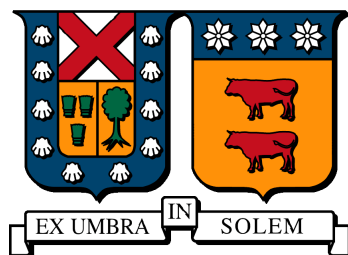


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**SANTIAGO-CHILE**



**PROTOCOLO DE ADAPTACIÓN DE  
CARGADOR FRONTAL MINERO PARA  
OPERAR CON CELDAS DE COMBUSTIBLE  
A HIDRÓGENO COMO FUENTE DE  
POTENCIA**

**LUCAS ARANEDA MÁRQUEZ**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: PH.D. MAURICIO OSSES ALVARADO**  
**PROFESOR CORREFERENTE: PH.D. ANTONIO SÁNCHEZ SQUELLA**

**octubre, 2019**

# Resumen

Motivado por la generación de tecnologías amigables con el medio ambiente aplicadas a la industria minera, es que Chile, a través de sus Programas tecnológicos estratégicos de Corfo, generó un proyecto para implementar el uso de celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia en la minería Chilena.

Para iniciar este trabajo se analizaron las especificaciones técnicas de un cargador frontal marca JCB 456 ZX, de potencia 160 [kW]. Basándose en estas se procedió a identificar las variables energéticas como lo son la potencia y la energía consumida durante un turno de 8 [hrs] de operación. Para simplificar el análisis se determinó un ciclo operacional de 2,11 [min], el cual, se dividió en 4 etapas carga, transporte, descarga y retorno. Siguiendo esta línea investigativa, se procede a reconocer los componentes principales de la adaptación, por lo que se analizó la topología más eficiente para este tipo de tecnología y se identificó la oferta comercial de cada componente. Conociendo las variables operacionales, los componentes y las características técnicas de estos, se generó una estrategia de control para administrar los componentes que entregan potencia al sistema. A partir de esta estrategia se dimensionaron los aparatos de la adaptación. Finalmente se representó de forma gráfica la disposición de los componentes, ya dimensionados dentro del cargador frontal utilizando el software Inventor de Autodesk.

A través de la metodología anteriormente planteada se determinó que las potencias asociadas a cada etapa del ciclo operacional son:  $P_{carga}$  y  $P_{descarga}$  con un valor de 144 [kW],  $P_{transporte}$  de 122 [kW] y  $P_{retorno}$  de -7 [kW]. En cuanto a la energía operacional, esta tomó un valor de 1.372 [MJ]. Analizando esta información se concluyó que los principales aparatos de la adaptación son: una celda de combustible tipo PEM de 100[kW], un sistema de almacenamiento de hidrógeno a presión de 700 [bar] que debe almacenar 25,4 [kgH<sub>2</sub>], un sistema de supercondensadores (SC) de 0,213 [kWh], baterías de Litio que deben acumular un total de 4,55 [kWh] y un motor de imanes

permanentes capaz de suministrar 160 [kW] de potencia y 680 [Nm] de torque. Al realizar esta adaptación se determinó que el aumento porcentual en volumen será de un 144 % y el aumento de peso de un 6 %.

La selección de componentes eficientes y de baja densidad de energía gravimétrica y volumétrica, disminuye el aumento de peso y volumen de la adaptación y promueve un ahorro en el consumo de combustible. La determinación de una estrategia de control correcta hace que la vida útil de los componentes que entregan potencia se extienda y a la vez genere una operación uniforme del cargador frontal. La caracterización del consumo energético y de potencia, a través del tiempo en un turno, se hace una de las tareas más preponderante y el primer paso para verificar la factibilidad del proyecto. En base a esta premisa se recomienda trabajar con datos verdaderos de la operación de un cargador frontal en minería y así determinar las variables eléctricas reales para dimensionar los aparatos de conversión de potencia.

# **Abstract**

# Índice general

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Estado del Arte                                                    | 4  |
| 1.1. ¿Por qué el hidrógeno?                                           | 4  |
| 1.1.1. El hidrógeno como combustible                                  | 4  |
| 1.1.2. Iniciativas pasadas del hidrógeno como combustible alternativo | 5  |
| 1.1.3. El futuro del hidrógeno                                        | 6  |
| 1.1.4. Conclusiones acerca del hidrógeno como fuente energética       | 8  |
| 1.2. Conversión de un cargador frontal de minería subterránea         | 9  |
| 1.2.1. Estimación de la demanda energética en operación.              | 10 |
| 1.2.2. Celdas de combustible                                          | 11 |
| 1.2.3. Sistema de almacenamiento de hidrógeno                         | 11 |
| 1.2.4. Sistema de tracción                                            | 13 |
| 1.2.5. Baterías y el freno regenerativo                               | 17 |
| 1.2.6. Sistema hidráulico                                             | 18 |
| 1.2.7. Sistema de refrigeración                                       | 19 |
| 1.2.8. Montaje Final                                                  | 20 |
| 1.2.9. Aprendizaje de la experiencia                                  | 21 |
| 1.3. Adaptación de autobús urbano                                     | 22 |
| 1.3.1. Bases de diseño para el Bus propulsado por hidrógeno           | 23 |
| 1.3.2. Sistema de seguridad de la adaptación                          | 25 |
| 1.3.3. Sistema de almacenamiento de hidrógeno del bus                 | 26 |
| 1.3.4. Conclusiones acerca de la adaptación del bus                   | 27 |
| 2. Metodología                                                        | 28 |
| 2.1. Selección de vehículo                                            | 30 |
| 2.1.1. Especificaciones técnicas del cargador                         | 30 |
| 2.1.2. Caracterización de los componentes del cargador frontal        | 32 |

|        |                                                                                              |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.     | Demanda energética en operación                                                              | 37 |
| 3.1.   | Determinación de la potencia asociada a cada etapa del ciclo operacional                     | 37 |
| 3.1.1. | Potencia Auxiliar . . . . .                                                                  | 38 |
| 3.1.2. | Potencia Hidráulica . . . . .                                                                | 38 |
| 3.1.3. | Potencia de desplazamiento . . . . .                                                         | 38 |
| 3.2.   | Determinación de la energía consumida en operación . . . . .                                 | 41 |
| 3.3.   | Determinación de la energía recuperable a través del sistema de freno regenerativo . . . . . | 43 |
| 3.4.   | Determinación del consumo energético en un turno de operación . . . .                        | 44 |
| 4.     | Evaluación técnica de las opciones de conversión                                             | 45 |
| 4.1.   | Topologías de un vehículo propulsado por Celdas de combustible . . . .                       | 45 |
| 4.1.1. | Topología Celda de combustible – Baterías. . . . .                                           | 46 |
| 4.1.2. | Topología Celda de combustible - Supercondensador . . . . .                                  | 46 |
| 4.1.3. | Topología Celda de combustible - Baterías - Supercondensador                                 | 47 |
| 4.2.   | Análisis de las celdas de combustible . . . . .                                              | 48 |
| 4.2.1. | Comparación de las celdas de combustible . . . . .                                           | 50 |
| 4.2.2. | Celdas de combustible comerciales tipo PEM . . . . .                                         | 51 |
| 4.3.   | Análisis del sistema de almacenamiento de hidrógeno . . . . .                                | 51 |
| 4.3.1. | Hidrógeno comprimido . . . . .                                                               | 52 |
| 4.3.2. | Hidrógeno Líquido . . . . .                                                                  | 53 |
| 4.3.3. | Hidruros metálicos . . . . .                                                                 | 53 |
| 4.3.4. | Hidruros químicos . . . . .                                                                  | 54 |
| 4.3.5. | Nanoestructuras de carbono . . . . .                                                         | 55 |
| 4.3.6. | Sistema de almacenamiento de hidrógeno comerciales . . . . .                                 | 56 |
| 4.4.   | Análisis de los sistemas complementarios de potencia . . . . .                               | 56 |
| 4.4.1. | Análisis de los supercondensadores . . . . .                                                 | 56 |
| 4.4.2. | Supercondensadores comerciales . . . . .                                                     | 58 |
| 4.4.3. | Análisis de las baterías . . . . .                                                           | 59 |
| 4.4.4. | Baterías comerciales . . . . .                                                               | 63 |
| 4.5.   | Análisis de los motores eléctricos . . . . .                                                 | 64 |
| 4.5.1. | Motores eléctricos de imanes permanentes comerciales . . . . .                               | 65 |
| 4.6.   | Análisis de convertidores e inversores . . . . .                                             | 66 |
| 4.6.1. | Convertidor DC/DC . . . . .                                                                  | 66 |
| 4.6.2. | Inversor DC/AC . . . . .                                                                     | 67 |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. Formulación de la ingeniería conceptual de adaptación                                           | 69 |
| 5.1. Dimensionamiento de la celda de combustible . . . . .                                         | 70 |
| 5.2. Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno . . . .                           | 72 |
| 5.3. Dimensionamiento del sistema complementario de potencia . . . . .                             | 73 |
| 5.3.1. Estrategia de control de potencia . . . . .                                                 | 73 |
| 5.3.2. Dimensionamiento de las baterías . . . . .                                                  | 75 |
| 5.3.3. Dimensionamiento de los Supercondensadores . . . . .                                        | 77 |
| 5.3.4. Resultado de la aplicación de la estrategia de control en el ciclo<br>operacional . . . . . | 80 |
| 5.4. Dimensionamiento del motor eléctrico . . . . .                                                | 81 |
| 5.5. Disposición final de los componentes . . . . .                                                | 81 |
| 5.5.1. Resumen de las dimensiones de los componentes . . . . .                                     | 81 |
| 5.5.2. Flujo energético de la adaptación . . . . .                                                 | 83 |
| 5.5.3. Recomendaciones de disposición de los componentes de la adap-<br>tación . . . . .           | 84 |
| 5.5.4. Representación gráfica de la disposición final de los componentes                           | 84 |
| 6. Conclusiones y recomendaciones                                                                  | 86 |
| 6.1. Conclusiones generales . . . . .                                                              | 86 |
| 6.2. Conclusiones específicas . . . . .                                                            | 88 |
| 6.3. Recomendaciones . . . . .                                                                     | 90 |
| 7. Anexos                                                                                          | 92 |
| 7.1. Anexo 1 . . . . .                                                                             | 93 |
| 7.2. Anexo 2 . . . . .                                                                             | 94 |
| 7.3. Anexo 3 . . . . .                                                                             | 95 |
| 7.4. Anexo 4 . . . . .                                                                             | 97 |

# Índice de figuras

|       |                                                                                                    |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Consumo energético y producción cupífera,2011-2017. . . . .                                        | 1  |
| 1.1.  | Cargador frontal R1300 antes de ser adaptado [7] . . . . .                                         | 9  |
| 1.2.  | Caracterización de la operación del LHD R1300 [7] . . . . .                                        | 10 |
| 1.3.  | Modulo de celdas de combustible de la adaptación del LHD R1300 [7] .                               | 11 |
| 1.4.  | Sistema de almacenamiento de hidrógeno marca HERA [7] . . . . .                                    | 13 |
| 1.5.  | Sistema de tracción del LHD R1300 [7] . . . . .                                                    | 13 |
| 1.6.  | Opciones de la disposición de los motores [7] . . . . .                                            | 15 |
| 1.7.  | Opciones de la disposición del motor eléctrico [7] . . . . .                                       | 15 |
| 1.8.  | Especificaciones técnicas del motor eléctrico [7] . . . . .                                        | 16 |
| 1.9.  | Rendimiento del Motor eléctrico en comparación al motor diésel [7] . .                             | 17 |
| 1.10. | Configuración seleccionada para el sistema de tracción [7] . . . . .                               | 17 |
| 1.11. | Distribución de los componentes electromecánicos en la adaptación del<br>LHD [7] . . . . .         | 20 |
| 1.12. | Esquema del equipo de combustible CGH2 instalado en el autobús [16]                                | 24 |
| 1.13. | Posición de los cilindros de Hidrógeno en el techo del Bus [16] . . . . .                          | 24 |
| 1.14. | Sistema supresor de incendios del Bus [16] . . . . .                                               | 25 |
| 1.15. | Sistema de almacenamiento de hidrógeno del Bus [16] . . . . .                                      | 26 |
| 2.1.  | Cargador frontal marca JCB modelo 456 ZX [13] . . . . .                                            | 30 |
| 2.2.  | Esquema de las dimensiones generales del cargador frontal [13] . . . .                             | 32 |
| 2.3.  | Gráficos de torque y potencia para distintas RPM del motor Cummins<br>6CTA8.3 Turbo [13] . . . . . | 34 |
| 3.1.  | Esquema de las fuerzas que afectan al movimiento del cargador . . . . .                            | 39 |
| 3.2.  | Distribución de las potencias en el ciclo de operación de un cargador<br>frontal minero . . . . .  | 42 |

|       |                                                                                                                                                                               |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.  | Diagrama de flujo de topología Celdas de combustible-Baterías [4] . . .                                                                                                       | 46 |
| 4.2.  | Diagrama de flujo de topología Celdas de combustible-Supercondensadores<br>[4] . . . . .                                                                                      | 47 |
| 4.3.  | Diagrama de flujo de topología Celdas de combustible-Baterías-Supercondensadores<br>[4] . . . . .                                                                             | 48 |
| 4.4.  | Principio de funcionamiento de una celda de combustible de intercam-<br>bio protónico [3] . . . . .                                                                           | 49 |
| 4.5.  | Gráfico Ragone que compara las distintas alternativas de almacena-<br>miento de energía en cuanto a su densidad energética, de potencia y<br>tiempos descargas [11] . . . . . | 57 |
| 4.6.  | Comparativa de costes entre un motor de imanes permanentes y un mo-<br>tor de inducción [10] . . . . .                                                                        | 64 |
| 4.7.  | Circuito eléctrico conversor Boost . . . . .                                                                                                                                  | 66 |
| 4.8.  | Circuito eléctrico conversor Buck . . . . .                                                                                                                                   | 67 |
| 5.1.  | Distribución de la potencia en función del tiempo de la celda de com-<br>bustible en un ciclo operacional . . . . .                                                           | 71 |
| 5.2.  | Diagrama de flujo de la estrategia de control del sistema de generación<br>y almacenamiento de energía de la adaptación . . . . .                                             | 75 |
| 5.3.  | Variación de la potencia de la batería en función del tiempo durante un<br>ciclo operacional . . . . .                                                                        | 77 |
| 5.4.  | Variación de la potencia del supercondensador en función del tiempo<br>durante un ciclo operacional . . . . .                                                                 | 79 |
| 5.5.  | Potencia en función del tiempo de los distintos componentes de la adap-<br>tación durante un ciclo operacional . . . . .                                                      | 80 |
| 5.6.  | Energía en función del tiempo de los distintos componentes de la adap-<br>tación durante un ciclo operacional . . . . .                                                       | 80 |
| 5.7.  | Representación del aumento de volumen en la adaptación . . . . .                                                                                                              | 82 |
| 5.8.  | Topología de la adaptación . . . . .                                                                                                                                          | 83 |
| 5.9.  | Representación gráfica de la distribución de los componentes de la<br>adaptación . . . . .                                                                                    | 85 |
| 5.10. | Representación gráfica de la disposición de los componentes en el car-<br>gador frontal . . . . .                                                                             | 85 |

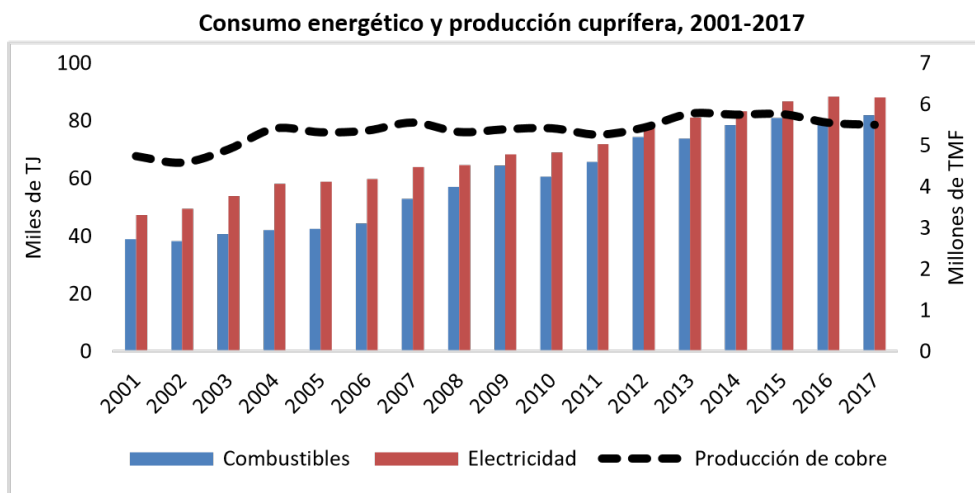
|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1. Resumen de especificaciones de funcionamiento en la tecnología de celdas de combustible [3] . . . . . | 93 |
| 7.2. Comparación de las características técnicas de las celdas de combustible [3] . . . . .                | 94 |
| 7.3. Capacidad de almacenamiento de distintas nanoestructuras de carbono [3]                               | 95 |

# Índice de tablas

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Requisitos del almacenamiento de hidrógeno [7] . . . . .                                                 | 12 |
| 2.1. Características técnicas del cargador frontal JCB 456 ZX [13] . . . . .                                  | 31 |
| 2.2. Dimensiones generales del cargador frontal JCB 456 ZX [13] . . . . .                                     | 32 |
| 2.3. Especificaciones técnicas del motor diésel CUMMINS 6CTA8.3 Turbo .                                       | 33 |
| 2.4. Relación de giro para las distintas marchas de la transmisión del carga-<br>dor frontal [13] . . . . .   | 34 |
| 2.5. Especificaciones técnicas des sistema hidráulico de carga [13] . . . . .                                 | 36 |
| 3.1. Datos evaluados para determinar la potencia asociada a cada etapa del<br>ciclo operacional . . . . .     | 40 |
| 3.2. Tiempos asociados a cada etapa del ciclo operacional [15] . . . . .                                      | 42 |
| 4.1. Características técnicas de las celdas de combustibles comerciales . . .                                 | 51 |
| 4.2. Características de Supercondensadores disponibles en el mercado . . .                                    | 59 |
| 4.3. Comparativa de diferentes tipos de baterías [17] . . . . .                                               | 63 |
| 4.4. Características de las baterías de Litio disponibles en el mercado . . . .                               | 63 |
| 4.5. Características de los motores eléctricos de imanes permanentes dispo-<br>nibles en el mercado . . . . . | 65 |
| 5.1. Resumen de los componentes de la adaptación . . . . .                                                    | 81 |
| 7.1. Características de sistemas de almacenamiento de hidrógeno disponi-<br>bles comercialmente . . . . .     | 97 |

# Introducción

La minería chilena, en el transcurso de los últimos 17 años, no sólo ha aumentado su producción sino que también el consumo de combustibles fósiles, principalmente diésel, desarrollando una fuerte dependencia energética y haciendo de este sector uno de los más contaminantes a nivel nacional [5]. Es por esto que se hace necesario desarrollar nuevas tecnologías para migrar desde combustibles que generan un alto impacto ambiental hacia combustibles sustentables. Es aquí que se ve una oportunidad en el hidrógeno como fuente de energía limpia, que podría favorecer una producción minera menos contaminante.



