,5	52,5	[°C]
Presión de salida de combustible	P_{fuel}	220	220	[kPa]
Presión de salida de oxidante	P_{ox}	200	200	[kPa]

5.3.3.2. Módulos de prueba

5.3.3.2.1. Sensibilidad a la humedad

1. Para esta prueba las variables de presión, estequiometría, temperatura y flujo son constantes e iguales las recomendadas por en la tabla 5.5.

2. Para esta prueba las variables que se modifican son la intensidad de carga eléctrica y el nivel de humedad de entrada del reactante(Oxígeno).
3. Se comienza en un nivel bajo de humedad (30 %) y en una intensidad de corriente un 25 % del máximo, se esperan 10 minutos a que se estabilice y luego se miden los voltajes de una celda y la pila durante 5 minutos. Luego el paso se repite para los siguientes niveles de intensidad de corriente (50 %, 75 % y 100 %).
4. Se vuelve a repetir el paso 3 pero esta vez con un nivel de humedad mayor (50 % y 70 %), esto se repite hasta controlar los puntos de humedad deseados.

5.3.3.2.2. Sensibilidad a la temperatura

1. Para esta prueba las variables de presión, estequiometria, humedad y flujo son contantes he iguales las recomendadas por en la tabla 5.5.
2. Para esta prueba las variables que se modifican son la intensidad de carga eléctrica y la temperatura de PEMFC en la entrada del refrigerante.
3. Se comienza en un nivel bajo de temperatura (58°C) y en una intensidad de corriente un 25 % del máximo, se esperan 10 minutos a que se estabilice y luego se miden los voltajes de una celda y la pila durante 5 minutos. Luego el paso se repite para los siguientes niveles de intensidad de corriente (50 %, 75 % y 100 %).
4. Se vuelve a repetir el paso 3 pero esta vez con un nivel de temperatura mayor (68°C y 78°C), esto se repite hasta controlar los puntos de temperatura deseados.

5.3.3.2.3. Sensibilidad a la presión

1. Para esta prueba las variables de temperatura, estequiometria, humedad y flujo son contantes he iguales las recomendadas por en la tabla 5.5.
2. Para esta prueba las variables que se modifican son la intensidad de carga eléctrica y las presiones del cátodo y ánodo de la celda (salida de combustible y oxígeno).
3. Se comienza en un nivel alto de presión en el cátodo y ánodo (200 kPa y 200 kPa respectivamente) y en una intensidad de corriente un 50 % del máximo, se esperan 10 minutos a que se estabilice y luego se miden los voltajes de una celda y la pila durante 5 minutos. Luego el paso se repite para los siguientes niveles de intensidad de corriente (75 % y 100 %).
4. Se vuelve a repetir el paso 3 pero esta vez el nivel de presión del cátodo disminuye a (150 kPa) y la presión del anodo permanece constante (200 kPa), luego se repite el paso 3 pero se disminuye la presión del ánodo a (150 kPa) y la presión del cátodo permanece constante (150 kPa), así sucesivamente hasta cubrir los rangos de presión deseados.

5.3.3.2.4. Sensibilidad a la estequiometria

1. Para esta prueba las variables de presión, temperatura, humedad y flujo son contantes he iguales las recomendadas por en la tabla 5.5.

2. Para esta prueba las variables que se modifican son la intensidad de carga eléctrica y la estequiometría del reactante, valor que puede modificarse con el flujo de reactante según la ecuación 5.4.
3. Se comienza en un nivel alto de estequiometría (2,5) y en una intensidad de corriente un 25 % del máximo, se esperan 10 minutos a que se estabilice y luego se miden los voltajes de una celda y la pila durante 5 minutos. Luego el paso se repite para los siguientes niveles de intensidad de corriente (50 %, 75 % y 100 %).
4. Se vuelve a repetir el paso 3 pero esta vez con un nivel de estequiometría menor (2 y 1.5), esto se repite hasta controlar los puntos estequiométricos deseados.

5.3.3.2.5. Curva de polarización

1. Para esta prueba las variables de estequiometría, presión, temperatura, humedad y flujo son constantes e iguales las recomendadas por en la tabla 5.5.
2. Para esta prueba la variable que se modifica es solo la intensidad de carga eléctrica, comenzando del máximo especificado por el fabricante donde se miden los voltajes de una celda y la pila durante 5 minutos. Luego el paso se repite para los siguientes niveles de intensidad de corriente disminuyendo de forma escalonada la intensidad de carga hasta llegar al mínimo admisible (5 mV).
3. Se repite el procedimiento anterior pero esta vez comenzando del mínimo de intensidad de corriente hasta llegar al máximo.

5.3.3.2.6. Voltamperometría

1. Un potenciómetro es conectado a un monitor rápido de voltaje de celda.
2. La celda es llenada de N₂ y H₂ en ambos lados de la pila (cátodo y ánodo).
3. Se aumenta progresivamente la corriente de la celda, midiendo los valores de corriente, así se construye un perfil de potencia.
4. Los valores utilizados para este experimento son expuestos en la tabla 5.5.
5. Finalmente se calcula el área efectiva con las ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7.

Tabla 5.2: Parámetros de entrada prueba de voltamperometría.

Input	Valor
C_{CO}	1-100 %
C_{MoOH}	0,1-0,5 M
DP_{CS}	T_{Stack}
DP_{SS}	T_{Stack}
E_{ADS}	0,10 - 0,20 V
E_{IN}	0,35 - 0,40 V
E_{VA}	0,80 - 1,30 V
E_{VC}	0,01 - 0,05 V
n_{CS}	20 - 200
n_{SS}	3 - 11
P_{CS}	0 - 300 kPa
P_{SS}	0 - 300 kPa
SR	0,001 - 0,050 V
T_{MoOH}	T_{Stack}
T_{Stack}	20 - 90 °C
V_{CS}	1 - 10 $Ncm^3min^{-3}cm^{-2}$
V_{SS}	1 - 10 $Ncm^3min^{-3}cm^{-2}$
τ_{ADS}	15 - 60 min
τ_{EQ}	10 s - 180 min
τ_{FSH}	30 - 120 min
E_k	$E_{VC} - E_{VA}$

5.3.3.2.7. Potenciometría

1. Un amperostato es conectado a un monitor rápido de voltaje.
2. El lado opuesto de la pila se alimenta con H_2 preferiblemente diluido con N_2 , mientras que el lado estudiado recibe aire.
3. Luego el aire en el lado estudiado se reemplaza con N_2 y tan pronto como el voltaje de la celda cae por debajo de E_{pa} , se aplica una densidad de corriente constante i_p a través de la pila de modo que se produzca una reducción en el lado estudiado. Los voltajes de las celdas se registran a lo largo del tiempo usando el CVM.
4. Finalmente se calcula el área efectiva con la ecuación 5.8 .

Tabla 5.3: Parámetros de entrada prueba de potenciometría.