Fuente: Cochilco.

Figura 1: Consumo energético y producción cuprífera, 2011-2017.

Chile tiene la capacidad de ser parte activa de las innovaciones tecnológicas que se están experimentando actualmente a nivel mundial, pudiendo ser un ejemplo en la

región y el mundo, si utiliza las cualidades del territorio en que está emplazado y las riquezas naturales que este posee, apuntando al desarrollo del sector productivo. A partir de lo antes mencionado, y siguiendo la línea que lleva Chile en cuanto a sustentabilidad y la generación de energías limpias expresados en el Acuerdo de París ratificado por la nación el 11 de abril del 2017, es que el país ha desarrollado fuertemente la explotación del recurso solar que posee, viéndose fomentada por la producción, no sólo de energía eléctrica, si no que de otras fuentes de acumulación y procesos, alineados con el sector minero, industrial y la desalinización de agua entre otras áreas.

En estos días está en auge el desarrollo de tecnologías asociadas a la electro movilidad, y debido a las ventajas que posee Chile en cuanto a recursos naturales y la posibilidad de generar energía de manera limpia y sustentable es que las políticas país están fomentando la implementación de esta tecnología en diferentes sectores, como lo son el transporte público y privado, y a la vez en el área productiva. Actualmente, el gobierno a través de sus “Programas Tecnológicos estratégicos” pretende aumentar la innovación en estos sectores, respaldándose en la sustentabilidad y la utilización de energías limpias en el área productiva del país. Así, promovido por Corfo, se crea “ADAPTACIÓN DE LA OPERACIÓN DE EQUIPOS MÓVILES MINEROS DE DIÉSEL A HIDRÓGENO MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLES”. Este proyecto pretende aportar en el Desafío de Sustentabilidad de la Minería en Chile, ya que al utilizar celdas de hidrógeno como fuente de potencia la huella de carbono es nula, pensando en que la obtención de este combustible es a través de hidrólisis y que la energía eléctrica proviene de fuentes renovables. El proyecto inicia con la etapa de prototipos y generación de protocolos para la posterior implementación en la minería, para ello se pretende realizar un análisis de la operación de las máquinas mineras de transporte a fin de conocer su demanda energética y de esta manera dimensionar los sistemas electromecánicos de reemplazo, finalizando en un protocolo que determine cómo hacer la adaptación en futuras aplicaciones.

A razón de lo anterior y con la finalidad de generar una metodología que permita dimensionar los componentes de un tren motriz con una base energética en el hidrógeno, es que el actual trabajo desarrolla un protocolo para analizar la factibilidad técnica, a nivel de perfil, de la adaptación de un cargador frontal Minero para que opere con celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia.

# Objetivos

## 1. Objetivo Principal

Generar un protocolo de adaptación de un cargador frontal, utilizado en minería, para que opere con celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia.

## 2. Objetivos Específicos

- Revisar experiencias internacionales sobre conversión de máquinas mineras para operación con hidrógeno.
- Caracterizar las variables técnicas de configuración y operación del cargador frontal a convertir.
- Evaluar técnicamente las opciones de conversión para operar con celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia.
- Formular la ingeniería conceptual de adaptación del cargador frontal.

# Capítulo 1

## Estado del Arte

En este capítulo se analiza porque el hidrógeno es una alternativa viable y con grandes proyecciones como fuente de energía en el área del transporte autónomo de máquinas y vehículos. También se realiza una revisión de las experiencias internacionales relacionadas con la utilización de hidrógeno como fuente de energía dentro de un tren de potencia. Se examina la conversión de un cargador frontal de minería subterránea, el cual fue adaptado para operar con celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia y por otra parte, se analiza la conversión de un autobús urbano que fue adaptado para operar con un motor de combustión interna que utiliza como combustible hidrógeno gaseoso.

### 1.1. ¿Por qué el hidrógeno?

El hidrógeno es uno de los elementos primigenios del universo y el más abundante en este. Es la fuente energética de la gran mayoría de las estrellas, entre ellas el sol, y por ende es el encargado de dar potencia a nuestro planeta y es responsable de la gran mayoría de las fuentes de energía del mundo y además de la vida en este. En esta sección se analiza la importancia del hidrógeno como combustible no contaminante y porque es una alternativa factible en un futuro.

#### 1.1.1. El hidrógeno como combustible

El poder calorífico del hidrógeno es de  $120.000 \text{ [kJ/kg]}$  por lo que su densidad energética es casi 3 veces mayor que la del petróleo, al reaccionar con el oxígeno ge-

nera agua por lo que lo que su emisiones de  $CO_2$  y  $CO$  son nulas, lo que lo hace una alternativa para la migración a fuentes de energía no contaminantes. Este combustible generalmente se encuentra en forma gaseosa por lo que sus reacciones son más rápidas, fáciles y eficientes. Además es utilizado no solo en motores de combustión interna si no que también en sistemas electroquímicos, llamados celdas de combustible, que a través de reacciones químicas es capaz de generar energía eléctrica, esto promueve al hidrógeno en el desarrollo de tecnologías asociadas a la electromovilidad, mejorando la autonomía de este tipo de vehículos debido a su alto contenido energético y capacidad de almacenamiento.

### **1.1.2. Iniciativas pasadas del hidrógeno como combustible alternativo**

En la década de 1970 surgió un gran interés en el hidrógeno como combustible alternativo, principalmente debido al alza del precio del petróleo, la escasez de este y por la preocupación puesta en la contaminación del aire y la lluvia ácida. Las proyecciones indicaron que, a largo plazo, el hidrógeno producido a partir de carbón o electricidad nuclear podría desempeñar un papel importante en el suministro de energía. El interés disminuyó a medida que aumentó la extracción de petróleo, los precios descendieron, la energía nuclear enfrentó una resistencia a nivel social y debido a las nuevas medidas de control para prevenir la contaminación del aire.

En la década de 1990, la preocupación por el cambio climático estimuló más estudios sobre el hidrógeno, con un enfoque particular en energías renovables y el transporte. En 1993 Japón anunció un financiamiento de JPY 4.500 millones para los primeros cuatro años de su Programa NET para el comercio internacional de hidrógeno basado en energías renovables. La Comisión Europea y el Gobierno de Quebec asignaron alrededor de CAD 33 millones para explorar el uso y almacenamiento de hidrógeno, incluido el transporte internacional de este combustible. Los principales fabricantes de automóviles presentaron automóviles de hidrógeno gracias al rápido progreso en la tecnología de celdas de combustible. Pero debido a que los precios del petróleo se mantuvieron bajos, el apoyo que podría haber movido estos proyectos más cerca de la implementación en la industria, desapareció.

A principios de la década del 2000, la preocupación por el cambio climático había

comenzado a traducirse en una política renovada en torno al hidrógeno. Las acciones dirigidas al sector del transporte y las preocupaciones por el alza del precio del petróleo resurgieron. En el 2003 el desarrollo de vehículos impulsados por hidrógeno se vio frustrado debido a la necesidad de desarrollar infraestructura para que el uso de este combustible sea factible en las ciudades. Para el 2010, las expectativas de hidrógeno disminuyeron con la baja en el precio del petróleo. Por otra parte el potente desarrollo de vehículos eléctricos a baterías hizo que los vehículos a hidrógeno pasaran a segundo plano.

### **1.1.3. El futuro del hidrógeno**

El hidrógeno nunca ha tenido tanto interés internacional e intersectorial, incluso frente al impresionante progreso de otras tecnologías energéticas bajas en emisión de carbono, como las baterías y energías renovables no convencionales. A medida que el costo de las tecnologías ha disminuido y la ambición de abordar el cambio climático y la contaminación ha aumentado, se ha destacado al hidrógeno como un complemento flexible y una excelente alternativa. Si bien el nivel de inversión actual sigue siendo muy modesto y los desafíos de implementación son significativos, se ha abierto una verdadera ventana de oportunidades para la política y la acción en el sector privado.

El número de países que están estableciendo objetivos ambiciosos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero continúa aumentando, y con ello el número de sectores que consideran el uso del hidrógeno. El enfoque en la reducción de emisiones a casi cero para mediados de siglo se ha intensificado. Estas emisiones se encuentran en sectores y aplicaciones para las cuales la electricidad no es muy factible de implementar, y las soluciones directas basadas en este tipo de energía tienen altos costos o inconvenientes técnicos. Las cuatro quintos partes de la demanda total de energía final, por parte de los usuarios, son combustibles que contienen carbono. Además, gran parte de la materia prima para productos químicos y otros productos contiene carbono y generan emisiones de  $CO_2$  durante su procesamiento. Las fuentes de emisiones difíciles de reducir incluyen la aviación, el transporte marítimo, la producción minera, fabricación de productos químicos, calor industrial a alta temperatura, carreteras de larga distancia, el transporte, especialmente en entornos urbanos densos o fuera de la red, y calor para edificios. Estos sectores han hecho progresos limitados para reducir sus emisiones de carbono, debido a los costos y problemáticas que conlleva la

implementación de tecnologías de control de emisiones. Como un portador de energía química baja en carbono, el hidrógeno es una opción líder para reducir las emisiones, porque puede almacenarse, quemarse y combinarse en reacciones químicas de manera similar al gas natural, petróleo y carbón.

El hidrógeno puede respaldar la seguridad energética de varias maneras. Cuando se combina hidrógeno junto a infraestructura eléctrica, la electricidad se puede convertir en hidrógeno y viceversa, lo que hace que los usuarios finales sean menos dependientes de recursos energéticos específicos y aumentando la resistencia de los suministros de energía. Si se desarrolla la infraestructura adecuada, podría ser interesante en el futuro diversificar la economía de los países al exportar hidrógeno. Los países con el potencial de producción de hidrógeno están en todo el mundo, y muchos exportadores de energía actuales también están dotados de recursos renovables que podrían producir este combustible. El fortalecimiento del mercado del hidrógeno permitiría el almacenamiento de energía eólica y solar, esto podría proporcionar una alternativa para que los países tengan reservas de energía estratégica. El uso de hidrógeno en lugar de combustibles que contienen carbono en usos finales de energía también podría mejorar los resultados ambientales y de salud en zonas urbanas y a nivel mundial.

La disminución de los costos de las energías renovables es una de las fuerzas que impulsa el potencial del hidrógeno hacia arriba. Varios países y regiones ahora tienen objetivos ambiciosos para producir electricidad que viene de fuentes bajas en carbono, con Australia apuntando al 100 % para 2025, la prefectura de Fukushima a 2040, Suecia para 2040, California para 2045 y Dinamarca para 2050. El objetivo de la Unión Europea de reducir las emisiones en un 80-95 % para 2050 en comparación con los niveles de 1990, implica casi una completa descarbonización de la generación de energía y altos niveles de energías renovables no convencionales. Debido a que el hidrógeno se puede almacenar o usar en una variedad de sectores, la conversión de electricidad en hidrógeno puede ayudar a igualar la oferta y la demanda de energía variable, tanto temporal como geográficamente, junto con alternativas como la energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo y baterías. Si la generación de energía renovable se vuelve lo suficientemente barata y generalizada, puede ser usada no solo para proporcionar electricidad baja en carbono, sino también para crear hidrógeno que puede desplazar los combustibles fósiles en el transporte, la calefacción y las materias primas industriales, y de hecho casi cualquier aplicación no susceptible a la electrificación.

Alrededor de 11.200 autos propulsados por hidrógeno ya están en circulación en todo el mundo, y los conductores pueden elegir entre varios vehículos en el mercado. Debido a las ventajas específicas del hidrógeno en cuanto a almacenamiento, más de 20.000 grúas horquillas de hidrógeno están en uso. Cuando la AIE publicó su Roadmap Hydrogen and Fuel Cells en 2015, el primer FCEV disponible comercialmente con tecnología del hidrógeno se había lanzado recientemente y solo habían 80 estaciones de reabastecimiento de este combustible, ahora hay 381 estaciones de repostaje de hidrógeno en funcionamiento. Alrededor de 275.000 sistemas de cogeneración de celdas de combustible, alimentados con gas natural, se han instalado en Japón, y se informa que los costos rondan un tercio de su nivel de 2015 (una décima parte de su nivel de 2005). La durabilidad es de hasta 10.000 horas, y se han reportado celdas de combustible estacionarias que funcionan 80.000 horas. Es por este auge en el desarrollo de tecnologías de celdas de combustible es que el hidrógeno es capaz de generar energía eléctrica de manera eficaz.

#### **1.1.4. Conclusiones acerca del hidrógeno como fuente energética**

El hidrógeno es la fuente de energía del universo con una gran densidad energética y eficiencia al reaccionar con el oxígeno. Es capaz de suplantar a otros combustibles con la cualidad de no generar gases contaminantes ya que al reaccionar con el oxígeno genera agua.

El interés por el hidrógeno nunca ha sido tan intenso como en estos momentos, ya que su futuro es prometedor como un excelente acumulador de energía, por su capacidad de producirse en varios lugares del mundo, ser compatible con los desafíos de cambio climático propuestos por los países y ser una fuente de energía química capaz de convertirse en calor y electricidad. Además es transportable y por ende es una alternativa como fuente energética en el transporte a pequeña y gran escala. Generando así un aumento en la salud de las zonas urbanas y aportando en la disminución del calentamiento global.

## 1.2. Conversión de un cargador frontal de minería subterránea

En esta sección se resume el trabajo realizado entre los años 2004 y 2008 por el departamento de energía de Estados Unidos en cooperación con privados, entre ellos la empresa Fining, los cuales desarrollaron un proyecto de adaptación de un cargador frontal de minería subterránea, marca Caterpillar modelo R1300, conocidos de manera genérica como load haul dump (LHD) [7]. En este se estudiaron las características técnicas y la demanda energética en operación del cargador. Con esta información se generó un paquete de componentes electromecánicos los cuales utilizan celdas de combustible a hidrógeno como fuente de energía, así el cargador frontal operará de manera eficaz y con cero emisiones contaminantes. A través de esta iniciativa se demostró que es posible desarrollar un LHD que opere con Celdas de combustibles. La utilización de esta tecnología en minería subterránea conlleva una disminución en la emisión de gases contaminantes al interior de la mina y por ende se mejoran las condiciones de salud que tienen los trabajadores en el medio donde desarrollan sus faenas diarias. Por otra parte se reduce el flujo de extracción de gases desde lo túneles, disminuyendo los costos de esta operación debido a la baja en el consumo energético que tiene los ventiladores. Esto motiva la idea de cero emisiones en la minería subterránea.



Figura 1.1: Cargador frontal R1300 antes de ser adaptado [7]

### 1.2.1. Estimación de la demanda energética en operación.

Para iniciar el diseño de la adaptación se hizo necesario definir las especificaciones de rendimiento que se espera que la máquina cumpla. Como se adaptó una máquina operativa, esta misma proporcionó la información correspondiente a ciclos de trabajo estándar, generando así un punto de referencia de la demanda energética del LHD. Para cuantificar el rendimiento del cargador R1300 se realizaron una serie de pruebas en el Campo de Pruebas de Caterpillar en Peoria, Illinois, EE.UU. Se proporcionó la información de distintos ciclos de trabajo de un LHD, dentro de esta se describe la geometría de los entornos donde se desempeña la máquina, cargas que transporta, velocidades a las que debe moverse dentro de la mina y otros datos relevantes para la realización de los ensayos. El equipo de Caterpillar diseñó las pruebas basándose en el peor de los casos, es decir, el ciclo de trabajo más exigente a nivel energético y de potencia de los distintos subsistemas que componen el cargador, entre ellos sus principales, tracción e hidráulicos. Durante las pruebas se monitoreó la demanda energética segundo a segundo de los dos sistemas principales, ya que estos alimentan a los otros subsistemas del cargador. El resultado de este estudio generó información que fue herramienta preponderante para la decisión de continuar o no con el proyecto, ya que se analizó la factibilidad técnica y económica de este.

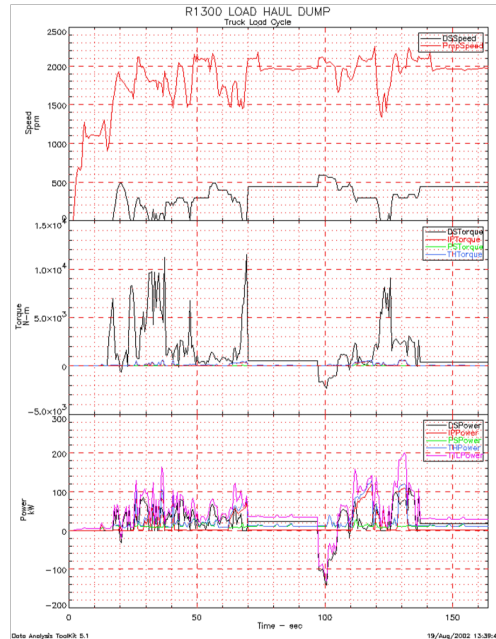


Figura 1.2: Caracterización de la operación del LHD R1300 [7]

### 1.2.2. Celdas de combustible

Una vez establecidos los requisitos y especificaciones de la demanda energética operacional, se procedió a generar la configuración del sistema de la celda de combustible. La elección del tipo de fuente de energía fue la membrana de intercambio de protones o PEM debido a su gran disponibilidad en el mercado ya que existen varios fabricantes de este tipo de componentes. El módulo consta de 3 paquetes de celdas de combustible PEM, de 290 V, 300 A, con una potencia de salida bruta de 87 kW.



Figura 1.3: Modulo de celdas de combustible de la adaptación del LHD R1300 [7]

### 1.2.3. Sistema de almacenamiento de hidrógeno

Las condiciones generales que debe cumplir el almacenamiento de hidrógeno según este proyecto son:

- Baja tasa de liberación en caso de fugas.
- Capacidad suficiente para al menos un turno de trabajo.
- Capacidad suficiente para más de un turno de trabajo para aplicaciones estacionarias.