Input	Valor
DP_{CS}	T_{Stack}
DP_{SS}	T_{Stack}
E_{PA}	0,80 - 0,90 V
E_{PC}	0,05 - 0,10 V
E_{PM}	0,35 - 0,45 V
i_P	0,01 - 50,0 $mAcm^{-2}$
n_{PP}	20 -299
P_{CS}	0 - 300 kPa
P_{CS}	0 - 300 kPa
T_{Stack}	20 - 90 °C
V_{CS}	1,0 - 10,0 $Ncm^3min^{-3}cm^{-2}$
V_{SS}	1,0 - 10,0 $Ncm^3min^{-3}cm^{-2}$
X_{H2}	1 - 100
τ_{EQ}	10 s - 10 min

5.3.3.2.8. Espectroscopia de impedancia

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) puede proporcionar información cuantitativa sobre las fuentes de polarización de la pila y su distribución entre la celda/electrodos en la pila, además de información sobre sus electrodos.

1. Se conecta una configuración de polarización de DC, preferiblemente una capaz de inversión de voltaje, que puede impulsar una carga constante a través de la pila.
2. Un generador de corriente AC aplica una senoide de corriente sobre la carga constante.
3. Un analizador de la corriente AC mide la corriente (sobre una resistencia de derivación) y la respuesta de voltaje de CA de una celda en la pila.
4. la pila funciona con combustible-oxidante o combustible- H_2 bajo carga de DC constante.
5. Los espectros EIS se obtienen superponiendo perturbaciones de corriente CA de diferentes frecuencias de un rango de frecuencia sobre la carga constante. El espectro EIS es solo el espectro del ánodo.
6. El espectro del cátodo se obtiene restando el espectro del ánodo del espectro registrado en el modo combustible oxidante.

Tabla 5.4: Parámetros de entrada prueba de potenciometría.

Input	Valor
DP_{CS}	T_{Stack}
DP_{SS}	T_{Stack}
E_{PA}	0,80 - 0,90 V
E_{PC}	0,05 - 0,10 V
E_{PM}	0,35 - 0,45 V
i_P	0,01 - 50,0 $mAcm^{-2}$
n_{PP}	20 -299
P_{CS}	0 - 300 kPa
P_{CS}	0 - 300 kPa
T_{Stack}	20 - 90 °C
V_{CS}	1,0 - 10,0 $Ncm^3min^{-3}cm^{-2}$
V_{SS}	1,0 - 10,0 $Ncm^3min^{-3}cm^{-2}$
X_{H2}	1 - 100
τ_{EQ}	10 s - 10 min

5.3.3.2.9. Cruce de hidrógeno

1. Se conecta un potenciostato para determinar la permeabilidad de la PEMFC al combustible de Hidrógeno.
2. El lado del ánodo de la pila se alimenta con H₂ de manera correspondiente a las condiciones operativas nominales de la pila.
3. El lado del cátodo se alimenta con N₂ totalmente humidificado.
4. La potencia del lado del cátodo de cada celda se eleva a un valor constante asegurando la oxidación completa del H₂ que se filtra desde el lado del ánodo.
5. Se eligen dos valores diferentes del potencial para detectar una posible diferencia en la corriente debido a un cortocircuito electrónico en el medidor.
6. Se ajusta una línea recta a las corrientes de cruce H₂ establecidas para los valores de potencial del lado del cátodo. La intersección con el eje Y de la línea para el potencial cero del lado del cátodo, es la corriente de cruce de H₂ corregida electrónicamente. El recíproco de la pendiente de la línea entrega la resistencia del corto electrónico.

Tabla 5.5: Parámetros de entrada prueba de Hidrógeno.

Input	Valor
DP_A	$10^{\circ}\text{C} - T_{Stack}$
DP_C	T_{Stack}
E_{x1}	0,35 - 0,65 V
E_{x2}	0,35 - 0,65 V
E_{x3}	0,35 - 0,65 V
p_a	0 - 300 $m\text{Acm}^{-2}$
p_b	0 - 300 $m\text{Acm}^{-2}$
t_{stack}	20 - 90 $^{\circ}\text{C}$
V_A	5 - 15 $\text{Ncm}^3\text{min}^{-1}\text{cm}^{-2}$
V_C	1 - 10 $\text{Ncm}^3\text{min}^{-1}\text{cm}^{-2}$

5.3.3.3. Descripción prueba de mapeo de rendimiento

1. Realizar pruebas 5.3.3.2.5.-5.3.3.2.9. para las condiciones de operaciones de la tabla 5.5
2. Realizar prueba 5.3.3.2.1., para cada valor de humedad realizar las pruebas 5.3.3.2.6.-5.3.3.2.9..
3. Realizar prueba 5.3.3.2.2., para cada valor de temperatura realizar las pruebas 5.3.3.2.6.-5.3.3.2.9..
4. Realizar prueba 5.3.3.2.3., para cada valor de presión realizar las pruebas 5.3.3.2.6.-5.3.3.2.9..
5. Realizar prueba 5.3.3.2.4., para cada valor de estequiometria realizar las pruebas 5.3.3.2.6.-5.3.3.2.9..
6. Realizar pruebas 5.3.3.2.5.-5.3.3.2.9. para las condiciones de operaciones de la tabla 5.5
7. Se representa la potencia de salida y del voltaje de la celda para toda la prueba.

5.3.3.4. Cálculos

$$\lambda = \frac{m_{air}}{\frac{inM_{air}}{4FX_2}} \quad (5.4)$$

$$CO.C.k = 1 - Q_{HMIN.C.k}/Q_{HMAX.C.k} \quad (5.5)$$

$$esp_{C.k} = 0,77 \cdot \frac{Q_{CO+OX.C.k} - Q_{OX.C.K}}{(Q_{HMAX.C.k} - Q_{HMIN.C.K})} \quad (5.6)$$

$$ECSA_{C.k} = \frac{Q_{CO+OX.C.k} - Q_{OX.C.K}}{CO.C.k \cdot esp_{C.k} \cdot 2,1 \cdot 10^{-4}} \quad (5.7)$$

$$ECSA_{C.k} = \frac{i_P \cdot \delta t_{C.K}}{0,77 \cdot 10^{-1}} \quad (5.8)$$

5.3.3.5. Resultados esperados

- Prueba de humedad: En general, la humedad de los reactivos, especialmente la humedad del oxidante, tiene un alto impacto en el estado de humedad de la membrana y el rendimiento de la pila. En consecuencia, el nivel de humedad del reactivo aplicado a la pila influye significativamente en el rendimiento. Las condiciones operativas más estables con respecto al rendimiento de la pila se pueden lograr utilizando reactivos poco humidificados.
- Prueba de temperatura: Los puntos de rocío de los reactivos deben variar según la temperatura de la chimenea. De acuerdo con la metodología para la variación de la humedad de los reactivos, la temperatura de la chimenea debe aumentarse durante un procedimiento de prueba para minimizar la duración de la prueba. Por lo tanto, debe evitarse que se produzca una inundación del electrodo mediante un aumento de la temperatura de la chimenea antes del aumento del punto de rocío. Además, las bajas temperaturas de la pila en combinación con reactivos altamente humidificados pueden promover la condensación de agua y deben manejarse con cuidado.
- Prueba de presión: Usualmente una mayor presión del combustible y lo reactantes implica un mayor voltaje de salida.
- Prueba de estequiometría: Los puntos de prueba que utilizan una estequiometría de reactivos alta están asociados con un flujo de reactivos alto y el agua producida puede eliminarse fácilmente de la pila. Por el contrario, una relación estequiométrica baja y un flujo de reactivo bajo pueden provocar la acumulación de agua en las celdas individuales e invocar la inundación del electrodo. Esto puede resultar en una mayor fluctuación de voltaje. Además, la caída de presión en los compartimentos de gas de la pila disminuye con una estequiometría baja y puede provocarse una distribución no homogénea de los reactivos entre las celdas individuales. La falta de reactivo local resultante, así como la inundación del electrodo local, pueden provocar daños en la celda.
- En general, los voltajes de una sola celda en una pila disminuyen con el aumento de la carga eléctrica, el fabricante de la pila debe especificar el valor mínimo para evitar daños en la celda. Por lo tanto, es ventajoso realizar procedimientos de prueba usando puntos de prueba con carga eléctrica creciente, especialmente para procedimientos completamente automatizados. Los voltajes de celda individual disminuyen gradualmente y los puntos de prueba se pueden realizar hasta un nivel de carga, en el que se alcanza un voltaje de celda mínimo definido. Además, es importante evitar la inanición de reactivos cuando se varía la corriente de la pila. Los flujos de reactivo tienen que incrementarse antes de que aumente la carga eléctrica, y la carga eléctrica tiene que disminuirse antes de que disminuya el flujo de reactivo. Por lo tanto, se debe tener en cuenta la dinámica de la estación de prueba, especialmente en relaciones estequiométricas bajas y volúmenes de gas altos.

5.4. Pruebas para sistemas híbrido PEMFC-Batería

Para la realización de pruebas, se propone incorporar el sistemas híbrido de generación a un banco de pruebas, que permita emular un camión híbrido real. El banco de pruebas está diseñado para que el motor eléctrico pueda ser operado solo por la batería o por ambas fuentes de energía.

5.4.1. Equipos y componentes

A continuación se presentan los equipos y componentes necesarios para realizar las pruebas. No se mencionan equipos y elementos menores como soportes integrales, líneas de conexión, valvulas, tuberías y sistemas de apoyo.

5.4.1.1. Equipos Principales

Los principales equipos para simular el tren de potencia y montar el banco de pruebas son los siguientes:

- Sistema de Pila de combustible (figura 5.3)
- Paquete de Batería
- Motor Eléctrico
- Sistema de gestión de Batería
- Sistema de control
- Conversor DC-DC
- Inversor DC-AC

5.4.1.2. Equipos de medición

Los equipos de mediciones necesarios para la medición y control de las pruebas son:

- Sensor de corriente
- Sensor de voltaje

5.4.1.3. Diagrama de conexión

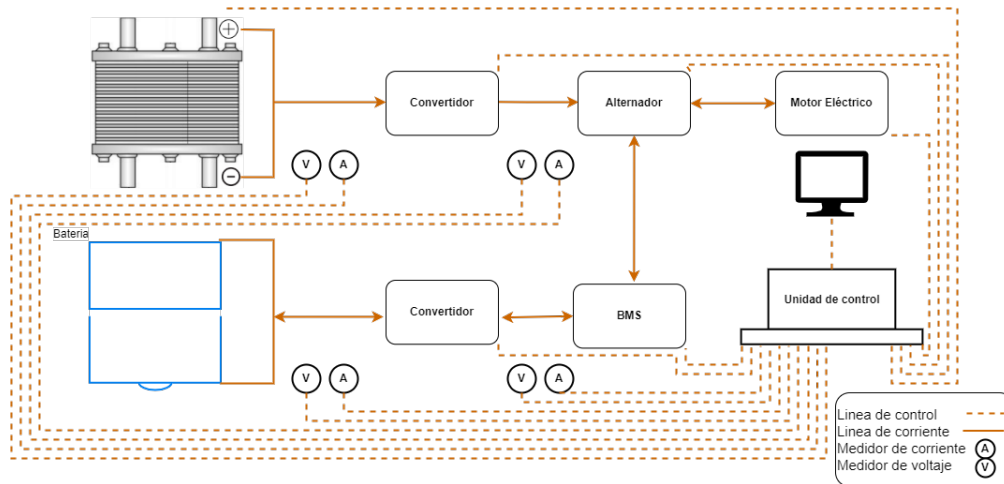


Figura 5.4: Diagrama para las pruebas de pila PEMFC

5.4.2. Pruebas de funcionamiento

5.4.2.1. Condiciones generales del ensayo

- Se utiliza un sistema de gestión de energía (BMS), para controlar y observar el estado de la batería. Es capaz de leer en tiempo real el estado de carga (SOC) de cada celda de la batería, la corriente de carga, y, descarga desde y hacia la batería,
- Se considera mantener el arreglo de las pruebas anteriores (sección 5.3) para controlar el estado de la celda de combustible.
- Tanto el motor eléctrico como el alternador son los mismos modelos con los que actualmente operan los CAEX.

5.4.2.2. Descripción de prueba

1. Se analiza y captura un ciclo de demandas de potencia desde la base de datos de operación de los camiones CAEX (como se hizo en la sección 3.1).
2. Se introduce en el computador una señal que exija al sistema funcionar para cubrir esta demanda de potencia, como estrategia de control se postula en primera instancia utilizar la diseñada en la sección 4.
3. Se utilizan diferentes estrategias de control, con tal de cumplir con las demandas del ciclo de conducción seleccionado.
4. Se registran para todo momento de la operación los parámetros de funcionamiento de la celda de combustible, junto los voltajes y corrientes del sistema híbrido.

Capítulo 6

Resultados

Para el desarrollo de este trabajo se han estudiado y descrito la tecnología de celdas de combustible, en términos de sus principios, fabricantes de equipos y aplicaciones, particularmente aplicado en vehículos (sección 2). Aunque debido al poco uso de esta tecnología para camiones, no se presenta en detalle casos donde se encuentre la tecnología aplicada actualmente en camiones mineros (sección 2.4.4).

Se han seleccionado las PEMFC como las celdas a utilizar debido a las ventajas que presentan para camiones, como son los bajos tiempos de carga de combustible y los nulos niveles de contaminación. Para el sistema de potencia se selecciono un sistema híbrido complementado por un batería de litio, debido a que este sistema responde a los grandes requisitos energéticos de los camiones y los elevados requisitos de potencia en cortos periodos de tiempo.

Se ha construido un ciclo de conducción que representa básicamente las principales condiciones de operación de los camiones en MLP, como son las distancias y pendientes de la ruta, gracias a la información de la minera ha sido posible encontrar una relación entre las pendientes, las cargas y las potencias demandas por el sistema. La construcción del ciclo característico se realizado para poder representar solo una ruta considerando los datos de operación de un camión por lo que los valores podrían estar sobre ajustados a solo un CAEX.

Mediante un proceso de optimización fue posible encontrar un dimensionamiento de PEMFC y batería, que respondiera al ciclo de conducción elaborado para los camiones CAEX, aunque el diseño esta limitado por el sistema de control propuesto y los limites operaciones seleccionados. No se ha resuelto si los equipos seleccionados cumplen con el espacio disponible dentro de un camión, debido a que estos arreglos se han centrado en su funcionamiento. Aún se están desarrollando y estudiando las mejores metodologías para diseñar y dimensionar sistemas híbridos para vehículos eléctricos.