- Reabastecimiento de combustible subterráneo.
- Reabastecimiento rápido de combustible (comparable al tiempo de vehículos diesel)
- Reabastecimiento de combustible por el operador durante el trabajo de producción.
- El medio de almacenamiento no será tan pesado como para exceder las limitaciones de peso total del vehículo y para maximizar la eficiencia del vehículo (carga útil relativa al peso del vehículo vacío)

En este caso se seleccionó el sistema de hidruro metálico debido a sus características de seguridad, ya que opera a bajas temperaturas y bajas presiones por lo que en el caso de rupturas en el sistema, el hidrógeno almacenado se liberará más lentamente que en el caso de hidrógeno comprimido, promoviendo bajas concentraciones del gas en el medio ambiente y por ende disminuyendo las posibilidades de ignición. En contraparte este tipo de almacenamiento tiene una alta razón precio/almacenamiento y peso/almacenamiento. En la tabla 1.1 se detallan las características técnicas que debe cumplir el almacenamiento de hidrógeno.

|                           |                                                    |
|---------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Capacidad</b>          | 14 kg                                              |
| <b>Flujo de hidrógeno</b> | Máxima potencia 840 l/min a 3,1 bar                |
|                           | Media potencia 420 l/min a 1.9 bar                 |
| <b>Presión máxima</b>     | 7.8 bar                                            |
| <b>Reabastecimiento</b>   | Duración no más de 30 minutos                      |
| <b>Diseño</b>             | No debe interferir con la visibilidad del operador |
| <b>Mecánica</b>           | Debe soportar vibraciones propias de la operación  |

Tabla 1.1: Requisitos del almacenamiento de hidrógeno [7]

El sistema de almacenamiento de hidruro metálico seleccionado fue de marca HE-RA (Figura 1.4), el cual se puede reabastecer en 15 minutos. La seguridad del sistema se ha incrementado al reducir la piroforicidad del hidruro metálico. Los 14 kg de hidrógeno se almacenan en cuatro tanques separados.



Figura 1.4: Sistema de almacenamiento de hidrógeno marca HERA [7]

#### 1.2.4. Sistema de tracción

Para seleccionar correctamente el motor eléctrico de propulsión es necesario conocer las características del sistema de tracción con que cuenta el LHD R1300, este es propulsado por un motor diésel tradicional. La potencia se transmite desde el motor (6) al convertidor de torque (5) a la transmisión (4) al eje de transmisión superior (2) al engranaje de transferencia (1) al diferencial trasero (15) y a través de una serie de impulsores Ejes (9, 11, 13) al diferencial delantero. Esta disposición proporciona potencia a las cuatro ruedas, característica importante del tren de tracción que se debe tener en cuenta al evaluar opciones alternativas.

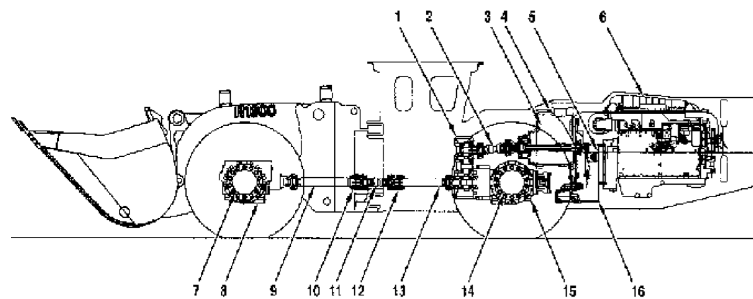


Figura 1.5: Sistema de tracción del LHD R1300 [7]

Las consideraciones principales para seleccionar el tipo de tracción fueron, cumplir con los requisitos de tracción, velocidad y la capacidad de empaquetarse en el espacio disponible en el chasis del LHD R1300. La demanda de potencia de cada eje varía considerablemente según el funcionamiento de la máquina, la mayoría del flujo energético se puede aplicar al eje delantero cuando la máquina está cavando, y luego puede revertirse al eje trasero cuando el cucharón se empuja hacia abajo.

Se analizaron 3 tipos de disposiciones del motor. Primero la configuración de un solo punto de transmisión mantiene todas las ventajas inherentes de la máquina con tracción en las cuatro ruedas. En la segunda configuración se separa la transmisión, es decir, se posiciona en cada diferencial un motor, esto elimina la necesidad de ejes de transmisión; pero cuando un eje exige toda la potencia de propulsión, un motor debe proporcionar el 100 % de ese torque y potencia. La implicación es que cada motor debe ser capaz de ser independiente, proporcionando la potencia completa a un solo diferencial, de esta forma hay pocas oportunidades de reducir el tamaño de los dos motores en relación con la opción de un solo punto de transmisión. La tercera configuración independiza cada rueda proporcionando a cada una un motor, eliminando la necesidad de ejes de transmisión y diferenciales, teniendo la ventaja de un empuje máximo alcanzable en condiciones de tracción desigual. Sin embargo, las ruedas individuales pueden exigir el 50 % de la potencia, lo que significa que cada uno de los motores de las cuatro ruedas debe proporcionar aproximadamente la mitad de la capacidad.

A continuación se presenta la disposición de cada una de las configuraciones, donde los bloque verdes son los motores, los amarillos el sistema de transmisión y los grises las ruedas.

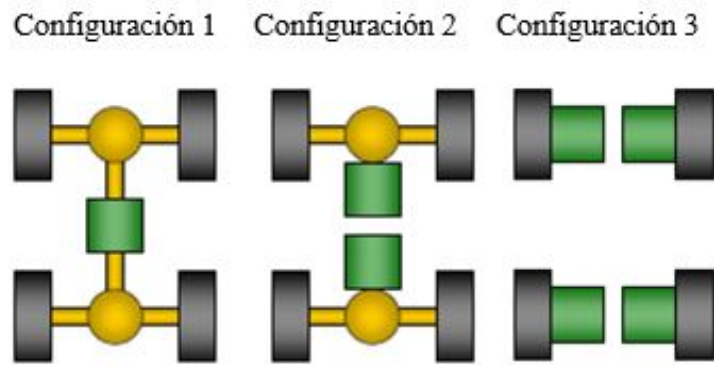


Figura 1.6: Opciones de la disposición de los motores [7]

Después de seleccionar la primera configuración por sus ventajas inherentes, se examinaron varias implementaciones diferentes. Cada uno fue evaluada por su capacidad de rendimiento, complejidad y capacidad de empaquetarse dentro del espacio disponible en la máquina. A continuación se ve un diagrama que muestra varias opciones de disposición del motor eléctrico.

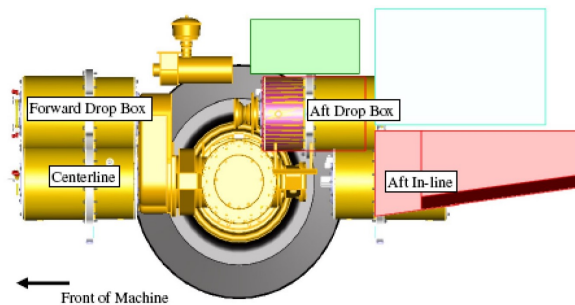


Figura 1.7: Opciones de la disposición del motor eléctrico [7]

**Forward Drop Box:** Esta opción no era factible dado que por el tamaño del motor de propulsión, este interfiere con la dirección.

**Centerline:** Esta opción elimina el cuadro desplegable y baja el centro de gravedad, lo que es bueno para la estabilidad. Sin embargo, esto requeriría engranajes de reducción de velocidad en cada extremo del motor y un eje de transmisión muy corto entre la parte delantera del mismo, los engranajes de reducción y el eje de transmisión central. Esta longitud corta podría resultar en una vida útil insuficiente de la junta universal.

Aft Drop Box: Esta opción requiere el menor rediseño y modificación, ya que es la más similar a la disposición de transmisión mecánica convencional. Sin embargo, esta ubicación podría interferir con el módulo las celdas de combustible.

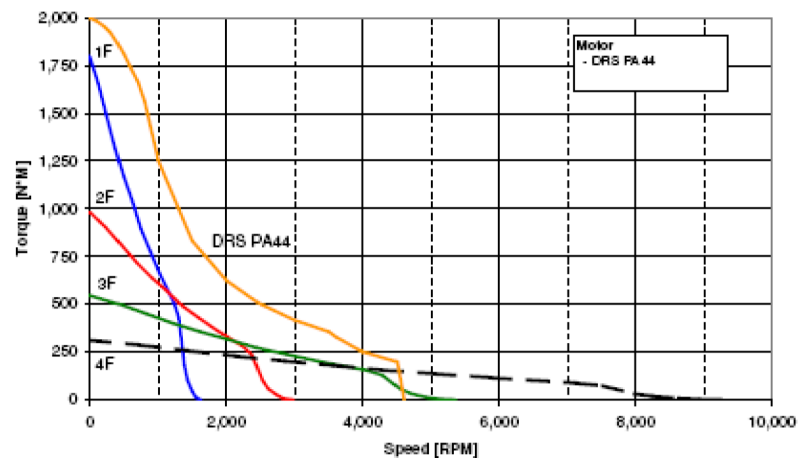
Aft In-Line: Esta opción elimina el cuadro desplegable y baja el centro de gravedad. Requiere que el diferencial trasero se convierta en una unidad de paso, y la bandeja vertical también puede necesitar modificaciones. La tensión del engranaje cónico aumenta debido a la transmisión, lo que no debería ser un problema para la máquina. Esta configuración es finalmente la seleccionada para cumplir con los requisitos.

El motor seleccionado fue el DRS PA44 debido a las especificaciones técnicas de este, las cuales cumplen con los requerimientos proporcionados por el análisis de la operación del LHD. A continuación se presentan estas características.

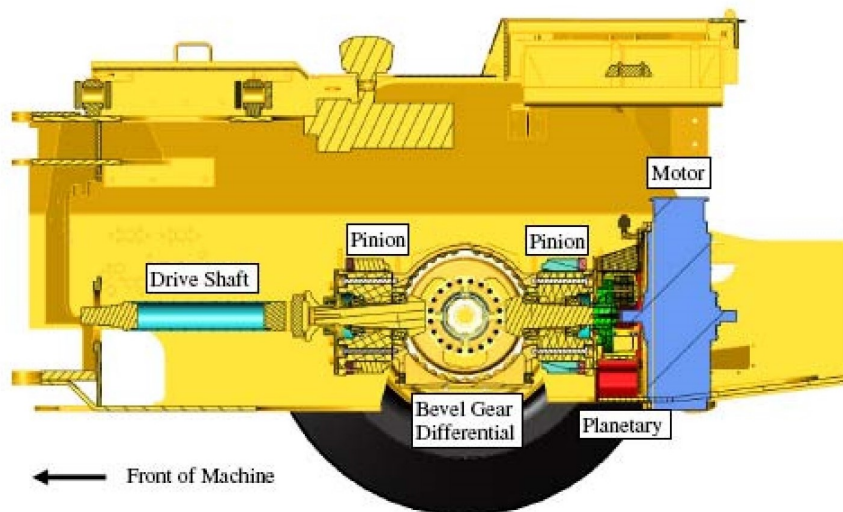
|                                                                                                                              |                                               |                                                  |                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Performance Specifications</b> (6-step, series connection)*                                                               |                                               | <b>Mechanical</b>                                |                                           |
| Rated power .....                                                                                                            | .450 HP (336 kW)                              | Diameter .....                                   | .25.5 inches (648 mm)                     |
| Maximum speed .....                                                                                                          | 3600 rpm                                      | Length .....                                     | .8.8 inches (224 mm)                      |
| Efficiency @ rated power .....                                                                                               | .95%                                          | Standard shaft type .....                        | .DIN 5480 Spline (W60 x 2 x 30 x 28 x 9g) |
| Pole pairs .....                                                                                                             | .14                                           | Mounting .....                                   | .24.6 inches (625 mm) bolt circle         |
| Torque constant .....                                                                                                        | .3.52 lb-ft/A rms (4.78 Nm/A rms)             | Weight .....                                     | .395 lbs. (195 kg)                        |
| Maximum torque .....                                                                                                         | .1,475 lb-ft (2,000 Nm)                       | Moment of inertia .....                          | .0.9 Kg m <sup>2</sup>                    |
| Maximum current .....                                                                                                        | .425 A rms                                    | <b>Environmental</b>                             |                                           |
| Power @ maximum speed .....                                                                                                  | .342 HP (255 kW)                              | Cooling .....                                    | Liquid (water/glycol)                     |
| Torque @ maximum speed .....                                                                                                 | .500 lb-ft (678 Nm)                           | Maximum cooling inlet temperature .....          | .120°F (49°C)                             |
| Phase inductance .....                                                                                                       | .120 µH                                       | Coolant flow rate .....                          | .7 gpm, 26.6 lpm (3.5 gpm per stator)     |
| Phase resistance .....                                                                                                       | .48 mOhm                                      | Maximum allowable motor stator temperature ..... | .302°F (150°C)                            |
| Voltage constant .....                                                                                                       | .0.24 V/rpm (240 V amplitude @1,000 rpm)      | Operating ambient temperature range .....        | .-40 to 140°F (-40 to +60°C.)             |
| Rated voltage .....                                                                                                          | .800 V peak                                   | Motor bearing design life @ rated power .....    | .10,000 hours                             |
| Frequency constant .....                                                                                                     | .0.233 Hz/rpm (233 Hz @ 1,000 rpm)            | Shaft position sensing .....                     | .Integral resolver, 5 Vrms, 2500 Hz       |
| Power source .....                                                                                                           | .500 HP PWM Inverter, DRS MD500 or equivalent | Rotor temperature sensing (optional) .....       | .Infrared non-contact probe               |
| * Performance specifications are presented for 6-step series connection. Consult DRS for other connections and/or waveforms. |                                               | Stator temperature sensing .....                 | .Thermistor, two in each stator           |

Figura 1.8: Especificaciones técnicas del motor eléctrico [7]

Se puede observar en la Figura 1.9 que la opción eléctrica es capaz de proporcionar más torque que el motor diésel del R1300 a baja velocidad en la 1ª marcha y casi el mismo torque en la velocidad máxima en la 3ª marcha. También se puede observar que el motor eléctrico es capaz de proporcionar un torque significativamente mayor que el de la máquina en la mayor parte del rango operativo. En azul, rojo, verde y punteada las marchas 1, 2, 3, 4, del cargador con motor diésel y en amarillo el motor eléctrico.



En la Figura 1.10 se representa la configuración final del sistema de tracción de la adaptación.



### 1.2.5. Baterías y el freno regenerativo

Al ser la fuente de potencia una celda de combustible y no un sistema de generación continua de energía que se transporte a través de un cable de sujeción, se hace necesario optimizar el peso y volumen que ocupa el conjunto de transmisión y el sistema hidráulico, es por esto que se pensó en el desarrollo de una máquina híbrida, es

decir, que combine celdas de combustible a hidrógeno con baterías de almacenamiento, el paquete de baterías está compuesto por 108 celdas níquel-metal hidruro (NiMH) capaces de adicionar al sistema 75 kW de potencia durante unos 5 minutos, generando una potencia máxima de 140 kW para ocasiones como la carga y descarga del material. Para hacer más eficiente la operación se incorporó al proyecto un sistema de freno regenerativo que acumulan la energía cinética durante el frenado en las baterías, en este caso se seleccionó un sistema en paralelo de Freno mecánico-eléctrico debido a que, de esta manera, se puede acumular más energía.

### **1.2.6. Sistema hidráulico**

El sistema hidráulico está compuesto por tres sistemas separados: el sistema hidráulico de carga, el sistema hidráulico de frenado (que comparten un tanque de acumulación) y el sistema hidráulico de la dirección que es un circuito cerrado y paralelo.

El sistema de flujo compartido demuestra distintas ventajas sobre un sistema estándar, especialmente para aplicaciones de cargadoras de ruedas. Durante la operación, hay una participación simultánea constante del cucharón, la pluma y, posiblemente, los sistemas auxiliares, lo que permite realizar operaciones paralelas, es decir, levantar y vaciar mientras se carga la carretilla, retroceder y levantar durante la carga, etc. En un sistema estándar, cuando el flujo de la bomba es insuficiente para satisfacer la demanda de todos los actuadores elegidos, el actuador con la presión más alta disminuye o se detiene por completo. En comparación, un sistema de flujo compartido reduciría automáticamente el caudal para ambos actuadores en el mismo porcentaje. El operador de la máquina no tiene que prestar atención a esa parte de la carga, lo que significa que los menos experimentados pueden utilizarla de igual manera.

Para llevar a cabo esta función de compartir flujo, los compensadores de presión seccionales reducen los flujos del actuador. El flujo completo de la bomba se comparte entre la pluma y el cucharón en un 30 % y 70 % respectivamente. Todo el flujo de la bomba es utilizado por los actuadores y no tiene que acelerarse en el canal central abierto; por lo tanto, se mejora el tiempo de ciclo así como el rendimiento del material.

### 1.2.7. Sistema de refrigeración

El sistema está compuesto por:

- Radiador: el circuito de etilenglicol proporciona enfriamiento al motor y el radiador se ubicó en frente del motor.
- Refrigerador hidráulico: para proporcionar enfriamiento al aceite hidráulico.
- Enfriador posterior: un intercambiador de calor aire-aire para enfriar el aire turboalimentado.
- Ventilador: un ventilador accionado por embrague para proporcionar flujo de aire a los intercambiadores de calor.

Los diferentes requisitos de enfriamiento y los diversos circuitos de refrigerante requerían que el sistema se rediseñara completamente ya que la temperatura de los fluidos calientes es mucho más baja que en el R1300.

El cargador adaptado tiene los siguientes componentes de enfriamiento:

- Las celdas de combustible son enfriados por agua DI.
- Enfriador hidráulico: se ha utilizado un enfriador de líquido a líquido para el sistema hidráulico.
- Enfriador de aceite: para el engranaje de reducción entre el motor de propulsión y el diferencial trasero.
- Se utiliza un circuito de refrigeración separado, que incluye una bomba accionada eléctricamente, para proporcionar refrigeración a los motores eléctricos, unidades de motor y convertidores de CC-CC.
- El agua DI también enfría el sistema de almacenamiento de energía y la resistencia de freno.
- Un ventilador accionado eléctricamente proporciona flujo de aire para el DI y el sistema de enfriamiento de las componentes electrónicos.

### 1.2.8. Montaje Final

El sistema está dividido en tres tensiones; una de 600-850 VCC, que alimenta el motor de tracción y el inversor del motor hidráulico; una tensión, de 280 a 400 VCC, que alimenta el compresor de aire, las bombas del sistema de refrigeración y el ventilador de enfriamiento, y una tensión, de 25 VDC para los sistemas auxiliares y arranque. La máquina tiene un controlador de potencia, temperatura, presión y caudal y a esto se suma un conversor de refuerzo de 80 kW DC / DC (media a alta tensión), un módulo de potencia CC / CC bidireccional de 8 kW capaz de manejar 24V a 400V, y un sistema de adquisición de datos que controlará las celdas de combustible.