Debido a la inmadurez tecnológica de las PEMFC, las pruebas se han dividido en dos grupos, las primeras para validar el uso de la tecnología de celdas de combustible en las condiciones de operación de los camiones como son el polvo, la humedad y las concentraciones de oxigeno en el aire. Las segundas pruebas propuestas, están centradas en validar el funcionamiento de un sistema híbrido de potencia, que a su vez se postula y representa como sustituto de los trenes actuales.

Capítulo 7

Conclusiones

Las PEMFC son una buena alternativa como fuente de potencia para camiones CAEX debido a las ventajas que presentan, en cuanto a tiempos de carga y eliminación de gases nocivos. Para vehículos de gran tamaño y elevados requisitos energéticos es preferible utilizar sistemas híbridos. Aún es necesario desarrollar mas la tecnología para poder incorporarla a gran escala en la industria minera.

Es posible caracterizar las operaciones de los camiones a contar del registro de las velocidades y potencias del motor. Una buena selección de parámetros y rutas hace posible construir un ciclo de conducción característico.

Existen diferentes modelos de dimensionamiento para trenes híbridos de potencia, una forma moderna de diseñar estos sistemas, es el uso de modelos de optimización compuestos, donde es posible dividir el problema de diseño considerando variables de control.

Para el correcto uso de nuevas tecnologías, las pruebas piloto son una buena herramienta para validar el funcionamiento en su etapa de desarrollo. Las pruebas permiten planificarse para incorporar las tecnologías según lo planificado por la empresa.

Se a cumplido con los objetivos plantados para este trabajo de título, en donde se han detallado una serie de pruebas que permiten validar en primera instancia el correcto funcionamiento del sistema propuesto.

7.1. Trabajo propuesto

Debido a que la tecnología que se quiere implementar para los trenes de potencia aún no esta validada para su uso en camiones pesados de minería se proponen los siguientes trabajos:

- Realizar las pruebas elaboradas en este documento, para estudiar, discutir y validar la tecnología por las series de pruebas propuestas.
- Elaborar y realizar pruebas piloto que permitan desarrollar más la tecnología aplicada en grandes vehículos, esperando que alcanzar un nivel de madurez tecnológica de 9.
- Estudiar y desarrollar un sistema óptimo de control para el sistema de potencia propuesto,

Bibliografía

- [1] R. B. Abarca and J. C. Araya, “Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2019,” tech. rep., Comisión Chilena del Cobre, 2020.
- [2] M. Correa, C. Barría, and B. Maluenda, “Estrategia nacional hidrógeno verde,” tech. rep., Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, 2020.
- [3] G. de planificación de la transmisión, “Proyección de demanda eléctrica 2020-2040,” tech. rep., Coordinador eléctrico nacional, 2020.
- [4] D. de Políticas y Estudios Energéticos y Ambientales, “Balance nacional de energía,” tech. rep., Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, 2020.
- [5] C. C. del Cobre, “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019,” tech. rep., Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2019.
- [6] C. C. del Cobre, “Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2019,” tech. rep., Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2019.
- [7] A. Minerals, “Reporte avance el convenio de operación entre ministerio de energía y consejo minero,” tech. rep., Antofagasta Minerals, 2020.
- [8] B. Pollet, I. Staffell, J. Shang, and V. Molkov, “22 - fuel-cell (hydrogen) electric hybrid vehicles,” in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance* (R. Folkson, ed.), pp. 685–735, Woodhead Publishing, 2014.
- [9] O. C. Campo, R. Domingo, and R. A. Fernandez, “Opportunities and barriers of hydrogen–electric hybrid powertrain vans: A systematic literature review.,” *Alexandra Delgado Jiménez’s Lab*, 2020.
- [10] P. Moore, “Hydra’s fcev mining truck stationary powertrain prototype completed while liebherr joins consortium.,” 26/01/2020.
- [11] C. N. V, “Study of hydrogen global market and technical and economica prefeasibility of using the proton exchange membrane fuel cell (pem) fueled with hydrogen in chilean mining mobility,” tech. rep., Universidad de Chile, 2020.
- [12] . Gabriel Prudencio F, . Francisco Martínez-Conde D, . Marcelo Padilla V, and . Fernanda Bradford S, “Plan nacional de eficiencia energética 2022-2206,” tech. rep., Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2022.
- [13] C. Barría, B. Eguiguren, C. Coronado, A. Varas, R. González, J. Obach, and L. Gutiérrez, “Transición energética de Chile política energética nacional,” tech. rep., Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2021.

- [14] *Advances in chemical engineering VOL41*. Academic Press, 1 ed., 2012.
- [15] *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*. Academic Press, 1 ed., 2008.
- [16] C. H. Choi, S. Yu, B. K. Han, I S.and Kho, D. G. Kang, H. Y. Lee, M. S. Seo, J. W. Kong, G. Kim, and J. W. Ahn, “Development and demonstration of pem fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016.
- [17] H. H. Y. L. M. C. W. A. Li, Q.and Yang, “A state machine strategy based on droop control for an energy management system of pemfc-battery-supercapacitor hybrid tramway,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016.
- [18] H. Shayeghi, A. Younesi, and Y. Hashemi, “Optimal design of a robust discrete parallel fp+fi+fd controller for the automatic voltage regulator system,” in *International Journal of Electrical Power Energy System*, pp. 66–75, Volume 67, 2015.
- [19] M. K. Mahdiyeh Eslami, Hussain Shareef, “Optimal design of damping controllers using a new hybrid artificial bee colony algorithm,” in *International Journal of Electrical Power Energy System*, pp. 42–54, Volume 52, 2013.
- [20] Z. Yuan, L. Teng, S. Fengchun, and H. Peng, “Comparative study of dynamic programming and pontryagin’s minimum principle on energy management for a parallel hybrid electric vehicle,” in *Energies*, pp. 2305–2318, 6, 2013.
- [21] M. C and L. L, “Optimal power source sizing of fuel cell hybrid vehicles based on pontryagin’s minimum principle,” in *Energies*, pp. 8454–8464, 40, 2015.
- [22] A. Ceschia, O. Bethoux, T. Azib, and F. Alves, “Optimal design methodology for sizing a fuel cell/battery hybrid power source.,” in *Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy.*, pp. 4024–4031, 2020.
- [23] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, C. Marchand, and E. Berthelot, “An innovative control strategy of a single converter for hybrid fuel cell/supercapacitors power source.,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 4024–4031, 12, 2010.
- [24] S. N. de geología y minería., “Guía de implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería,” tech. rep., Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2021.
- [25] C. de desarrollo de la industria de equipos del ministerio de industria y tecnología de la información de China., “especificación de prueba del vehículo de pila de combustible.,” 2021.
- [26] F. JU., “Development of pem fuel cell stack reference test procedures for industry.,” 2015.

ANEXOS

ANEXO A

Hoja técnica Komatsu 930E-4

KOMATSU®

930E-4

MAXIMUM GVW
501974 kg **1,106,670 lb**

GROSS HORSEPOWER
2014 kW **2,700 HP**

930E

ELECTRIC DRIVE TRUCK



Photos may include optional equipment

SPECIFICATIONS



ENGINE

Make and model	Komatsu SSDA16V160*
Fuel	Diesel
Number of cylinders	16
Operating cycle	4 cycle
Rated brake power**	2014 kW 2,700 HP @ 1900 rpm
Flywheel power***	1902 kW 2,550 HP @ 1900 rpm
Weight (wet)	9608 kg 21,182 lb

* Tier 2 emissions compliant. Tier 1 emissions engine is optional outside of North America.

** Rated brake power is the output of the engine as installed in this machine, at governed rpm and with engine manufacturer's approved fuel setting. Accessory losses included are water pump, fuel pump and oil pump.

*** Flywheel power is the rated power at the engine flywheel minus the average accessory losses. Accessories include fan and charging alternator. Rating(s) represent net engine performance in accordance with SAE J1349 conditions.



ELECTRIC DRIVE

AC/DC CURRENT

Alternator	GTA-41
Dual impeller in-line blower	340 m ³ /min 12,000 cfm
Control	AC Torque Control System
Motorized wheels*	GDY106 Induction Traction Motors
Ratio**	32.62:1
Speed (maximum)	64.5 km/h 40 mph

* Wheel motor application depends upon gross vehicle weight, haul road grade, haul road length, rolling resistance and other parameters. Komatsu and G.E. must analyze each job condition to assure proper application.

** Optional ratios available.



TIRES AND RIMS

Rock service, tubeless, radial tires	
Standard tire*	53/80 R63
Taper lock, five (5) piece rim	
914 mm x 1600 mm x 127 mm 36" x 63" x 5.0" rim assembly.	
Rims rated at 758 kPa 110 psi cold inflation pressure.	
Typical tire weight	26127 kg 57,600 lb

* Tires should meet application requirements for tkph/tmph, tread, compound, inflation pressure, ply rating or equivalent, etc.



BODY

All-welded steel flat floor body with horizontal bolsters and full canopy. Eyebrow, rear wheel rock ejectors, body up sling and rubber mounts on frame are standard. Pivot exhaust heating optional.

Floor sheet	16 mm 0.63" 1379 mPa 200,000 psi tensile strength steel (two-piece)
Front sheet	9 mm 0.35" 1379 mPa 200,000 psi tensile strength steel
Side sheet	8 mm 0.31" 1379 mPa 200,000 psi tensile strength steel
Canopy sheet	5 mm 0.19" 690 mPa 100,000 psi
Struck	171 m ³ 224 yd³
Standard SAE heaped 2:1	211 m ³ 276 yd³
Standard Komatsu body weight	30362 kg 66,936 lb

*Komatsu must approve all bodies through a Body Application Worksheet



CAB

Advanced Operator Environment with integral 4-post ROPS/FOPS structure Level 2, adjustable air suspension seat w/lumbar support and arm rests, full-size passenger seat, maximum R-value insulation, tilt and telescoping steering wheel, electric windshield wipers w/washer, tinted safety glass, power windows, Komatsu Payload Weighing System, 55,000 Btu/hr heater and defroster, 21,600 BTU/hr air conditioning (HFC - 134A refrigerant).



FRAME

Advanced technology, full butt-welded box sectional ladder-type frame with integral ROPS supports, integral front bumper, rear tubular cross members, steel castings at all critical stress transition zones, rugged continuous horseshollar.

Plate material	482.6 mPa 70,000 psi tensile strength steel
Casting material	620.5 mPa 90,000 psi tensile strength steel
Rail width	305 mm 12"
Rail depth (minimum)	864 mm 34"
Top and bottom plate thickness	45 mm 1.77"
Side plate thickness	25 mm 0.98"
Drive axle mounting	Pin and spherical bushing
Drive axle alignment	Swing link between frame and axle



BRAKING SYSTEM

Service brakes: oil-cooled, hydraulic-actuated, multiple disc brakes at each wheel. Traction system wheel slip/slide control.

Max. service apply pressure	17237 kPa 2500 psi
Total friction area per brake	97025 cm ² 15,038 in²
Emergency brakes	Automatically applied prior to hydraulic system pressure dropping below level required to meet secondary stopping requirements.
Wheel brake locks	Switch activated
Parking brakes	Multiple disc, spring-applied, hydraulically-released, dry brakes on inboard end of each wheel motor rotor shaft. Rated to hold on ±15% grade at maximum gross vehicle weight.
Electric dynamic retarder	Max 4026 kW 5400 hp Continuous 2460 kW 3300 hp

Continuously rated high-density blown grids w/retard capacity at low speeds and retard in reverse propulsion.



SUSPENSION

Variable rate hydro-pneumatic with integral rebound control

Max. front stroke	328 mm 12.92"
Max. rear stroke	239 mm 9.40"
Max. rear axle oscillation	±6.5°



COOLING SYSTEM

L&M radiator assembly, split-flow, with deaerator-type top tank.

Radiator frontal area	7.02 m ² 75.5 ft²
-----------------------	--



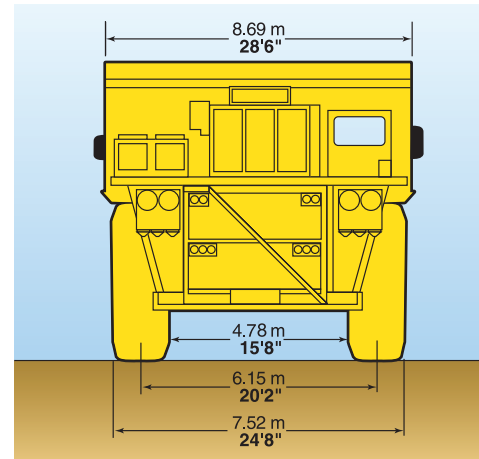
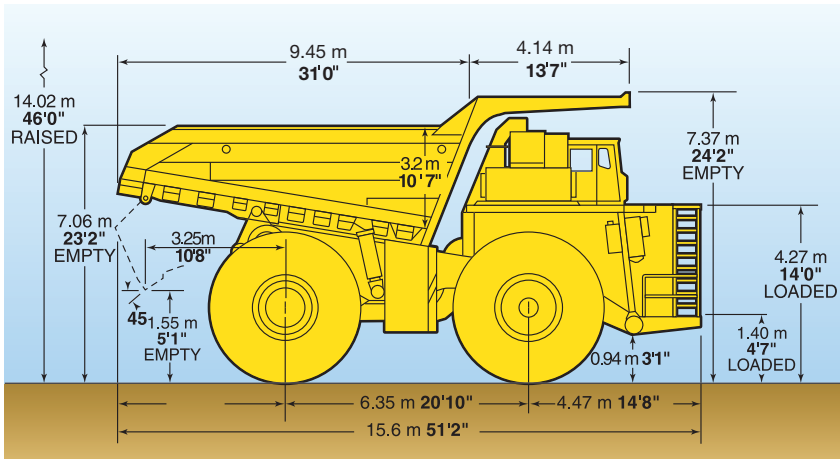
SERVICE CAPACITIES

Cooling system	594 L	157 U.S. gal
Crankcase*	280 L	74 U.S. gal
Hydraulic system	1325 L	350 U.S. gal
Motor gear box (each)	95 L	25 U.S. gal
Fuel	4542 L	1200 U.S. gal

* Includes lube oil filters



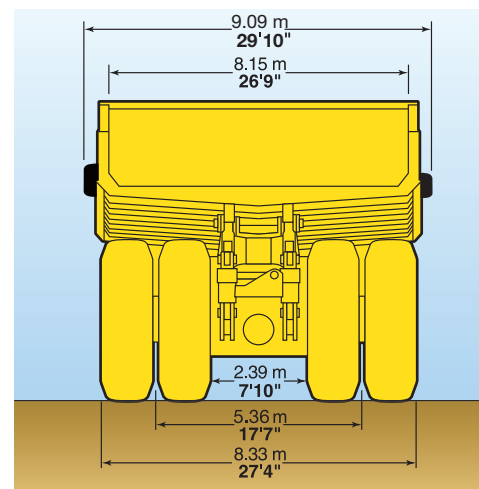
DIMENSIONS



All dimensions are with 211 m³ 276 yd³ body.