El compresor de aire es centrífugo con frecuencia nominal de 150.000 rpm y entrega casi 4.700 SLM a 1.7 bar. Las celdas de combustible se enfrían con agua DI con un flujo de 150 l/min para mantener la temperatura de la pila entre 65°C y 70°C. El circuito de refrigeración DI interactúa con el almacenamiento de hidruro metálico para suministrar el calor necesario para la desorción del hidrógeno.

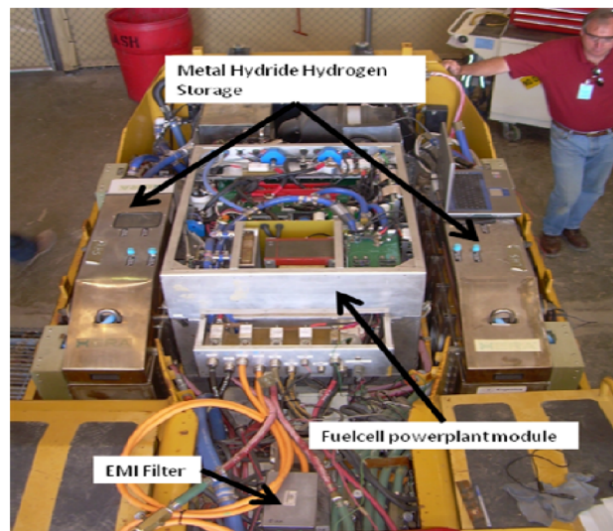


Figura 1.11: Distribución de los componentes electromecánicos en la adaptación del LHD [7]

El módulo de celdas de combustible está ubicado entre los dos módulos de almacenamiento de hidruro de metal, formando una configuración de alforja. Los módulos de almacenamiento de hidruro metálico son extraíbles. El motor de tracción, se encuentra

frente al módulo de celdas de combustible.

Los componentes principales del sistema de potencia son las celdas de combustibles, los tanques de almacenamiento de hidrogeno, el motor eléctrico, baterías. Este diseño generó que la máquina obtuviera mejor desempeño en áreas como la carga de material donde los sistemas de tracción e hidráulicos se encuentran activos. Además la máquina puede acelerar y subir pendientes bajas con un gran rendimiento. Una de las deficiencias que tiene la adaptación fue el almacenamiento de combustibles debido a la optimización del peso, es por eso que de un turno de 8 hrs, pensado inicialmente, la autonomía del LHD bajó a 4 o 5 horas. Finalmente aunque la idea inicial era minimizar el peso de la máquina, este objetivo no se pudo lograr aumentando en 2.863 kg el peso del cargador (14 % más), lo que tuvo un impacto en el rendimiento de este.

### **1.2.9. Aprendizaje de la experiencia**

Durante esta experiencia se demuestra que es posible operar con celdas de combustible en la minería. La investigación en torno a esta tecnología incluso 15 años después aún sigue en desarrollo, principalmente hay que poner énfasis en el avance de nuevos sistemas de almacenamiento de hidrógeno ya que estos aún tienen una alta densidad de energía gravimétrica, aumentando considerablemente el peso de la adaptación.

Al analizar la selección de la potencia de la celda de combustible se ve que esta no está dimensionada para cumplir con el máximo flujo energético requerido durante la operación del cargador, si no que es una base energética y los peaks de potencia son suministrados por la batería, por lo que hay que seleccionar de manera correcta las características de la celda de combustible para que la adaptación se realice de manera óptima en cuanto a volumen, peso y costos.

Se hace necesario optimizar el uso de la energía, por lo que un factor preponderante es la utilización de un sistema de freno regenerativo para que esa energía cinética pueda ser almacenada en las baterías y luego ser utilizada en la tracción del LHD. Esto se relaciona directamente con el sistema de control, el cual debe optimizar el uso de la energía, administrando las fuentes de potencia (celdas y baterías) para que la adaptación sea lo más eficiente posible.

El desarrollo de optimización por peso y volumen de la adaptación restringe la capacidad de operación del cargador por lo que poner énfasis en seleccionar componentes con baja densidad de energía gravimétrica y volumétrica se hace una de las tareas principales dentro del desarrollo del proyecto.

Se deben dimensionar todos los componentes basados en la operación más exigente posible del cargador dentro de la mina, por lo que la información entregada por la empresa minera acerca de la operación del cargador, es el factor más importante y necesario para conocer la factibilidad del proyecto.

La utilización de un sistema electromecánico impulsado por celdas de combustible genera un conjunto más eficiente a nivel energético y con mayor monitoreo de variables, por lo que prevenir fallas se hace mucho más simple. Así se disminuyen los periodos de mantenimiento, aumentado la disponibilidad de la máquina minera y disminuyendo los costos asociados a esta área productiva. Por otra parte al utilizar un motor eléctrico se mejoran los puntos de operación más exigentes como lo son las cargas y descargas de material, etapas donde se necesita más torque.

El uso de esta tecnología conlleva un beneficio inherente en la disminución de gases contaminantes promoviendo el uso de energías renovables, además al utilizarla en minería subterránea aumentan los beneficios, ya que se mejoran las condiciones de salud para los operadores de este tipo de maquinaria y disminuye el consumo energético del sistema de extracción de gases de los túneles, lo que reduce los costos asociados, haciendo económicamente factible la realización este tipo de proyectos.

### **1.3. Adaptación de autobús urbano**

Todos los gases son buenos combustibles para los motores de ciclo Otto, la mezcla con aire es homogénea y por ende, de alta calidad, lista para una combustión completa. La emisión de gases contaminantes es menor al compararse con los combustibles líquidos y por ende la vida útil del motor y del aceite se prolongan. La combustión de hidrógeno no produce CO<sub>2</sub> ni emisiones de azufre. En comparación con el motor diésel, las emisiones de óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y de hidrocarburo (HC) son (80 %) más bajas, se elimina la emisión de monóxido de carbono (CO) y de partículas (PM).

De acuerdo con esto último, el hidrógeno es la fuente de energía alternativa perfecta de un punto de vista ecológico. En esta sección se analiza el trabajo que durante el año 2016 Saša Milojević, de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Kragujevac, República de Serbia, realizó al proponer el diseño de un autobús urbano propulsado con hidrógeno [16]. A través de él se propone la adaptación del bus dando detalles para la instalación de componentes específicos para el uso de hidrógeno comprimido, así como la implementación del sistema de protección contra incendios. En el bus, los cilindros de hidrógeno son montados en el techo por poco espacio disponible.

### **1.3.1. Bases de diseño para el Bus propulsado por hidrógeno**

El bus prototipo está equipado con un motor de gas de aspiración natural que está diseñado para funcionar con gas de hidrógeno comprimido (CGH2). Todas las partes de las instalaciones de CGH2 están diseñadas y aprobadas de acuerdo con el reglamento UN ECE WP29 (plataforma global para la armonización de los requisitos legales para vehículos de carretera). Los cilindros CGH2 junto con su bastidor original se posicionan en el techo del autobús. Se seleccionó el sistema de almacenamiento CGH2 que incluye revestimiento de aluminio 6061 reforzado con fibra de carbono en resina epoxi (Dyne-cell®), con una relación favorable entre peso y volumen. Se consideraron las regulaciones existentes con respecto a las dimensiones y el peso bruto del vehículo. Específicamente, se tuvo mayor atención en la correcta unión de las partes principales de la línea de combustible CGH2 y los cilindros de gas, todo ello reglamentado por UN ECE WP29.

La posición del nuevo centro de gravedad es calculado, teniendo en cuenta el peso añadido por CGH2 con el bastidor posicionado en el techo del autobús. Finalmente, la disposición de los componentes de la adaptación queda distribuida según la siguiente Figura 1.12.

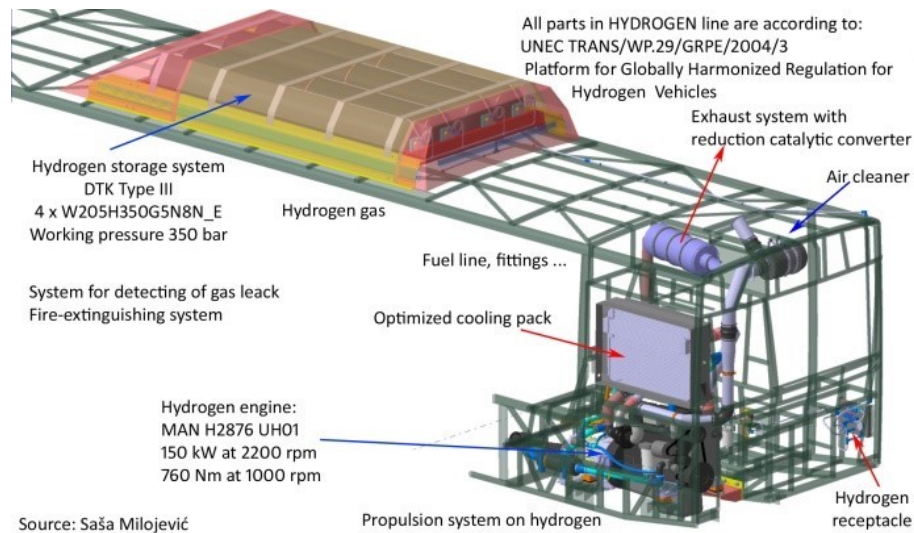


Figura 1.12: Esquema del equipo de combustible CGH2 instalado en el autobús [16]

Se calculó y aceptó el montaje de cilindros CGH2 para llevar a cabo los perfiles auxiliares en U mostrados en la Figura 1.13.

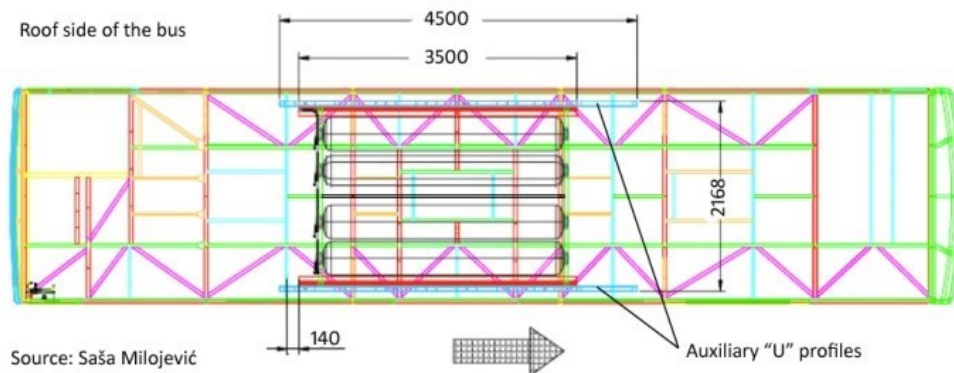


Figura 1.13: Posición de los cilindros de Hidrógeno en el techo del Bus [16]

El diseño y funcionamiento del motor de hidrógeno generalmente se basa en un motor de gas natural, que requiere un sistema de encendido por chispa para la mezcla de combustible. Los motores de hidrógeno de combustión pobre para aplicaciones en vehículos pesados fueron populares debido a sus menores emisiones de NOx y su mayor eficiencia en comparación con los motores que funcionan con mezclas estequiométricas. Un motor de hidrógeno moderno controlado electrónicamente y con tecnología Leanburn puede alcanzar niveles de Euro V o menores para NOx y PM. Para obtener un rendimiento óptimo de las emisiones, estos motores deben estar equipados

con un adecuado tratamiento posterior de gases de escape. Para cumplir con el estándar de emisión Euro VI, más estricto para NO<sub>x</sub>, es necesario combinar la combustión estequiométrica con recirculación de gases de escape (EGR) y un catalizador de tres vías.

### 1.3.2. Sistema de seguridad de la adaptación

Los incendios a bordo de autobuses pueden ser causados por factores internos o externos. Los factores internos incluyen eventos tales como cortocircuitos eléctricos, temperatura excesiva de los componentes del bus, incluido el sistema de frenos, el turbo compresor y el tubo de escape en combinación con materiales combustibles que incluyen materiales poliméricos, aceite, polvo y escombros. La experiencia demuestra que los incendios suelen comenzar en el compartimiento del motor. En lo que se refiere a causas externas, puede mencionarse como resultado del uso de llamas abiertas, vandalismo y propagación de incendios de vehículos o infraestructura cercanos. En relación con lo anterior, el bus está equipado con un sistema de extinción de incendios totalmente automático para el compartimiento del motor. El sistema se activa de forma hidroneumática y funciona sin suministro de energía. Nubes de niebla en forma de pilar que enfrían la temperatura y expulsan el aire. El supresor se basa principalmente en agua anticongelante (Figura 1.14).

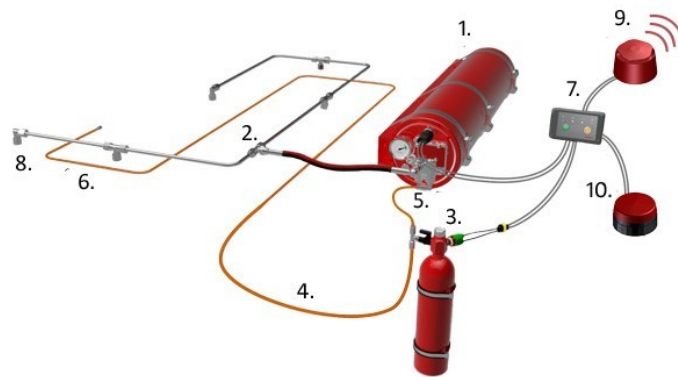


Figura 1.14: Sistema supresor de incendios del Bus [16]

En caso de incendio, un litro de líquido de extinción absorbe 540.000 kilocalorías y al mismo tiempo produce 1,700 litros de agua. El acumulador de pistón con líquido de extinción (1) está conectado al sistema de distribución por una manguera y tubo de distribución (2). La botella del detector (3) está conectada a un sistema de detección (4). El acumulador de pistón y la botella del detector están interconectados a través de

una válvula. Si hay un incendio, el tubo de detección estalla (6), se abre la presión en el sistema de detección y la válvula del acumulador de pistón. El interruptor de presión advierte al conductor a través del panel(7), sonidos (9) y señales luminosas (10). El fluido de extinción se expulsa a través de las boquillas del sistema de distribución y se esparce una neblina de agua en el compartimiento protegido (8).

En este documento se presentaron los avances y desarrollos más significativos realizados en las adaptaciones técnicas en los motores de combustión interna que funcionan con mezclas de gas/hidrógeno, haciendo más énfasis en los sistemas de inyección y enfriamiento de combustible. Para comprender tales adaptaciones técnicas, es necesario conocer las características químicas y físicas del hidrógeno, y los procesos que se relacionan con la reacción química entre el aire y el hidrógeno, desde un punto de vista de la termoquímica y la cinética química, como las proporciones de las mezclas en el proceso de combustión.

Las desventajas de la integración del hidrógeno como combustible, son la pre-ignición, la ignición espontánea, el golpeteo y el contraataque, aunque hay avances en la investigación para evitar estos fenómenos durante la combustión.

### 1.3.3. Sistema de almacenamiento de hidrógeno del bus

Para el diseño de este bus se seleccionaron los cilindros Tipo III (hechos de materiales compuestos como la fibra de vidrio o fibra de carbono con un revestimiento metálico de aluminio o acero). El sistema de almacenamiento tiene capacidad total de agua de 1.435 [L] (Figura 1.15). El peso de un cilindro es de unos 92,4 kg. Los cilindros fueron seleccionados para una presión de trabajo de 35 MPa o 70 MPa estos están equipados con una válvula de seguridad automática tipo BV-350.

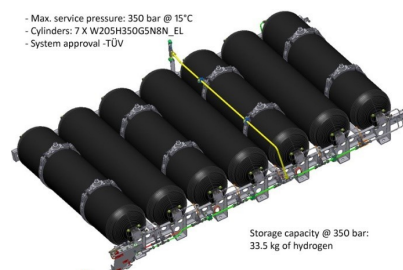


Figura 1.15: Sistema de almacenamiento de hidrógeno del Bus [16]

#### **1.3.4. Conclusiones acerca de la adaptación del bus**

Al decidir introducir o utilizar los autobuses de hidrógeno, se debe evaluar la tecnología apropiada del motor de hidrógeno. Los motores de hidrógeno de Leanburn para HDV eran populares debido a sus menores emisiones de NOx y mayor eficiencia. Para cumplir con el estándar de emisión Euro VI más estricto para NOx, es necesario cambiar a la combustión estequiométrica combinada con EGR y el tratamiento posterior con un catalizador de tres vías. Al instalar cilindros para el almacenamiento de hidrógeno gaseoso de Tipo III y con el diseño del sistema de acuerdo con UNECE WP29, se logró un gran progreso desde el aspecto de la seguridad del vehículo.

## Capítulo 2

### Metodología

En esta sección se explica el marco metodológico utilizado para dimensionar los componentes que serán parte de la adaptación de un cargador frontal minero para que opere con celdas de combustible a hidrógeno como fuente de energía. A través de esta metodología se analizan sus especificaciones técnicas y de operación, para luego seleccionar los componentes propios de la adaptación, dimensionarlos y finalmente desarrollar la ingeniería conceptual de esta.

Para iniciar con el desarrollo de la metodología se selecciona un cargador frontal comercial que es capaz de operar dentro de las faenas mineras de nuestro país y estará disponible para futuros estudios dentro del proyecto. Al elegir la máquina minera comercial se reconocen sus especificaciones técnicas a partir de la información provista por el fabricante, dando énfasis en la caracterización de la potencia y torques máximos del motor diésel, carga operacional y carga máxima de transporte, particularidades del sistema hidráulico de carga y dimensiones físicas.

Para caracterizar la demanda energética operacional del cargador frontal se determinó que este debe realizar un ciclo operacional, repetidas veces durante un turno, el cual se divide en 4 etapas carga, transporte, descarga y retorno; según lo propuesto en la tesis titulada, Evaluación de rendimientos de equipos en las operaciones de movimiento de tierras en el minado cerro negro Yanacocha–Cajamarca [15], que especifica el ciclo operacional relacionando cada etapa con un tiempo de duración. Para cada etapa del ciclo operacional se asocia una potencia, la cual es determinada como la suma de la potencia auxiliar, más la potencia hidráulica, más la potencia de transporte, según

lo estudiado en Design and analysis of a fuel cell supercapacitor hybrid construction vehicle [12], que identificó las variables que afectan a la energía consumida por un cargador frontal. Conociendo las potencias y los tiempos asociados a cada etapa se calcula la energía consumida durante un ciclo operacional. El consumo energético durante un turno de operación está determinado por la utilización del cargador en la operación minera por lo que de un turno de 8 hrs. se debe restar el tiempo de no uso del cargador, teniendo como resultado el tiempo real de uso. Tomando en cuenta la duración de un ciclo operacional y el tiempo de utilización de un cargador frontal durante un turno se reconoce las veces que se realiza el ciclo operacional durante un turno. Al obtener la cantidad de ciclos por turno, esta se relaciona con el consumo de energía por ciclo determinando así el consumo energético por turno del cargador frontal.