Bodies	Struck	2:1 Heap	Loading Height*
Standard	171 m ³ 224 yd ³	211 m ³ 276 yd ³	7.06 m 23'2"

*Exact load height may vary due to tire make, type, and inflation pressure.



HYDRAULIC SYSTEM

Steering Accumulator assisted with twin double acting cylinders provide constant rate steering. Emergency steering automatically supplied by accumulator.

Turning circle diameter (SAE) 29.7 m 97'7"

Reservoir 947 L 250 U.S. gal

Filtration In-line replaceable elements

Suction Single, full flow, 100 mesh

Hoist and steering Dual, in-line, high pressure

Brake component cabinet Above deck, easily accessible with diagnostic test connections

Hoist Two 3-stage dual-acting outboard cylinders, internal cushion valve, over-center dampening

Hoist times

Power-up loaded 21 sec

Power-down 23 sec

Float-down empty 24 sec

Pumps Two pumps, single package, end of alternator

Hoist and brake cooling Tandem gear pump with output of 1022 lpm **270 gpm** at 1900 rpm and 17237 kPa **2,500 psi**

Steering and brake Pressure-compensating piston pump with output of 246 lpm **65 gpm** at 1900 rpm and 18961 kPa **2,750 psi**

System relief pressures

Hoist and brake cooling 17237 kPa **2,500 psi**

Steering and brake 27579 kPa **4,000 psi**

Quick disconnects standard for powering disabled truck and for systems diagnostics.



ELECTRICAL SYSTEM

4 x 8D 1450 CCA, 12 volt, in series/parallel, 220-ampere-hour batteries, bumper-mounted with disconnect switch and lockout.

Alternator 24 volt, 140 amp

Lighting 24 volt

Cranking motors Two/24 volt



WEIGHT DISTRIBUTION

Empty vehicle weight (wet, 100% fuel, no options, std. Komatsu body, std. tires)

Front axle 99711 kg . . . **219,826 lb** 47%

Rear axle 110476 kg . . . **243,557 lb** 53%

Total EVW 210187 kg . . . **463,383 lb**

Gross vehicle weight (Nominal)

Front axle 165651 kg . . . **365,201 lb** 33%

Rear axle 336323 kg . . . **741,469 lb** 67%

Total 501974 kg . . . **1,106,670 lb**

Nominal payload* 291790 kg . . . **643,287 lb**

320 U.S. ton

* Nominal payload is defined by Komatsu America Corp. payload policy documentation. In general, the nominal payload must be adjusted for the specific vehicle configuration and site application. The figures above are provided for basic product description purposes. Please contact your Komatsu distributor for specific application requirements.



STANDARD EQUIPMENT

- Air cleaners, Donaldson SRG
- Air filter evacuators
- Alternator (24 volt/140A)
- Auto lubrication system w/ground level fill & level indicator
- Batteries—4 x 8D (1450 CCA's)
- Battery charging cable and socket
- Body over center device
- Brakes: oil-cooled, multiple disc front & rear
- Control cabinet
- Electric start
- Eliminator, Centinel, reserve oil tank
- Filters, high pressure hydraulic
- Gate valves on hydraulic tank
- Ground level radiator fill
- Komatsu Payload Weighing System—PLM-III
- Mirrors, LH flat and RH rectangular convex
- Mud flaps
- Muffled exhaust—deck-mounted
- Power supply, 24 volt and 12 volt DC
- Quick disconnects (hoist and diagnostics)
- Radiator sight gauge
- Removable power module unit (radiator, engine, alternator, blower)
- Retard speed control
- Reverse retarding
- Rock ejectors
- Thermostatic fan clutch
- Fast-fill fuel system (in tank and left side remote)
- Service center—LH
- Body impact plate

OPERATOR ENVIRONMENT & CONTROL

- All hydraulic service brakes with emergency auto apply
- Battery disconnect switch
- Body up sling
- Brake lock and drive system interlock
- Circuit breakers, 24 volt
- Diagonal staircase across grill, L to R
- Dynamic retarding with continuous rated element grids
- Engine shutdown at ground level
- Hoist propulsion interlock
- Horns (electric—front and back-up)
- Integral ROPS/FOPS cab Level 2
- Maintenance and power lockout
- Parking brakes with warning light & speed application protection

- Power steering w/auto emergency steering
- Protective deck handrails
- Pump driveline protector
- Radiator fan guard
- Seat belts 76 mm 3" wide retractable
- Slip-resistant coating on walkways

STANDARD HIGH VISIBILITY DELUXE CAB

- AC drive interface display
- Air cleaner vacuum gauges
- Air conditioner HFC-134A
- Alarm system warning lights (red)
 - Accumulator pre-charge
 - Auto lube pressure, low
 - Battery charge
 - Brake/hydraulic oil temp w/alarm
 - Electric system fault w/alarm
 - IM fail
 - Link energized
 - Low engine oil pressure w/alarm
 - Low brake pressure w/alarm
 - No propel/retard power w/alarm
 - Stop engine no propel w/alarm
 - Steering pressure w/alarm
- AM/FM radio/CD/mp3 and XM™ capable
- Column-mounted retarder control
- Digital tachometer and speedometer
- Dome light
- Engine hourmeter, oil pressure gauge, coolant temperature gauge, hydraulic oil temperature gauge
- Engine shutdown w/5 minute delay timer
- Floor mat (double barrier)
- Fuel gauge in cab and on tank
- Fuel low level light and buzzer
- Gauges (w/backlight)
- Headlight switch
- Heater and defroster (heavy-duty)
- Heater switch
- High beam selector and indicator
- Horn (center of steering wheel)
- Indicator lights (amber):
 - 5-minute shutdown timer
 - Check engine w/alarm
 - Circuit breaker tripped
 - Coolant high temperature w/alarm
 - Drive system temperature w/alarm
 - Dump body up
 - Dynamic retarding

- Low fuel
- Manual back-up lights
- Parking brakes applied
- Propel system not ready
- Propulsion system caution
- Propulsion system at rest
- Reduced propel system mode
- Retard at continuous level
- Retard speed control
- Service brakes
- Starter circuit
- Indicator lights (blue)
 - Engine service
 - KOMTRAX Plus snapshot (IM)
- Insulation (Max R-Value)
- KOMTRAX Plus
- Operator seat, adjustable w/air suspension, lumbar support and arm rests
- Panel lighting (adjustable)
- Passenger seat, full size
- Payload Meter PLM III
- Power windows
- Pressurized cab air system w/fan on
- Single brake/retarder pedal
- Starter key switch
- Sunvisor (adjustable)
- Tilt & telescoping steering wheel
- Voltmeter (battery output)
- Windshield (tinted safety plate)
- Windshield wiper (dual) and washer (electric)

LIGHTING

- Back-up lights—rear mount (2) halogen
- Back-up lights—R and L - deck mount (2) halogen
- Brake and retard lights on top of cab
- Clearance lights
- Control cabinet service light (LED)
- Dynamic retarding, rear (2) halogen
- Engine compartment service lights
- Fog lights (2) halogen
- Headlights (8) halogen
- Stairway lights
- Manual back-up light, switch and indicator
- Payload lights R and L (LED)
- Platform lights R, L and Center
- Stop & tail lights (2) (LED)
- Turn signals halogen
- Under-hood service lights



OPTIONAL EQUIPMENT

Note: Optional equipment may change operating weight.

- Body liners*
- Fire extinguisher 9 kg **20 lb**
- Heated body
- Hot start engine coolant (220V 2-2500W)
- Hot start engine oil (220V 2-600W)
- Hubodometer (miles or Kilometers)
- Modular Mining Systems (MMS) ready
- Mufflers between frame rails
- Radiator shutters
- Reversed access ladder
- Service center—RH or dual LH/RH
- Special language decals
- Suspensions, cold weather

*Available factory installed or non-installed. All other options and accessories listed are available factory installed only.

AESS743-00

©2007 Komatsu America Corp.

Printed in USA

D2(1.5M)C

2/07 (EV-3)

KOMATSU®

ANEXO B

Hoja técnica Ballard's FCmoveTM-HD 70kW

Fuel Cell Power Module for Heavy Duty Motive Applications

Description

Ballard's FCmove™-HD is the next-generation heavy duty fuel cell power module for use in zero-emission motive applications. The hydrogen fuelled power module offers a durable, compact and easy installation solution for system integrators and vehicle OEMs, backed by Ballard's unmatched fuel cell expertise and experience.



Features

Lower Life Cycle Cost – with better fuel economy and fewer maintenance requirements, total cost of ownership is 35% lower than previous product generations.

Simplified Integration – this complete package, with all subsystems fully integrated, has interfaces located on one panel to provide easier access for connections as well as maintenance.

Robust Components – designed with a new generation of more robust balance of plant components to improve reliability.

System Integration Flexibility – reducing the volume by 40% and weight by 35% has produced a low-profile power module that enables greater flexibility in commercial vehicle design.

Freeze-Start Capability – freeze start from -25°C, with no need to plug in the vehicle or use special start procedures.

Humidification – integrated humidification system is maintenance free and provides maximum system performance and durability through a wide range of environmental conditions.

High Performance – robust PEM fuel cells deliver the power, range, and efficiency demanded by fleet operators.

Proven Reliability & Durability – demonstrated through exceptional fuel cell stack lifetime, with >30,000 hours of operation and 97% module availability in service.

High Temperature Operation – permits a smaller cooling package for integration flexibility and generates HVAC heating, significantly improving overall vehicle fuel economy.

Climate Protection – IP67-rated enclosure system guards against premature deterioration of key module components in extreme climates.

High Pressure System – offers better performance, fuel efficiency and durability by preventing degradation of the fuel cell power module.

Fuel Efficiency – two to three times more efficient than CNG/diesel engines, fuel cell buses reduce overall fuel consumption.

Remote Diagnostics – direct or wireless connection allows customer to monitor performance data remotely, and anticipate preventative maintenance.

Safety Features – integrated safety system with ventilation fans, and hydrogen sensor built into the module to ensure highest safety and ease of installation.

Power to change the world®

PRODUCT SPECIFICATIONS

	FCmove™-HD*
Performance	
Net system power	70 kW
Operating system current	20 - 240 A
Operating system voltage	250 - 500 V
Idle power	8 kW
Physical	
Dimensions (l x w x h) mm, excluding air filter	1525 x 812 x 367
Dimensions (l x w x h) mm, including air filter	1812 x 816 x 415
Weight	250 kg
Environmental protection	IP67
Operating temperature	-30°C – +50°C
Minimum start-up temperature	-25°C
Short-term storage temp	-40°C – +80°C
Reactants and Coolant	
Fuel Type	Gaseous hydrogen
Fuel purity	As per SAE specification J2719
Fuel supply pressure	8 barg nominal
Peak fuel efficiency	57%
Oxidant	Air
Coolant	Ethylene glycol or propylene glycol min 20% to a max 60% by volume, balance DI water
Radiator coolant outlet temperature	60°C nominal
Safety Compliance	
Certifications	ISO 6469-2:2009 ¹ ISO 6469-3:2011 ¹ ISO 23273:2013 ¹
Monitoring	
Control Interface	CANbus
Emissions	
Exhaust	Zero-emissions (no PM, NOx, SOx, CO or CO ₂)
¹ Specific clauses within each standard * Specifications are subject to change without notice	

ANEXO C

Guía de implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan Hidrógeno como combustible en minería

5. DOCUMENTOS DE UN PLAN DE GESTIÓN DEL PROYECTO (PMP)

Para solicitar la autorización de un proyecto minero de implementación de piloto y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería, los antecedentes del proyecto deberán ser ingresados a través de la Oficina de Partes virtual en la página web del Sernageomin, acompañando todos los antecedentes mediante archivos digitales, en formatos entre otros .doc, .xls, .pdf, JPEG, etc.

El siguiente listado de documentos, cubre el plan de gestión del proyecto (PMP) para un proyecto de implementación de piloto y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería. El plan debe dejar claro los objetivos, indicando qué se hará, cómo se hará y el cronograma propuesto para hacerlo.

DOCUMENTO N°1 - DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO PILOTO		
N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN
1.1	Propuesta de proyecto	Se requiere una descripción general del proyecto, un resumen de las principales etapas de su ciclo de vida, el número de personas empleadas, la ubicación y el acceso, historial previo, gestión de contratistas, etc.
1.2	Organización y Roles clave	Organigrama gerencial para la prueba donde las responsabilidades deben estar claramente definidas y asignadas.
1.3	Cronograma de trabajo	Cronograma detallado de trabajo, considerando: Carta Gantt detallada completa del proyecto, cuadro con los Hitos importantes de la prueba y en los que se deba realizar un informe de avance para Sernageomin y programa de evaluación de los resultados de las pruebas y sus modificaciones si corresponde.
1.4	Empresas que dan respaldo y/o habilitación de los equipos de hidrógeno	El titular del proyecto debe acompañar los antecedentes que permitan asegurar que los componentes que se relacionan directamente con la cadena de valor del proyecto de hidrógeno y/o la cadena de producción minera y que son indispensables en el funcionamiento del sistema posean un nivel de conformidad emitido por el fabricante, o en su defecto indique como lo efectuará ¹ .
1.5	Gestión de contratos	
1.6	Proceso de implementación	Detallar diferentes fases de la prueba, en campo abierto o de diseño particular, considerando la gradualidad de la implementación y que represente un escalamiento para posterior uso en mina real.
1.7	Ubicación y accesos	Describir la ubicación donde se llevará a cabo la implementación indicando, mencionando ciudades de referencia y sus coordenadas según sistema WGS84. Adjuntando planos y mostrando su relación con el resto de la operación, detalle de ruta o rutas de acceso al sitio donde se implementará la tecnología, niveles de seguridad, señalética blanda y dura, etc. Finalmente, en este punto es relevante que el proponente describa cualquier condición climática que implique un mayor riesgo de seguridad en la operación del pilotaje. Por ejemplo, minería de alta montaña o de mar.