La selección de los componentes de la adaptación viene determinado por una topología eficiente y que además maximiza la vida útil de los componentes, para esta elección se analiza el estudio realizado en [4] en el cual se determina la mejor combinación de componentes que entregan potencia dentro de una adaptación con celdas de combustible. En base al anterior estudio se eligen los componentes de la adaptación, para luego realizar una investigación acerca de las tecnologías disponibles de cada uno de los aparatos, así se selecciona la mejor alternativa para ser implementada en este trabajo analizando sus características de usos específicos, eficiencias, densidades de energía gravimétricas, madurez de las tecnologías y finalmente su disponibilidad en el mercado. Al seleccionar la tecnología más indicada para este estudio se analiza la oferta comercial en el mercado, a través de búsquedas de proveedores de cada componente y realizando un catastro de estos. Para el dimensionamiento de los componentes ya seleccionados se genera una estrategia de control, es decir, un sistema de administración de entrega de potencia que utilice eficazmente cada uno de los componentes. Con esta estrategia y basándose en el ciclo operacional, específicamente en sus potencias, variaciones temporales de estas y consumos energéticos durante un turno, se dimensionan los componentes de la adaptación caracterizándolos por sus potencias o energía de almacenamiento, como también sus volúmenes y peso, basándose en los componentes comercialmente disponibles determinados por el catastro previamente realizado.

Finalmente a través del software Inventor de Autodesk, se representan gráficamente cada uno de los componentes y con estos se diseña un paquete con la distribución de estos dentro del cargador frontal.

## 2.1. Selección de vehículo

En esta sección se caracterizarán las variables técnicas del cargador frontal seleccionado para realizar este estudio, el cual es de Marca JCB modelo 456ZX (Figura 2.1) que cuenta con un motor de 160[KW]. Este fue seleccionado ya que es una máquina disponible y operativa dentro de las minas de nuestro país.



Figura 2.1: Cargador frontal marca JCB modelo 456 ZX [13]

### 2.1.1. Especificaciones técnicas del cargador

En esta sección se detallan las especificaciones técnicas entregadas por el fabricante. En la Tabla 2.1.1 se muestran las características principales del cargador y la Figura 2.2 en combinación con la Tabla 2.1.1 muestran las dimensiones generales de la máquina.

|                                       |                                |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Motor</b>                          |                                |
| Marca                                 | CUMMINS                        |
| Modelo motor                          | 6CT 8.3 Turbo                  |
| Potencia bruta                        | 216 HP                         |
| Cilindrada                            | 8.300 cc                       |
| Inyección                             | Mecánica                       |
| <b>Transmisión</b>                    |                                |
| Tipo                                  | Powershift                     |
| Marcha                                | Automático 4D/3T               |
| Tracción                              | 4X4                            |
| Sistema hidráulico                    |                                |
| Tipo de bomba                         | Bomba pistones caudal variable |
| Cauda máximo                          | 326 l/min                      |
| <b>Configuración</b>                  |                                |
| Peso operacional                      | 19.403 kg                      |
| Capacidad de balde frontal colmado    | 3,50 m <sup>3</sup>            |
| Capacidad de carga máxima línea recta | 11.360 kg                      |
| Altura de carga                       | 4,39 m                         |
| Altura de descarga a 45°              | 3,27 m                         |
| Altura pesador del balde              | 4,11 m                         |
| Neumáticos                            | 23,5 R25 L3                    |
| <b>Otros</b>                          |                                |
| Cabina                                | FOPS / ROPS                    |
| Climatización                         | Aire Acondicionado             |
| Monitoreo remoto                      | Liveline                       |

Tabla 2.1: Características técnicas del cargador frontal JCB 456 ZX [13]

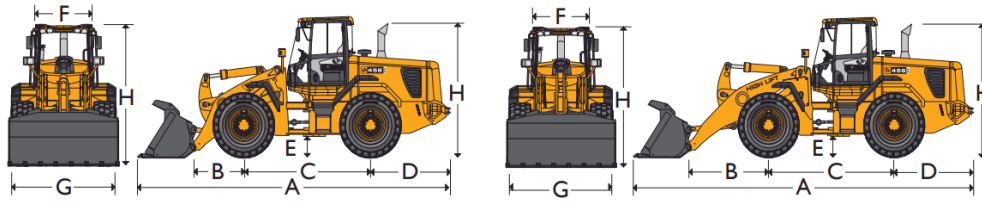


Figura 2.2: Esquema de las dimensiones generales del cargador frontal [13]

| Dimensiones                     | Letra |            |
|---------------------------------|-------|------------|
| Longitud total                  | A     | 7.960 [mm] |
| Distancia del eje al pivote     | B     | 1.622 [mm] |
| Distancia entre ejes            | C     | 3.300 [mm] |
| Distancia del eje al contrapeso | D     | 1.970 [mm] |
| Distancia mínima al suelo       | E     | 470 [mm]   |
| Altura sobre el escape          | F     | 3.260 [mm] |
| Ancho sobre la cabina           | G     | 1.400 [mm] |
| Ancho sobre los neumáticos      | H     | 2.702 [mm] |
| Distancia entre ruedas          | I     | 2.100 [mm] |
| Altura sobre la cabina          | J     | 3.370 [mm] |

Tabla 2.2: Dimensiones generales del cargador frontal JCB 456 ZX [13]

### 2.1.2. Caracterización de los componentes del cargador frontal

En esta sección se detallarán las características de los componentes principales del cargador frontal JCB 456 ZX.

#### Motor diésel

El cargador frontal es impulsado por un motor diésel marca CUMMINS modelo 6CTA8.3 Turbo cuya potencia nominal es de 160 [kW] y sus características principales se detallan en la Tabla 2.3

|                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| <b>Modelo</b>                      | 6CTA8.3 – G2           |
| <b>Potencia nominal</b>            | 160 kW                 |
| <b>Estructura</b>                  | 6 cilindros en línea   |
| <b>Combustible</b>                 | Diesel                 |
| <b>Consumo de combustible</b>      | 40 L/hr                |
| <b>Consumo de lubricante</b>       | 0,2 L/hr               |
| <b>Regulador</b>                   | Electrónico            |
| <b>Refrigerante</b>                | Agua                   |
| <b>Capacidad lubricante</b>        | 23,8 L                 |
| <b>Flujo entrada de aire</b>       | 11 m <sup>3</sup> /min |
| <b>Flujo gas de escape</b>         | 31 m <sup>3</sup> /min |
| <b>Presión de retorno</b>          | 10 kPa                 |
| <b>Temperatura gases de escape</b> | 591 °C                 |
| <b>Relación de compresión</b>      | 17                     |
| <b>Aspiración</b>                  | Turbo                  |
| <b>Calibre</b>                     | 114 mm                 |
| <b>Carrera</b>                     | 135 mm                 |
| <b>Cilindrada</b>                  | 8,3 L                  |
| <b>SAE</b>                         | 2/11.5                 |
| <b>Dimensiones</b>                 | 1128x740x1084 mm       |
| <b>Peso neto</b>                   | 587 kg                 |

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas del motor diésel CUMMINS 6CTA8.3 Turbo

En La Figura 2.3 se ven dos gráficos, uno de torque y otro de potencia los cuales muestran la variación de estos parámetros al modificar las RPM del motor (eje horizontal).

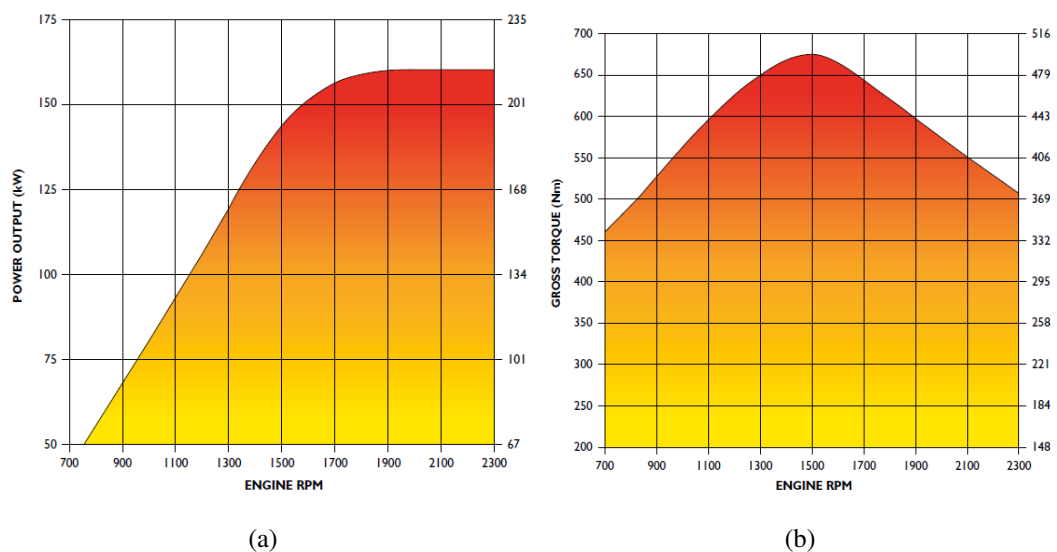


Figura 2.3: Gráficos de torque y potencia para distintas RPM del motor Cummins 6CTA8.3 Turbo [13]

## Transmisión

La transmisión del cargador frontal tiene tracción en las 4 ruedas, selector de accionamiento eléctrico de la transmisión automática de cambio suave y cambio de marcha que incorpora un inhibidor de velocidad y modulación para cambios de dirección y relación en movimientos suaves y sensibles. Convertidor de torque integral de una sola etapa, 4 marchas hacia adelante y 3 hacia atrás, la relación de giro para cada marcha se muestra a continuación.

| Velocidad | Dirección de manejo | Relación |
|-----------|---------------------|----------|
| 1         | Hacia adelante      | 3,632    |
| 2         | Hacia adelante      | 2,089    |
| 3         | Hacia adelante      | 1,072    |
| 4         | Hacia adelante      | 0,636    |
| 1         | Hacia atrás         | 3,444    |
| 2         | Hacia atrás         | 1,981    |
| 3         | Hacia atrás         | 1,017    |

Tabla 2.4: Relación de giro para las distintas marchas de la transmisión del cargador frontal [13]

La transmisión ZF-4 4 WG-190/210 está compuestas por un convertidor de torque hidrodinámico y una transmisión powershift de varias velocidades montada en la parte trasera con una caja de transferencia integrada. El convertidor de torque es un dispositivo de arranque sin desgaste que es infinitamente variable y se adapta a sí mismo a las situaciones requeridas. Entrada mediante montaje directo a través de diafragma en el motor, o instalación por separado (entrada a través de eje universal) con brida de entrada DIN, mecánica o Spicer. La transmisión se puede desplazar de forma manual o totalmente automática mediante la electrónica.

### **Dirección**

Sistema hidráulico de dirección prioritaria con dirección de emergencia. Los medidores de la bomba de pistón fluyen a través de la válvula de dirección para proporcionar una respuesta suave de esfuerzo. Ángulo de dirección  $\pm 40^\circ$ . Los cilindros de dirección están equipados con amortiguación de varilla en el extremo, para proporcionar una dirección amortiguada en toda la articulación, además posee una columna de dirección ajustable.

### **Frenos**

Frenado hidráulico en todas las ruedas, presión de trabajo 80 bar. Doble circuito con respaldo de acumulador. Máxima seguridad en todas las condiciones. Freno de estacionamiento, disco electrohidráulico que opera en el eje de salida de la transmisión.

### **Sistema eléctrico**

Sistema de 24 V a tierra negativo, alternador de 70 amperios con 2 baterías de bajo mantenimiento con 110 [A/hr]. Aislador ubicado en la parte trasera de la máquina. Llave de encendido de arranque / parada y precalentamiento de arranque en frío. Caja de fusibles primaria. Otros equipos eléctricos son los halógenos de cuarzo, luces de trabajo de filamento doble, lavado / limpieza frontal / posterior, pantalla trasera con calefacción, luces de carretera completas, reloj, manómetro y control de luces de advertencia. Conectores según norma IP67.

## Cabina

Estructura ROPS / FOPS montada de manera resistente (aprobada de acuerdo con EN13510: 2000 / EN13627: 2000 (Nivel 2)). El entorno del operador combina controles ubicados ergonómicamente y bajos niveles de ruido interno. La entrada y salida es a través de una gran puerta trasera con bisagras y escalones antideslizantes. Excelente visibilidad hacia adelante lo cual es proporcionado por un parabrisas curvado de 3 secciones, laminadas y acristaladas. La extensa instrumentación incluye un panel de monitoreo electrónico y pantalla (EMS). La calefacción y ventilación proporciona una distribución equilibrada y filtrada de aire en toda la cabina a través de un potente calentador con capacidad de 8 kW. La construcción unitaria permite un fácil sellado y evita la entrada de polvo. Un bloqueo de transmisión en el selector evita contra pilotajes.

## Sistema hidráulico de carga

La bomba de pistón de desplazamiento variable alimenta un sistema de "detección de carga" que proporciona una distribución de potencia eficiente y sensible. Los servicios principales se accionan mediante servomotor desde el control del cargador de una sola palanca (palanca de mando). Circuito auxiliar controlado por una palanca adicional o joystick con botones eléctricos. Tiene un acumulador de respaldo el cual está disponible para controlar el cargador en caso de pérdida de presión de la bomba.

|                           |                                                      |
|---------------------------|------------------------------------------------------|
| Tipo de bomba             | Bomba de pistones dobles con desplazamiento variable |
| Caudal máximo de bomba 1  | 163 l/min                                            |
| Presión máxima de bomba 1 | 250 bar                                              |
| Caudal máximo de bomba 2  | 163 l/min                                            |
| Presión máxima de bomba 2 | 160 bar                                              |
| <b>Ciclos hidráulicos</b> |                                                      |
| Elevación de brazos       | 5,8 s                                                |
| Volcado de pala           | 1,2 s                                                |
| Descenso de brazos        | 4,1 s                                                |
| Ciclo completo            | 11,1 s                                               |

Tabla 2.5: Especificaciones técnicas des sistema hidráulico de carga [13]

## Capítulo 3

### Demanda energética en operación

En este capítulo se caracteriza la demanda energética operacional de un cargador frontal minero. Para caracterizar la demanda energética es necesario conocer cómo es el ciclo de trabajo del cargador frontal. Cada ciclo se divide en 4 etapas las cuales se caracterizan a continuación.

- Carga: Etapa del ciclo donde el cargador frontal toma el material dispuesto en el terreno de la mina.
- Transporte: Etapa del ciclo donde el cargador frontal lleva el material cargado desde la zona de carga a la zona de descarga o camión de transporte minero.
- Descarga: Etapa del ciclo donde el cargador frontal voltea la pala y descarga el material en la zona de descarga o camión de transporte minero.
- Retorno: Etapa del ciclo donde el cargador frontal vuelve a la zona de carga en busca de más material.

#### 3.1. Determinación de la potencia asociada a cada etapa del ciclo operacional

La potencia necesaria para la operación de una máquina de carga se puede resumir como la suma de la potencia hidráulica, más la potencia necesaria para el desplazamiento, más la potencia consumida por los servicios auxiliares [12], esto se puede resumir en la ecuación 3.1.

$$P_{req} = P_h + P_{desp} + P_{aux} \quad (3.1)$$

Donde  $P_{req}$  es la potencia requerida en un instante determinado,  $P_h$ ,  $P_{desp}$ ,  $P_{aux}$  son la potencia hidráulica, de desplazamiento y auxiliar respectivamente.

### 3.1.1. Potencia Auxiliar

La potencia Auxiliar varía según la operación del cargador frontal, para el caso del presente trabajo se considera una potencia constante de 10 [kW] [12].

### 3.1.2. Potencia Hidráulica

La potencia hidráulica se puede resumir como el flujo de energía necesaria para que la bomba opere a un cierto nivel de presión y caudal, esto se debe asociar a las pérdidas o ineficiencias propias de la bomba oleohidráulica del sistema. Para determinar la potencia de consumo hidráulica se debe utilizar la ecuación 3.2.

$$P_h = \sum \frac{Q_{bomba} P_{bomba}}{\eta_{bomba}} \quad (3.2)$$

Donde  $Q_{bomba}$  es el caudal de la bomba,  $P_{bomba}$  es la presión de salida del fluido y  $\eta_{bomba}$  es la eficiencia de la bomba cuando el sistema opera a determinado caudal y presión. Para el caso de este estudio y como los parámetros operacionales deben ser los más exigentes es que esta ecuación se evalúa al máximo caudal y máxima presión del sistema hidráulico ( $Q_{bomba1} = 163 [l/min]$ ,  $Q_{bomba2} = 163 [l/min]$ ,  $P_{bomba1} = 250 [bar]$ ,  $P_{bomba2} = 160 [bar]$ ,  $\eta_{bomba} = 83 \%$ ). Con estos parámetros la potencia hidráulica del cargador frontal JCB 456 ZX es igual a  $P_h = 144 [kW]$ .

### 3.1.3. Potencia de desplazamiento

La potencia de desplazamiento es el flujo energético necesario para que el cargador se transporte a través de una superficie. Esto depende de 4 factores, la resistencia que genera el aire al movimiento o fuerza de arrastre aerodinámico ( $f_a$ ), la resistencia que genera la superficie al desplazamiento de la máquina al estar en contacto con las ruedas o fuerza de roce ( $f_r$ ), la oposición al movimiento que se genera al desplazarse por un terreno con pendiente o fuerza de gravedad ( $f_g$ ) y por último, la energía necesaria para acelerar la máquina o fuerza de aceleración ( $f_{ac}$ ) [12].