¹ Se hace presente que la SEC está elaborando un protocolo o norma de certificación de este tipo de instalaciones y equipos. Cuando sea aprobado y difundido, se espera que las instalaciones y equipos sean sometidas a este sistema.

1.8	Objetivo General y específicos	Mostrar a una escala reducida la interacción de los equipos que consumen H ₂ en una implementación de madurez operativa que permita testear su comportamiento operacional y funcional en una muestra representativa, y buscar la aceptación de sus atributos de seguridad por parte de los usuarios.
1.9	Diseño de experimento y validación	
1.10	Resultados esperados de las actividades	

DOCUMENTO N°2 - TECNOLOGÍA Y FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA

N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN
2.1	Composición y equipamiento del sistema de hidrógeno	<p>Descripción detallada de la tecnología, considerando su estrategia de funcionamiento (Filosofía de operación). Se debe presentar un diagrama descriptivo del proceso general y de aquellos específicos. En caso de existir diferentes procesos se deberá realizar un diagrama del proceso general y uno para cada proceso particular o específico. Los diagramas de procesos del ámbito de acción del Sernageomin se pueden resumir en:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Diagrama de procesos de equipos móviles ▸ Diagrama de procesos de estacionamiento y patios de estacionamiento de equipos móviles ▸ Diagrama de procesos en talleres de mantenimiento de equipos móviles <p>En los diagramas de procesos que se presenten, se deberán mencionar las normas de seguridad técnicas que apliquen y que son sugeridas en Anexo D. Además, se deberán describir las producciones o consumos de electricidad en el proceso, resumen del tamaño y tipo de unidades que se desplegarán en la operación minera propuesta. En caso de Retrofitting, se debe especificar las actividades necesarias para el retrofitting que expongan la seguridad del personal y/o las instalaciones mineras.</p>
2.2	Instalaciones dentro del área de operación de sistemas de hidrógeno	Detallar y describir las instalaciones con todos los sistemas y subsistemas partícipes del proceso de consumo de H ₂ en equipos móviles y mantenimiento de equipos de hidrógeno del proyecto presentado. Se debe asegurar coherencia entre la información presentada y el plano del proceso.
2.3	Diagramas de flujo de Sistemas de seguridad y sistemas de control	
2.4	Redundancia del sistema	Explicar los respaldos del sistema.
2.5	Nivel de integridad de seguridad	Interoperabilidad (varios proveedores) de sistemas y detalle de interacción que tendrán entre ellos (niveles de seguridad).

2.6	Cumplimiento de estándares nacionales/ internacionales	<p>Señalar las normativas técnicas y estándares de seguridad nacionales o internacionales que se utilizarán en el diseño, la aplicación, la operación y cierre del proyecto presentado. Como orientación para los proponentes, en Anexo D, se ofrece como sugerencia un listado de normativas técnicas para las diferentes etapas de la cadena de valor del hidrógeno. Además, se puede incluir información técnica de proyectos similares a modo de corroborar experiencia en el desarrollo de proyectos de hidrógeno.</p> <p>En específico se pide que lo descrito responda las siguientes preguntas: ¿Por qué la elección de esos estándares? ¿Cómo van a cumplirse? La respuesta a las preguntas anteriores permitirá completar la matriz de consideraciones normativas que se señala en el Anexo E.</p> <p>Las normas o estándares técnicos incorporados en la matriz de consideraciones normativas (contenido relevante y aplicación) del proyecto deben estar en español.</p>
2.7	Limitaciones del sistema	Levantamiento de las limitaciones especificadas por el proveedor de el o los equipos.

DOCUMENTO N°3 – PLAN GENERAL DE SEGURIDAD Y CONTROL DE EQUIPOS

N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN (no todos los ítems tienen una descripción)
3.1	Estrategia de gestión de riesgos	<p>Se requiere una estrategia de gestión de riesgos que considere entre otros: una matriz de riesgos completa, análisis de capas de protección y seguridad, análisis de seguridad funcional, gestión del cambio, procedimientos de identificación y notificación de peligros para los empleados, inspecciones del lugar de trabajo, monitoreo del ambiente de trabajo, investigaciones de incidentes y alertas de seguridad del regulador. Incluyendo una declaración del compromiso de la empresa con la seguridad y el proceso de identificación, gestión y evaluación de riesgos.</p> <p>Nota: La fase de identificación de riesgos es el paso más importante en el proceso, si no se identifica un riesgo, el proceso de gestión de riesgos es ciego a ese riesgo.</p>
3.2	Capas de protección	Presentar un análisis de capas de protección (LOP, por sus siglas en inglés) para los riesgos principales, describiendo qué capas de protección se tienen consideradas de manera de prevenir los impactos. Dentro de las capas se incluyen herramientas de diseño de proceso y control, instrumentos de seguridad y alarmas, entre otros. Se sugiere incluir 5 capas de seguridad.
3.3	Cálculo del Criterio de Clasificación de Peligro (CCP)	Se debe describir la metodología utilizada y presentar el desarrollo de las memorias de cálculo utilizadas para lograr la estimación del nivel de peligro del proyecto.
3.4	Matriz de riesgos convencional IPER	Describir de manera precisa de qué se trata y evitar el uso de abreviaciones para cada una de las operaciones unitarias y plan de control de intolerables.
3.5	Competencias del equipo de implementación	Se debe respaldar las competencias de todo el personal asignado, tanto gerencial, supervisores, operadores, controladores, etc. Demostrando la formación, experiencia, habilidades y conocimiento necesarios por parte del equipo de trabajo.

3.6	Entrenamiento y supervisión	Presentación del programa para asegurar que todo el personal afectado por la implementación de la tecnología sea consultado, entrenado, supervisado y/o guiado según sea necesario.
3.7	Medios de investigación de fallas	

DOCUMENTO N°4 - COMISIONAMIENTO, MANTENIMIENTO E INSPECCIONES

N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN (no todos los ítems tienen una descripción)
4.1	Proceso de Comisionamiento	Detallar y describir los equipos manuales y sus niveles de autonomía, funcionalidades.
4.2	Plan de mantenimiento e inspección de los equipos que utilizan hidrógeno.	Conjunto y descripción de tareas a los equipos con el fin de cumplir evitar fallas y accidentes, sin poner en riesgo la seguridad de las personas.
4.3	Mantenimiento e inspección de equipos auxiliares	
4.4	Mantenimiento e inspección sistema de control	

DOCUMENTO N°5 - APÉNDICES

N°	DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN
	Apéndice A	Planos
	Apéndice B	Detalle de evaluación de riesgos
	Apéndice C	Plan de respuesta a emergencias
	Apéndice D	Protocolos de inspección
	Apéndice E	Protocolo de pruebas