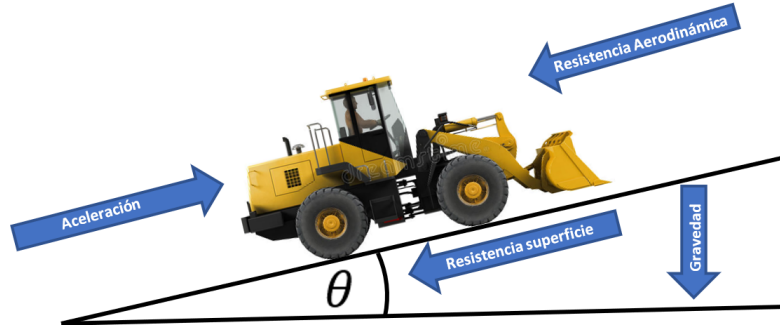


Figura 3.1: Esquema de las fuerzas que afectan al movimiento del cargador

Las siguientes ecuaciones son las utilizadas para determinar cada uno de los factores que se oponen al movimiento.

$$f_a = K_A S (\|\vec{v} - \vec{v}_v\|)^2 \quad (3.3)$$

$$f_r = mg \cos(\theta) \quad (3.4)$$

$$f_g = mg \sin(\theta) \quad (3.5)$$

$$f_{ac} = \frac{d_v}{d_t} m \quad (3.6)$$

Donde  $m$  es la masa de la máquina (con carga o sin carga),  $K_A$  es el coeficiente de resistencia aerodinámico,  $S$  es el área que se enfrenta perpendicularmente a movimiento del cargador,  $\vec{v}$  es la velocidad del cargador,  $\vec{v}_v$  es la velocidad del viento,  $g$  es la aceleración de gravedad,  $f$  coeficiente de resistencia a la rodadura,  $\theta$  es el ángulo que forma la pendiente de la superficie con la horizontal y  $\frac{dv}{dt}$  es la aceleración que experimenta el vehículo.

Para el caso de este trabajo se consideró una  $\vec{v}_v$  igual a cero y una velocidad de desplazamiento constante de 20 [km/h], por lo que  $\frac{dv}{dt}$  es nula, igual a cero.

Considerando lo antes mencionado la ecuación 3.7 se utiliza para determinar la potencia de desplazamiento.

$$P_{desp} = \frac{F_g + F_r + F_a}{\eta_{transmission}} v \quad (3.7)$$

Donde  $\eta_{transmission}$  es la eficiencia del sistema de transmisión de potencia.

En este estudio se consideró que la máquina, al momento de realizar la carga y descarga del material, se encontraba detenida por lo que en estas dos etapas del ciclo, la potencia de desplazamiento es igual a 0 [kW]. Por otra parte, durante las etapas de transporte y retorno no se consideró el funcionamiento del sistema hidráulico por lo que en estos puntos operacionales esta potencia toma un valor de 0 [kW]. Otra consideración es que durante la etapa de transporte la masa es igual a la suma del peso operacional más el peso de la carga nominal, en cambio para la etapa de retorno se considera la masa solo como el peso operacional. En la Tabla 3.1 se muestran los valores evaluados en la ecuación 3.1 para cada etapa del ciclo operacional.

| Parámetro        | Valor  | Unidad  |
|------------------|--------|---------|
| $Q_{bomba1}$     | 163    | L/min   |
| $P_{bomba1}$     | 250    | bar     |
| $Q_{bomba2}$     | 163    | L/min   |
| $P_{bomba1}$     | 160    | bar     |
| $\eta_{bomba}$   | 83,3   | %       |
| $K_A$            | 0,37   | -       |
| $S$              | 3,78   | $m^2$   |
| $v$              | 20     | km/h    |
| $v_v$            | 0      | km/h    |
| $m_{transporte}$ | 30.763 | kg      |
| $m_{retorno}$    | 19.403 | kg      |
| $g$              | 9,8    | $m/s^2$ |
| $f$              | 0,03   | -       |
| $\theta$         | 5      | %       |
| $\frac{dv}{dt}$  | 0      | $m/s^2$ |

Tabla 3.1: Datos evaluados para determinar la potencia asociada a cada etapa del ciclo operacional

Evaluando los datos de la Tabla 3.1 las ecuaciones para las potencias asociadas a

cada etapa y sus valores correspondientes quedan según las ecuaciones 3.8, 3.9, 3.10, 3.11.

$$P_{carga} = P_h + P_{aux} = 144[kW] \quad (3.8)$$

$$P_{transporte} = P_{desp(cargamax)} + P_{aux} = 122[kW] \quad (3.9)$$

$$P_{descarga} = P_h + P_{aux} = 144[kW] \quad (3.10)$$

$$P_{retorno} = P_{desp(Pesooperacional)} + P_{aux} = -7[kW] \quad (3.11)$$

$P_{retorno}$  es negativa ya que se considera una pendiente desfavorable a nivel energético, para el caso de la etapa de transporte, y favorable, para el caso de la etapa de retorno.

## 3.2. Determinación de la energía consumida en operación

Conociendo las etapas del ciclo de operación de un cargador frontal minero y sus potencias asociadas, es necesario identificar los tiempos que demoran cada una de las etapas para ello se utilizó la información entregada en la memoria de titulación “Evaluación de rendimientos de equipos en las operaciones de movimiento de tierras en el minado cerro negro Yanacocha – Cajamarca”, Cinthya Fiorella Malpica Quijada, 2014 [15]. En esta memoria se realizaron las mediciones de los tiempos de cada etapa de distintos cargadores frontales de la mina estudiada, teniendo como resultado la información expuesta en la Tabla 3.2.

| Equipo                | Carga (min) | Transporte (min) | Descarga (min) | Retorno (min) | Total (min) |
|-----------------------|-------------|------------------|----------------|---------------|-------------|
| 1                     | 0,35        | 0,9              | 0,1            | 0,7           | 2,05        |
| 2                     | 0,25        | 0,8              | 0,07           | 0,83          | 1,95        |
| 3                     | 0,2         | 1,5              | 0,13           | 0,95          | 2,78        |
| 4                     | 0,32        | 0,75             | 0,11           | 0,65          | 1,83        |
| 5                     | 0,33        | 0,95             | 0,09           | 0,74          | 2,11        |
| 6                     | 0,25        | 1,1              | 0,11           | 0,62          | 2,08        |
| 7                     | 0,23        | 0,79             | 0,12           | 0,45          | 1,59        |
| 8                     | 0,34        | 0,93             | 0,13           | 0,64          | 2,04        |
| 9                     | 0,4         | 0,96             | 0,1            | 0,8           | 2,26        |
| 10                    | 0,35        | 1,13             | 0,09           | 0,6           | 2,17        |
| 11                    | 0,33        | 1,15             | 0,15           | 0,73          | 2,36        |
| 12                    | 0,25        | 0,85             | 0,17           | 0,7           | 1,97        |
| 13                    | 0,23        | 0,95             | 0,14           | 0,65          | 1,97        |
| 14                    | 0,21        | 1,1              | 0,09           | 0,95          | 2,35        |
| <b>Promedio (min)</b> | <b>0,29</b> | <b>0,99</b>      | <b>0,11</b>    | <b>0,72</b>   | <b>2,11</b> |

Tabla 3.2: Tiempos asociados a cada etapa del ciclo operacional [15]

En la Figura 3.2 se muestra la distribución de la potencia asociada a cada etapa durante un ciclo operacional.

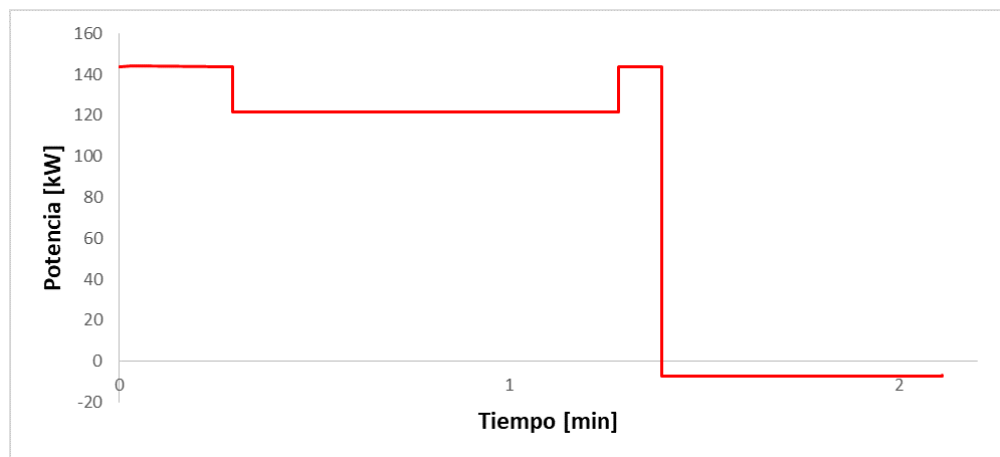


Figura 3.2: Distribución de las potencias en el ciclo de operación de un cargador frontal minero

Conociendo el tiempo y la potencia asociada a la operación del cargador frontal minero y a través de la Ecuación 3.12 se obtiene el consumo energético de un ciclo operacional.

$$E_{ciclo} = \int_0^{t_{ciclo}} P_{(t)} \cdot dt \quad (3.12)$$

Donde  $P_{(t)}$  es la potencia en función del tiempo y  $t_{ciclo}$  es el tiempo promedio que demora cada ciclo. Utilizando la Ecuación 3.12 se llega a que cada ciclo utiliza 10,45 [MJ].

### 3.3. Determinación de la energía recuperable a través del sistema de freno regenerativo

Dentro de la adaptación debido a que se trata de un sistema eléctrico, este es capaz de recuperar parte de la energía cinética del cargador, cuando está en movimiento, a través del sistema de freno regenerativo. El motor, el cual para este caso actúa como generador de energía eléctrica, frena en parte el movimiento de la máquina transformando esta energía cinética en un flujo eléctrico el cual se almacena en un sistema de almacenamiento de energía eléctrica (Baterías y/o condensadores). La energía que puede ser aprovechada por el freno regenerativo se resume en la Ecuación 3.13 [18].

$$E_{fr} = \frac{1}{2}mv^2 - fs - \frac{1}{2}J_e w^2 - E_d \quad (3.13)$$

Donde  $m$  es la masa del cargador (30.763 kg para la etapa de transporte y 19.403 kg en la etapa de retorno del ciclo operacional),  $v$  es la velocidad del cargador (4,2 m/s),  $s$  es la distancia de frenado,  $f$  es la resistencia al movimiento del cargador,  $J_e$  es el momento de inercia de las partes rotatorias del cargador,  $w$  es la velocidad angular de las partes rotatorias del cargador y  $E_d$  es la pérdida de energía durante el frenado, esta última se considera despreciable debido a que comparativamente es muy pequeña en relación con la energía cinética del cargador. Por último,  $E_{fr}$  es la energía que se capta a través del sistema de freno regenerativo.

Como los valores  $s$ ,  $f$ ,  $J_e$ ,  $w$  son imposibles de determinar en este momento del estudio, dentro de la operación del cargador, serán omitidos para el cálculo de la energía recuperable a través del freno regenerativo. Por lo tanto sólo se obtendrá este parámetro considerando solamente la energía cinética durante el movimiento del cargador, la cual disminuye por las pérdidas dentro del sistema, quedando la Ecuación 3.13 como la Ecuación 3.14

$$E_{fr} = \frac{1}{2}mv^2 * \eta_{recuperacion} \quad (3.14)$$

Donde  $\eta_{recuperacion}$  es la eficiencia de la recuperación de la energía cinética (0,7 [18]).

Según los parámetros operacionales del cargador frontal JCB 456 ZX, la energía máxima que se puede obtener a través del sistema de freno regenerativo es de 0,305 [MJ]. Por lo tanto la energía por ciclo utilizada es igual a la energía operacional menos la energía recuperada por el freno regenerativo dando un valor total de de 10,143 [MJ]

### 3.4. Determinación del consumo energético en un turno de operación

Suponiendo que cada ciclo tiene una duración de 2,11 min y cada turno una duración de 8 hrs, y que según el Estudio de Productividad del Equipo de Carga en una Mina de Mineral de Fierro a Cielo Abierto [14] la utilización de un cargador frontal minero es de 53,4 %, con estos datos se puede obtener el número de ciclos por turno utilizando la Ecuación 3.15.

$$N_{ciclosporturno} = \frac{t_{turno}\eta_{turno}}{t_{ciclo}} \quad (3.15)$$

Donde  $t_{turno}$  es la duración de cada turno,  $\eta_{turno}$  es la utilización del cargador en cada turno y  $t_{ciclo}$  es el tiempo que demora cada ciclo. Con la Ecuación 3.15 se determinó que el número de ciclos por turno son 122. En el caso del tiempo de no utilización del cargador este debe estar operando los equipos auxiliares, por lo que durante este periodo también hay consumo energético. Por lo tanto, la energía total consumida durante la operación se determina a través de la Ecuación 3.16.

$$E_{operacional} = E_{ciclo} * N_{ciclos} + P_{aux}t_{turno}(1 - \eta_{turno}) \quad (3.16)$$

A través de la ecuación 3.16 se determina que la energía operacional tiene un valor de 1.372[MJ].

## **Capítulo 4**

# **Evaluación técnica de las opciones de conversión**

Durante el desarrollo de este capítulo se analizaron las distintas alternativas para realizar la adaptación del cargador frontal para que este opere con celdas de combustibles a hidrógeno como fuente de potencia. Dentro de los principales equipos que deben analizarse para la adaptación son el sistema de almacenamiento de hidrógeno, celdas de combustible, motor eléctrico y el sistema complementario de potencia (baterías y/o Supercondensadores) [9]. Todos los componentes antes mencionados son interconectados a través de convertidores e inversores, estos son encargados de administrar las corrientes y voltajes, con el fin de que los aparatos de la adaptación trabajen dentro de los rangos operativos correspondientes.

### **4.1. Topologías de un vehículo propulsado por Celdas de combustible**

En esta sección y en base al estudio realizado por Bauman, Jennifer and Kazerani, Mehrdad [4] se analizaron las tres principales configuraciones para generar el tren de potencia de la adaptación, los cuales son:

- Celda de combustible – Baterías.
- Celda de combustible – Supercondensador.
- Celda de combustible – Baterías – Supercondensador.

#### 4.1.1. Topología Celda de combustible – Baterías.

En un vehículo que se alimenta de celdas de combustible y baterías, la batería almacena la energía proveniente del freno regenerativo, proporciona el flujo energético adicional durante los peaks de potencia y propulsa el vehículo a bajas velocidades para evitar operar la celda de combustible a baja potencia (en su región de baja eficiencia). Se encontró que una estrategia de control, que regularmente carga la batería desde la celda de combustible, tendrá una economía de combustible más baja que una estrategia que sólo carga la batería desde el frenado regenerativo. Esto se debe a las ineficiencias asociadas con los convertidores DC / DC y las pérdidas de la batería. Por lo tanto, una regla de control es cargar sólo la batería desde la celda de combustible cuando el estado de carga (SOC) de la batería cae por debajo del 50 %. También se encontró que era más eficiente usar sólo la energía de la batería cuando el porcentaje de corriente de celda de combustible solicitada era inferior al 7.55 %. Cuando la potencia requerida es negativa, la batería acepta la energía del freno regenerativo, mientras que su SOC sea inferior al 98 %. Más allá de este punto, el frenado mecánico se usa para evitar un exceso de tensión en la batería (el frenado mecánico se usa de esta manera para todos los tipos de vehículos).

La Figura 4.1 representa un diagrama de flujo de la configuración Celda de combustible – Baterías

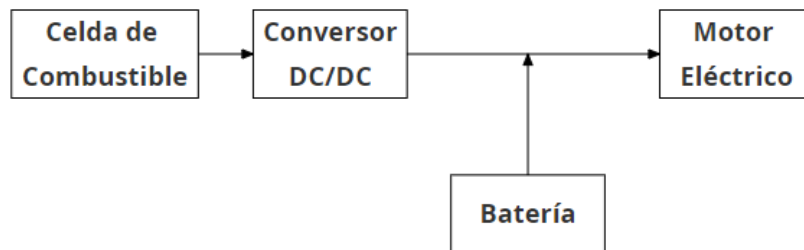


Figura 4.1: Diagrama de flujo de topología Celdas de combustible-Baterías [4]

#### 4.1.2. Topología Celda de combustible - Supercondensador

En un vehículo que se alimenta de celdas de combustible y supercondensadores (SC), el SC almacena la energía de frenado regenerativa y proporciona un flujo energético extra durante los peaks de potencia. En general, no hay suficiente energía disponible

en el SC para propulsar el vehículo a bajas velocidades, por lo tanto, la estrategia de control debe garantizar que la capacidad de almacenamiento de energía disponible se utilice de la mejor manera. Mantener la suma de la energía cinética del vehículo y la energía almacenada en el SC constante proporciona la mejor economía de combustible. Esto tiene sentido de manera intuitiva, ya que cuando la velocidad del vehículo es alta, la tensión del SC será baja y, por lo tanto, tendrá suficiente espacio para aceptar la energía de frenado regenerativa cuando el vehículo frena. Cuando la potencia requerida es negativa, el SC acepta la energía de frenado regenerativa hasta su límite de corriente, siempre que la tensión del SC sea inferior a 400 V.

La Figura 4.2 representa un diagrama de flujo de la configuración Celda de combustible – Supercondensadores.

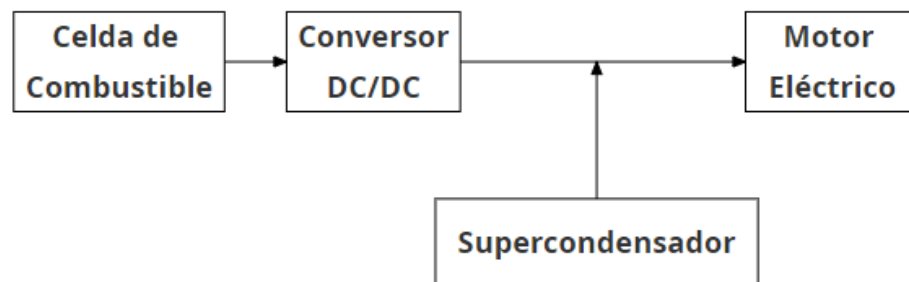


Figura 4.2: Diagrama de flujo de topología Celdas de combustible-Supercondensadores [4]

#### 4.1.3. Topología Celda de combustible - Baterías - Supercondensador

La estrategia de control elegida es utilizar los SC para manejar la mayor parte de las demandas de energía, incluyendo los requisitos de aceleración y frenado. Esto garantiza que la alta eficiencia y durabilidad de los SC se utilicen completamente y que la vida útil de la batería se extienda como resultado de no estar sujeto a muchas cargas o descargas de alta corriente. La degradación retardada de la batería es una ventaja importante para el sistema de almacenamiento de energía (SAE) combinado de batería y SC. La estrategia de control es una versión modificada de la estrategia utilizada para el vehículo de celda de combustible-batería. No es necesario incluir el control de voltaje del SC, ya que si el voltaje es alto y el vehículo está frenando, la batería puede

absorber la energía de frenado regenerativo que no es acumulada por el SC. El SC proporciona toda la energía SAE (transitoria) dentro de sus límites de corriente y voltaje. Si la tensión del SC alcanza el límite inferior (250 V), la batería proporciona la energía restante requerida. La batería también proporciona energía si la celda de combustible no puede satisfacer su solicitud de potencia y si la solicitud de corriente de la celda de combustible está por debajo del 7.55 %. Cuando la potencia requerida es negativa, el SC acepta la energía de frenado regenerativo a una velocidad inferior a su límite de corriente siempre que el voltaje del SC sea inferior a 400 V. Más allá de este punto, la batería acepta cualquier energía de frenado regenerativa adicional.

La Figura 4.3 representa un diagrama de flujo de la configuración Celda de combustible – Baterías - Supercondensadores.

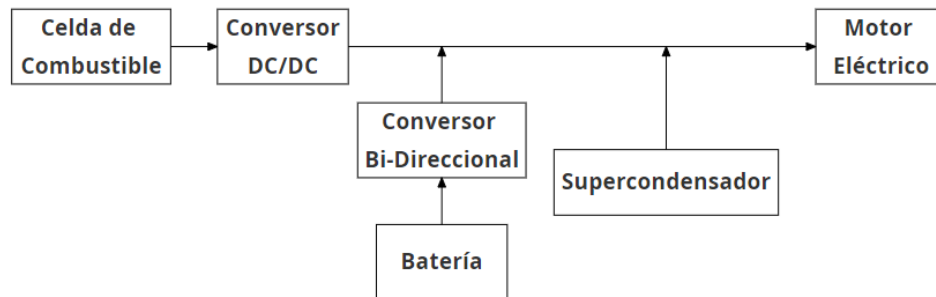


Figura 4.3: Diagrama de flujo de topología Celdas de combustible-Baterías-Supercondensadores [4]

## 4.2. Análisis de las celdas de combustible

Las celdas de combustibles son aparatos electroquímicos análogos a las baterías convencionales: ambos poseen electrodos positivos y negativos y un electrolito. Sin embargo, a diferencia de las baterías, que pueden suministrar potencia solo por un tiempo definido, luego del cual hay que recargarlas o remplazarlas, la celda de combustible, gracias a que absorbe nuevos suministros de combustible permanentemente, puede operar en forma continua, es decir, produce electricidad mientras esté siendo alimentada con combustible y oxidante.

Una celda de combustibles es un sistema de flujo estable, en el cual el combustible y el oxidante se suministran desde una fuente externa que provee un medio de trans-

formar energía química en eléctrica, sin combustión y sin contaminar el aire ni el agua, en un proceso continuo y directo mediante reacciones de reducción y oxidación en presencia de un catalizador. De manera ideal no hay cambio en la composición química del electrolito o de ambos electrodos.

La reacción química que ocurre en la celda de combustible es isotérmica y continua. Las celdas de combustión no están limitadas por el principio de Carnot, por lo que pueden alcanzar una mayor eficiencia teórica en la conversión de energía, mientras que las reacciones de combustión involucran grandes variaciones de temperatura, lo cual genera energía como calor o calor y trabajo. Las pérdidas excesivas que se producen en los sistemas de conversión de energía de varias etapas pueden evitarse mediante el uso de celdas de combustible que hacen la conversión en un proceso de una sola etapa [1].

Una celda de combustible se compone de cuatro partes principales: ánodo, cátodo, electrolito y el circuito externo. En el ánodo, el hidrógeno se oxida, con lo cual resultan protones y electrones, mientras que en el cátodo se reduce el oxígeno a especies óxido, las cuales reaccionan para formar agua. Dependiendo del electrolito, los protones o bien los iones óxido se transportan a través de un conductor iónico aislante, mientras que los electrones viajan a través de un circuito externo para liberar la energía eléctrica. Sin embargo, generalmente las celdas de combustible producen cantidades muy pequeñas de corriente, debido a la reducida área de contacto entre los electrodos, electrolito y gas. Otro problema que se debe considerar es la distancia entre los electrodos. Para mejorar la eficiencia de la celda y maximizar el área de contacto, es necesario una delgada capa electrolítica y electrodos de alta porosidad para la óptima penetración del gas [3].

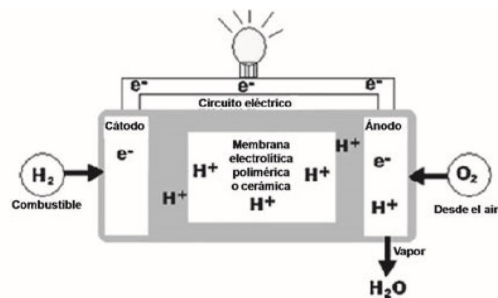


Figura 4.4: Principio de funcionamiento de una celda de combustible de intercambio protónico [3]

#### 4.2.1. Comparación de las celdas de combustible

En base al estudio realizado por [3] las celdas de combustible se pueden clasificar en relación al tipo de electrolito utilizado, en seis grupos principales:

- Celda de combustible alcalina (Alkaline Fuel Cell, AFC)
- Celda de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)
- Celda de combustible de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)
- Celda de combustible de carbonatos fundidos (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)
- Celda de combustible de membrana de intercambio protónico ( Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC )
- Celda de combustible de metanol directo (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)

Cada una de las celdas de combustible anteriormente clasificadas utilizan distintas tecnologías, cada una de ellas está diseñada para una aplicación determinada. Estas generan potencia en un amplio rango desde el intervalo de los watt a los Mega Watt. Se pueden aplicar como fuente de energía en pequeños dispositivos, por ejemplo en teléfonos móviles o computadores portátiles, también se pueden aplicar a media escala los que incluyen vehículos, aparatos domésticos, aplicaciones militares y transporte público. Por último se pueden aplicar en un sistema de distribución de energía eléctrica en lugares de difícil acceso. La Figura 7.1 (Anexo 1) es un resumen de las especificaciones de funcionamiento de la tecnología de las celdas de combustible.

Para el caso de este estudio una de las características principales que debe cumplir la celda de combustible es que esta debe operar con hidrógeno, por lo que las celdas de Metanol (DMFC) no son viables para el desarrollo de esta experiencia. La Figura 7.2 (Anexo 2) presenta las aplicaciones, ventajas y características principales en las celdas de combustible.

Analizando las características principales de las distintas celdas de combustible, la mejor alternativa para implementar en la adaptación del cargador frontal, es la celda de membrana de intercambio protónico o PEMFC, debido a que es la más eficiente dentro de las principales celdas de combustible, por otra parte su temperatura de operación es de alrededor de los 80°C lo que la hace de rápido funcionamiento y segura al operar, y

por último su facilidad de transporte la hace perfecta para ser montada sobre vehículos autopropulsados.

#### 4.2.2. Celdas de combustible comerciales tipo PEM

Para que el proyecto sea factible es necesario conocer la oferta de este tipo de tecnología en el mercado. Debido a esto se realizó un catastro de distintas marcas que ofertan celdas de combustibles de escala media y que además entregan información técnica sobre estas. En la Tabla 4.1 se muestran las distintas características de las celdas de combustible disponibles en el mercado.

| <b>Marca</b>        | <b>Potencia</b><br>[kW] | <b>Ancho</b><br>[m] | <b>Alto</b><br>[m] | <b>Largo</b><br>[m] | <b>Volumen</b><br>[m <sup>3</sup> ] | <b>Peso</b><br>[kg] |
|---------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| <b>Ballard</b>      | 98                      | 1,2                 | 0,869              | 0,506               | 0,53                                | 285                 |
| <b>Horizon</b>      | 28                      | 0,838               | 0,374              | 0,208               | 0,07                                | 80                  |
| <b>Proton Motor</b> | 25                      | 0,4                 | 0,6                | 1,1                 | 1,0                                 | 260                 |

Tabla 4.1: Características técnicas de las celdas de combustibles comerciales

### 4.3. Análisis del sistema de almacenamiento de hidrógeno

Para determinar un correcto desarrollo de este estudio es necesario conocer las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno. Según [3] los sistemas viables se limitan a:

- Tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido.
- Tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico.
- Hidruros químicos.
- Materiales en estado sólido:
  - Hidruros metálicos compuestos.
  - Nanoestructuras de carbono.

### 4.3.1. Hidrógeno comprimido

El método de almacenamiento de hidrógeno más comúnmente utilizado en los vehículos de celdas de combustible son los tanques de hidrógeno comprimido. El material con el cual es fabricado el recipiente debe ser capaz de soportar la fragilidad posiblemente generada por el hidrógeno, además de ser liviano, económico y fácil de trabajar. Actualmente los tanques están compuestos por materiales como la fibra de carbono en combinación con epoxi (plástico reforzado con fibra de carbono, CFRP). Los CFRP son livianos y muy fuertes, pero tienen una conductividad térmica relativamente baja. Por lo tanto, el material debe mantenerse por debajo de 358 [K] en todo momento para cumplir con los requisitos de seguridad. La unidad CFRP también es sensible al fuego y las altas temperaturas, lo que provoca una degradación de sus propiedades mecánicas. En la actualidad, se usan comúnmente dos tipos de tanques: el tipo IV que está compuesto completamente de CFRP; el tipo III contiene CFRP revestido de metal y, por lo tanto, abarca los beneficios de los tanques de aluminio y los tanques de CFRP utilizados actualmente. Una alternativa a los tanques de tipo III y IV utilizados actualmente es un tanque CFRP reforzado con un esqueleto interno. La adición del esqueleto permite tanques más ligeros y más fuertes diseñados en cualquier forma. Sin embargo, no se convertirán en una tecnología viable hasta que se mejore el proceso de fabricación y la durabilidad del sistema a largo plazo.

En 2009, el Programa de Hidrógeno del DOE analizó el potencial de almacenamiento de  $H_2$  en tanques de tipo IV que contienen 5,6 kg de  $H_2$  recuperable. Los valores actuales y el objetivo de los cuatro criterios principales se discuten a continuación.

- Capacidad gravimétrica: Se encontró que un tanque de 345 [atm] tenía una capacidad gravimétrica de 5,5 % en peso. Un tanque de 690 [atm] fue menos eficiente en peso con una capacidad gravimétrica de 5.2 % en peso.
- Capacidad volumétrica: Se encontró que un tanque de 345 [atm] tenía una capacidad volumétrica de 17.6 [ $gH_2/L$ ]. Esto ni siquiera alcanzará el objetivo DOE 2010 de 28 [ $gH_2/L$ ]. Un tanque de 690 [atm] fue más eficiente en volumen con una capacidad volumétrica de 26.3 [ $gH_2/L$ ]. Este sistema no alcanzará el objetivo final del DOE de 70 [ $gH_2/L$ ].
- Costo: Los costos de fabricación fueron \$15.4 por [kWh] para el tanque de 345 atm y \$18.7 por [kWh] para el tanque de 690 atm. Estos son más de cuatro veces

el objetivo de \$4 [ $kWh$ ].

De los tres obstáculos discutidos, el costo es considerado la barrera más grande. Lo que se debe en gran medida a la fibra de carbono que compone el tanque.

### 4.3.2. Hidrógeno Líquido

La licuefacción del hidrógeno es un medio para aumentar la densidad de energía volumétrica. También se denomina almacenamiento criogénico porque la licuefacción se realiza enfriando  $H_2$  a 20 [ $K$ ]. Aunque es un proceso costoso en energía, aumenta la densidad de energía volumétrica de 5 [ $MJ/L$ ] (para  $H_2$  comprimido a 690 [ $atm$ ]) a 8 [ $MJ/L$ ] (para hidrógeno líquido  $LH_2$ ). Como resultado, se requiere menos volumen para el almacenamiento, por lo que se puede usar un tanque más pequeño y liviano. Para conservar el hidrógeno en forma líquida, este se debe mantener por debajo de su punto de ebullición de 20 [ $K$ ]. Los tanques originales de  $LH_2$  eran recipientes metálicos de doble pared. El recipiente interior tenía un aislamiento multicapa compuesto por varias capas de lámina metálica separadas por lana de vidrio; el espacio entre los vasos internos y externos se evacuó para crear un vacío.

A pesar de las mejoras importantes en la densidad volumétrica, el almacenamiento de  $LH_2$  no se utiliza con frecuencia por varias razones. Primero, al menos el 35 % del contenido energético del combustible se utiliza para licuarlo. Esto es tres veces más energía de la que se necesita para comprimir  $H_2$  a 690 [ $atm$ ]. En segundo lugar,  $LH_2$  se evapora muy fácilmente durante el abastecimiento de combustible y en tercer lugar,  $LH_2$  presuriza rápidamente mientras está a bordo de vehículos, ya que absorbe el calor del medio ambiente. Por lo tanto, el tanque debe ser ventilado cada 3 a 5 días durante la inactividad para evitar pérdidas peligrosas y costosas por ebullición; si esta no se controla, todo el almacenamiento de hidrógeno se evaporará en aproximadamente 2 semanas. Incluso si estos problemas pudieran superarse, la densidad de energía volumétrica de  $LH_2$  (aprox. [ $MJ/L$ ]) es sustancialmente menor que la de la gasolina (32 [ $MJ/L$ ]) y el combustible diésel (36 [ $MJ/L$ ]).

### 4.3.3. Hidruros metálicos

Los hidruros metálicos han recibido mucha atención recientemente porque a menudo tienen un mayor contenido volumétrico y gravimétrico que los métodos de alma-

cenamiento mecánico. Además, los hidruros pueden operar a temperaturas y presiones relativamente bajas (los rangos óptimos son de 1 a 10 [atm] y de 25 a 393 [K] para un PEMFC).

### **Hidruros metálicos simples**

Estos son complejos metálicos que incorporan hidrógeno en su estructura cristalina. Los hidruros metálicos se dividen en dos clases: hidruros binarios, que contienen sólo un metal además del hidrógeno con la fórmula  $MH_x$  (M metal), e hidruros intermetálicos, que contienen dos o más metales. Los hidruros de dos metales tienen la fórmula general  $AmBnH_x$  donde A y B son metales; luego se subdividen en  $AB_5$  (tipo de estructura  $CaCu_5$ ),  $AB_2$  (fase de Laves),  $AB$  (tipo de estructura  $CsCl$ ) o  $A_2B$  (tipo de estructura  $AlB_2$ ) donde el metal A tiene una fuerte afinidad por el hidrógeno y forma un hidruro binario estable mientras que el metal B No interactúa con el hidrógeno. Para que un hidruro metálico simple sea práctico para el almacenamiento de hidrógeno, debe producirse mediante una reacción exotérmica. La cinética de la reacción debe favorecer la formación de hidruros de baja energía y la desorción de  $H_2$ .

### **Hidruro metálico complejo**

Estos contienen átomos de hidrógeno que están parcialmente unidos dentro de un anión poliatómico. A menudo tienen capacidades gravimétricas más altas que los hidruros simples. Hay dos categorías principales de hidruros complejos: nitruros que contienen hidruros (amidas o imidas) e hidruros que contienen boro (borohidruros). Por lo general, estos se unen al litio o al magnesio, pero también pueden estar asociados con el sodio, el calcio o, con menos frecuencia, los metales de transición. Se pueden combinar múltiples compuestos para hacer sistemas con propiedades mejoradas por esto existe un gran volumen de hidruros metálicos complejos.

#### **4.3.4. Hidruros químicos**

Los Hidruros químicos son sustancias que al mezclarse con agua producen hidrógeno. En esta reacción el hidruro pasa a hidróxido. Cuando se utilizan los hidruros para el almacenamiento de hidrógeno, la reacción descrita anteriormente es la liberación del hidrógeno, y la reacción inversa, que se denomina reciclado, sería el llenado. Una vez que el agua ha reaccionado con el hidruro para formar hidrógeno, lo que tenemos de

subproducto es el hidróxido del hidruro. Este hidróxido hay que someterlo a un proceso que se denomina regeneración para volverlo a convertir en hidruro.

El hidruro de litio, el cual presenta una serie de características que lo hacen especialmente adecuado para su uso como almacenamiento del hidrógeno, a temperatura ambiente se encuentra de forma sólida. Para la utilización de los hidruros químicos es necesario someterlos a una serie de tratamientos. El hidruro de litio en polvo, si está expuesto al aire, absorbe el vapor de agua existente en el mismo. La reacción del vapor de agua y el hidruro produce hidrógeno y calor. Si el día es suficientemente húmedo, el calor incendiaría el hidrógeno. De ahí que sea necesario mezclar el hidruro con aceites minerales para su manejo seguro. A esta mezcla se le denomina “slurry”. Un “slurry” es una mezcla de un sólido y líquido para hacer una mezcla bombeable. El “slurry” de hidruro de litio presenta como almacenamiento del hidrógeno una alternativa viable al almacenamiento como hidrógeno líquido o altamente comprimido. Las densidades de almacenamiento son más altas que las de los hidruros metálicos. La densidad energética gravimétrica es más de dos veces a la del hidrógeno líquido, y todo el proceso se produce a presión y temperatura ambiente. El slurry es fácilmente bombeable y puede ser mezclado con agua para producir hidrógeno cuando se necesite.

#### **4.3.5. Nanoestructuras de carbono**

La adsorción física en sólidos muestra grandes ventajas, tales como el uso de materiales de bajo costo, y bajas presiones de operación. Debido a su gran área superficial, su baja densidad y un gran volumen de poros, las nanoestructuras de carbono están presentando un gran potencial como material de almacenamiento del hidrógeno (7.3). El grafito es la forma más comúnmente disponible del carbono. El hidrógeno y el grafito interaccionan de forma muy débil, lo cual es positivo, puesto que el almacenamiento es temporal, sin embargo, las láminas de carbono se apilan de forma muy compacta, lo que impide que las moléculas de hidrógeno quepan entre dichas láminas, y por lo tanto disminuyen la capacidad de adsorción. Dentro de las distintas configuraciones de nanoestructuras de carbono para almacenamiento de hidrógeno las principales líneas de investigación son: las nanofibras de grafito (GNF), los nanotubos de carbono de pared simple (SWNT) y los nanotubos de carbono de pared compuesta (MWNT).

#### **4.3.6. Sistema de almacenamiento de hidrógeno comerciales**

Para determinar la factibilidad de este proyecto es necesario conocer los sistemas de almacenamiento comercialmente disponibles, es por esto que se realizó un catastro de los productos de almacenamiento de hidrógeno ofertados por distintas marcas y que además entregan información técnica sobre estos. En la Tabla 7.1 (Anexo 3) se muestran las características técnicas de los distintos sistemas de almacenamiento de hidrógeno disponibles en el mercado, lo cuales se dividen en dos, hidrógeno comprimido a 700 [bar] e hidruros metálicos.

### **4.4. Análisis de los sistemas complementarios de potencia**

En el desarrollo de esta sección se analizarán las características y la oferta de los distintos sistemas complementarios de potencia (Baterías y Supercondensadores), con el fin de conocer la mejor alternativa para realizar la adaptación.

#### **4.4.1. Análisis de los supercondensadores**

Los SC son dispositivos capaces de administrar altos flujos de energía en comparación con las baterías. Aunque los SC proporcionan una potencia miles de veces mayor en el mismo volumen, no pueden almacenar la misma cantidad de energía que las baterías, entre 3 y 30 veces menor. Esto hace que los SC sean adecuados para aquellas aplicaciones en las que se necesitan grandes flujos de energía, y a la vez no se requiere una alta capacidad de almacenamiento. Los SC también pueden incluirse dentro de un sistema de almacenamiento (SAE) combinados con baterías para cumplir con las demandas de energía y potencia del ESS, mejorando el tamaño y ampliando su vida útil.

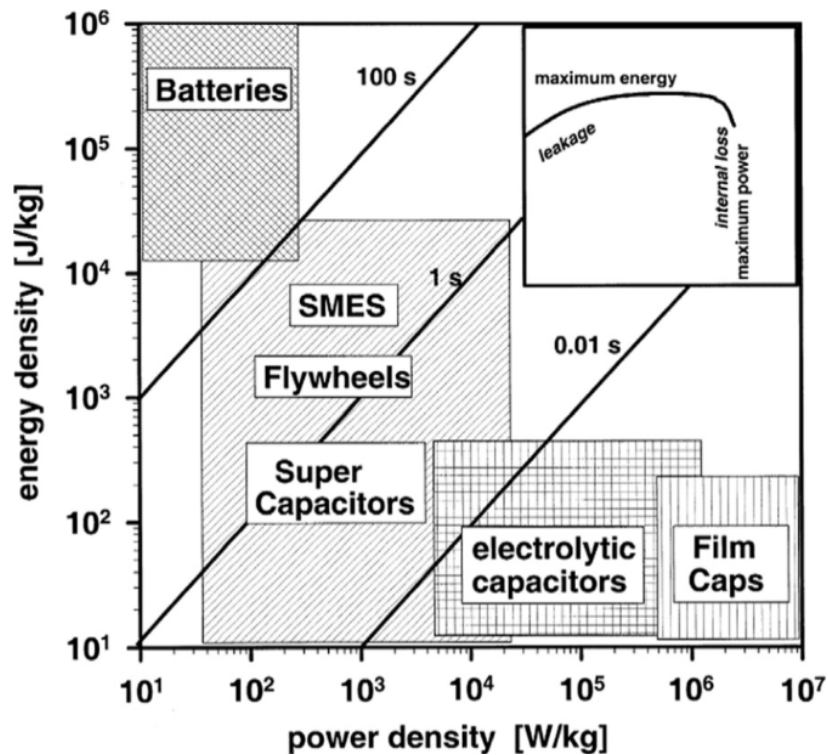


Figura 4.5: Gráfico Ragone que compara las distintas alternativas de almacenamiento de energía en cuanto a su densidad energética, de potencia y tiempos descargas [11]

La potencia de salida de los SC es inferior a la de los condensadores electrolíticos, pero puede alcanzar aproximadamente  $10 \text{ [kW/kg]}$ . La Figura 4.5 muestra un gráfico de Ragone, en el que las densidades de energía y potencia están representadas en los ejes horizontal y vertical, respectivamente, mostrando también el tiempo de descarga de los dispositivos en líneas diagonales.

La principal desventaja relacionada con el mecanismo de almacenamiento de energía es el voltaje de operación de un SC, el cual debe mantenerse bajo para evitar la descomposición química de los electrolitos. El rango de temperatura de trabajo es otra característica a destacar. Se puede lograr un alto rendimiento de potencia hasta  $-40^\circ \text{C}$ , lo que no es posible en este momento con baterías, además los SC son generalmente más seguros que las baterías para altas potencias de carga y descarga.

La celda de un SC comprende dos electrodos con un separador entre ellos. Los electrodos pueden ser idénticos para las células simétricas o diferentes para las células

asimétricas. El potencial de ruptura del electrolito en uno de los electrodos limita el voltaje de la celda, mientras que la resistencia en serie equivalente (RSE) de la celda dependerá en gran medida de la conductividad del electrolito. Según el mecanismo de almacenamiento o la configuración de la celda, se pueden distinguir los condensadores eléctricos de doble capa (EDLC), los pseudocapacitores y los condensadores híbridos. Los EDLC se basan en materiales nanoporosos de alta área de superficie específica ( $41000 [m^2/g]$ ) como materiales de electrodos activos, lo que lleva a una gran capacitancia en comparación con los capacitores electrostáticos. Los electrodos generalmente están hechos de materiales de carbono nanoporosos gracias a su disponibilidad, la producción industrial existente y el costo comparativamente bajo. Los pseudocapacitores se basan en electrodos conductores de polímeros u óxidos metálicos y, a veces, carbones porosos funcionalizados, que combinan mecanismos de almacenamiento de carga electrostáticos y pseudocapacitivos. Estos materiales pueden mantener valores de capacitancia específica mucho más altos, con el mecanismo de almacenamiento de carga que se basa en reacciones redox rápidas que ocurren en la superficie del electrodo, pero no en el volumen, como en las baterías. Sin embargo, al igual que en el caso de las baterías, las reacciones redox pueden provocar cambios mecánicos que hacen que los electrodos se hinchen y se contraigan, dando lugar a una estabilidad mecánica deficiente. En consecuencia, un ciclo de vida más bajo es una deficiencia importante de los materiales pseudocapacitivos. Finalmente, los condensadores híbridos están compuestos por un electrodo EDLC y un electrodo pseudocapacitivo o tipo batería, que combinan las propiedades de ambos sistemas y dan lugar a un rendimiento intermedio en algunos casos.

#### **4.4.2. Supercondensadores comerciales**

Para determinar la factibilidad de este proyecto es necesario conocer los supercondensadores comercialmente disponibles, es por esto que se realizó un catastro de los productos ofertados por diferentes marcas. En la Tabla 4.4.2 se muestra esta información.

| Marca    | Ancho [m] | Alto [m] | Largo [m] | Volumen [m <sup>3</sup> ] | Peso [kg] | Energía [kWh] | Potencia [kW] |
|----------|-----------|----------|-----------|---------------------------|-----------|---------------|---------------|
| Maxwell  | 0,707     | 0,265    | 0,425     | 0,08                      | 61        | 0,14          | 104           |
| Maxwell  | 0,515     | 0,263    | 0,22      | 0,03                      | 25        | 0,073         | 53            |
| Maxwell  | 0,292     | 0,116    | 0,2826    | 0,01                      | 6,3       | 0,0112        | 8             |
| Maxwell  | 0,418     | 0,194    | 0,157     | 0,01                      | 13,5      | 0,053         | 45            |
| Skele+on | 0,43      | 0,77     | 0,182     | 0,06                      | 63        | 0,2127        | 570           |
| Skele+on | 0,418     | 0,194    | 0,188     | 0,02                      | 15,8      | 0,0639        | 163           |
| Skele+on | 0,502     | 0,48     | 0,155     | 0,04                      | 28,8      | 0,1271        | 342           |

Tabla 4.2: Características de Supercondensadores disponibles en el mercado

#### 4.4.3. Análisis de las baterías

Las baterías son dispositivos electroquímicos que convierten la energía eléctrica en energía química potencial, durante la carga, y convierten la energía química en energía eléctrica, durante la descarga. Básicamente, una celda de batería consta de tres elementos primarios: dos electrodos (positivo y negativo) sumergidos en un electrolito. Las baterías generalmente se especifican a través de su capacidad coulométrica (amperios por hora), que se define como el número de horas en amperios ganadas al descargar la batería desde un estado completamente cargado hasta que la tensión del terminal cae a su voltaje de corte. Cabe señalar que la misma batería generalmente tiene un número diferente de amperios por hora a diferentes velocidades de descarga. En general, la capacidad se reduce con una gran tasa de descarga. Otro parámetro importante de una batería es el estado de carga (SOC), este se define como la relación entre la capacidad restante y la capacidad completamente cargada. Con esta definición, una batería completamente cargada tiene un SOC del 100 % y una batería completamente descargada tiene un SOC del 0 % [9].

Según el estudio realizado en [17] existe una gran variedad de baterías disponibles actualmente en el mercado entre las cuales se destacan:

##### Baterías de plomo

Las baterías de plomo son un tipo de baterías comunes en vehículos convencionales, no híbridos. Suelen ser de 6V y 12V y están constituidas internamente por celdas de 2V. Constituyen una parte importante del mercado mundial de baterías, tanto primarias como secundarias.

Poseen una gran capacidad de descarga durante un breves periodos de tiempo, lo que las hace ideales para el arranque de motores de combustión. Su forma más conocida es la batería de automóvil. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y en su interior una serie de placas de plomo dispuestas alternadamente.

### **Baterías Níquel Cadmio**

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de un compuesto de cadmio y un electrolito de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez agotada, para su reutilización y admiten sobrecargas. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo  $50 [Wh/kg]$ , por lo que poseen una capacidad media.

En la proximidad al estado de plena carga, se produce un aumento súbito de la tensión de la batería, provocada por un incremento de su resistencia interna, este efecto es conocido como “delta peak” y es utilizado por el cargador para evaluar el final de la carga. Desde el punto de vista funcional, las baterías de níquel-cadmio superan en sus prestaciones a la tecnología de plomo-ácido (tanto abiertas como de válvula regulada).

### **Baterías de níquel-hidruro metálico**

El hidruro metálico de níquel (NiMH) tiene un rendimiento similar al de la batería de NiCd, siendo la principal diferencia que en la batería de NiMH utiliza un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico, que las hacen libre de cadmio, lo que conlleva una ventaja considerable. Estas ventajas se centran básicamente en un aumento de la capacidad, una disminución del peso y un menor efecto memoria.

La tecnología de níquel-hidruro metálico tiene características eléctricas similares a la tecnología de níquel-cadmio. La tensión nominal por celda es 1,2V y las curvas de carga y descarga son bastante parecidas. Al igual que en las baterías de NiCd es el efecto “delta peak” el utilizado para marcar el fin de carga en las baterías.

## **Baterías litio**

El litio (LI) es el metal más ligero que existe, ya que al tener únicamente tres protones, su peso atómico es muy bajo. Permitiendo un gran potencial químico para crear baterías de gran capacidad con poco peso.

### **Polímero de Litio (LiPo):**

La batería de polímero de litio también conocida como lipo, se diferencia del resto de las baterías por el electrolito usado. Este electrolito se ensamblaba en un recipiente plástico que no conduce la electricidad, y que impide el paso de electrones.

El polímero sólido ofrece ventajas de fabricación, permitiendo alcanzar grosores de 1 milímetro, lo que permite crear baterías con el espesor de una tarjeta de crédito.

Desafortunadamente, el polímero sólido sufre de baja conductividad debido a la alta resistencia interna, por lo que no puede ofrecer la suficiente capacidad de descarga, además de aumentar su temperatura hasta cerca de 60 grados, lo que la hace inviable para ciertas aplicaciones. Para solucionar este problema se añade un gel al electrolito.

Las celdas de polímero de litio, utilizan una bolsa flexible de aluminio en lugar de fundas rígidas, esto conlleva un ahorro considerable en el peso y el tamaño que demanda cada celda, un 20 % más ligero que el equivalente en pilas cilíndricas. Estas baterías pueden también impulsar la próxima generación de vehículos eléctricos de baterías. El coste de un coche eléctrico de este tipo es prohibitivo, pero los defensores argumentan que con el aumento de la producción, el costo de las baterías de Li-Po bajará.

### **Ion de Litio (con cátodo de LiCoO<sub>2</sub>):**

Las baterías de litio-ion con cátodo de LiCoO<sub>2</sub>, son comunes en la electrónica de consumo. Se trata de uno de los tipos más populares de baterías recargables para dispositivos electrónicos portátiles, con la mejor relación peso energía, sin efecto memoria y una lenta pérdida de la carga cuando no están en uso.

Más allá de la electrónica de consumo, están creciendo en popularidad para usos militares, vehículos aeroespaciales y distintas aplicaciones debido a su alta densidad energética.

Este tipo de baterías poseen la mayor “densidad energética” y “energía específica” del mercado, por el contrario poseen una de las capacidades de descarga más bajas, razón por la cual suelen encontrarse en la mayoría de los aparatos electrónicos que no exigen bruscas descargas de corriente, como es el caso de portátiles, móviles etc.

### **Ion de litio con cátodo de $\text{LiFePO}_4$ :**

Las baterías de ion de litio con cátodo de  $\text{LiFePO}_4$ , son una variación de las baterías de ion de litio con cátodo de  $\text{LiCoO}_2$ . Son normalmente conocidas por las siglas “LIFE”.

El fosfato de hierro litio ( $\text{LiFePO}_4$ ), posee un bajo costo, no es tóxico, tiene una alta abundancia de hierro, una excelente estabilidad térmica, buenas características de seguridad y un rendimiento electroquímico bueno. La mejora de su conductividad respecto al ion de litio con ánodo  $\text{LiCoO}_2$  se debe a la presencia de nanotubos de carbono.

Una ventaja clave sobre las baterías de ion de litio es su mejor estabilidad química y térmica, la cual ofrece mejores características de seguridad que el resto de baterías de litio.

Comparando el fosfato de hierro litio, con su antecesor de mayor capacidad el ion de litio, se aprecia que a partir del año la densidad energética en una batería de  $\text{LiCoO}_2$  será aproximadamente la misma que una de  $\text{LiFePO}_4$ . Después de dos años la densidad energética de batería  $\text{LiCoO}_2$  será inferior a una de  $\text{LiFePO}_4$ . Esto es debido, a una mayor vida útil por parte de  $\text{LiFePO}_4$ .

Una de las principales ventajas de  $\text{LiFePO}_4$  en comparación con  $\text{LiCoO}_2$  es mayor capacidad de descarga. La química del fosfato de hierro litio ofrece el ciclo de vida más largo de las baterías existentes en el mercado actual.

Este trabajo realiza una comparativa entre estas las distintas tecnologías y resumiendo las características principales en la Tabla 4.4.3.

| Tecnología / Parámetro     | Pb-ácido  | Ni-Cd      | Ni-MH      | Li-ión [LiCoO <sub>2</sub> ] | LiFe       | LI-PO   |
|----------------------------|-----------|------------|------------|------------------------------|------------|---------|
| Voltaje (V/celda)          | 2v        | 1.2v       | 1.2v       | 3.6/3.7v                     | 3.3v       | 3.7v    |
| Autodescarga ( %/mes)      | 3 %-20 %  | 10 %       | 30 %       | 8 %                          | -          | 5 %     |
| Descarga en continua       |           | 10c        | 8c         | 1c                           | 26c        | 20-45c  |
| Descarga por picos         | -         | -          | -          | -                            | 52c        | 30-90c  |
| Mantenimiento              | Bueno     | Malo       | Regular    | Fácil                        | Bueno      | Fácil   |
| Ciclos de vida             | 500-800   | 1500-2000  | 300-500    | 400-1200                     | 2000       | +1000   |
| Densidad energética [wh/l] | 60-75     | 50-150     | 140-300    | 250-360                      | 220        | 300     |
| Energía específica [Wh/kg] | 30-40     | 40-60      | 30-80      | 100-250                      | 90-110     | 130-200 |
| Potencia específica [W/Kg] | 180       | 150        | 250-1000   | 250-340                      | 3000       | 7100    |
| Corriente carga rápida [C] | 0.4       | 01-02      | 01-02      | 1                            | 4          | 01-02   |
| Eficiencia. Carg/Desca     | 50 %-92 % | 70 %-90 %  | 66 %       | 80 %-90 %                    | -          | 99.8 %  |
| Tolerancia a sobrecargas   | -         | M. buena   | Media      | M. mala                      | Mala       | M. mala |
| Robustez a impactos        | Buena     | M. buena   | Buena      | M. mala                      | Media      | M. mala |
| Altas temperaturas         | Media     | M. buena   | Media      | M. mala                      | Mala       | M. Mala |
| Problemas de ecualización  | No        | No         | No         | Si                           | Si         | Si      |
| Seguridad                  | M. buena  | M. buena   | M. buena   | M. buena                     | M.buena    | Buena   |
| Formato                    | -         | Cilíndrico | Cilíndrico | Prisma                       | Pris/Cilin | Prisma  |

Tabla 4.3: Comparativa de diferentes tipos de baterías [17]

Gracias a esta tabla se ve claramente que la mejor opción de baterías son las fabricadas a partir del Litio debido a su fácil mantenimiento, peso, volumen, densidad energética y su eficiencia de carga y descarga.

#### 4.4.4. Baterías comerciales

Para determinar la factibilidad de este proyecto es necesario conocer las baterías comercialmente disponibles, es por esto que se realizó un catastro de los productos ofertados por diferentes marcas (Tabla 4.4).

| Marca         | Capacidad [Ah] | Voltaje [V] | Energía [kWh] | Peso [kg] | Ancho [m] | Alto [m] | Largo [m] | Volumen[m3] | D. Volumétrica | D. Gravimétrica |
|---------------|----------------|-------------|---------------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|----------------|-----------------|
| A123          | 8              | 48          | 0.4           | 8         | 0.30      | 0.10     | 0.18      | 0,005       | 73             | 0,05            |
| A123          | 6              | 48          | 0.3           | 7         | 0.30      | 0.10     | 0.18      | 0,005       | 55             | 0,04            |
| A123          | 78             | 80,3        | 6.3           | 126       | 0,242     | 0,165    | 0,592     | 0,024       | 265            | 0,05            |
| GSTUASA       | 25             | 28,8        | 0.7           | 18        | 0,44      | 0,22     | 0,13      | 0,012       | 58             | 0,04            |
| GSTUASA       | 25             | 43,2        | 1.1           | 27        | 0,62      | 0,22     | 0,13      | 0,017       | 62             | 0,04            |
| Saftbatteries | 205            | 24          | 4.9           | 110       | 0,72      | 0,21     | 0,62      | 0,094       | 52             | 0,04            |
| Saftbatteries | 410            | 24          | 9.8           | 151       | 0,72      | 0,21     | 0,62      | 0,094       | 105            | 0,07            |
| Saftbatteries | 82             | 24          | 2.0           | 51        | 0,65      | 0,16     | 0,63      | 0,063       | 31             | 0,04            |
| Saftbatteries | 164            | 24          | 3.9           | 71        | 0,65      | 0,16     | 0,63      | 0,063       | 62             | 0,06            |

Tabla 4.4: Características de las baterías de Litio disponibles en el mercado

## 4.5. Análisis de los motores eléctricos

Un motor eléctrico es una máquina rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía cinética a través de la acción de los campos magnéticos generados en las bobinas, estos están compuestos por un estátor, que es la parte fija del motor y un rotor que es la parte móvil o giratoria de la máquina.

Según la plataforma EV Motor Power and Motor Metals Tracker de Adamas Intelligence, durante el año 2018 el 93 % de los autos eléctricos vendidos contaban con un tren de potencia impulsado por un motor de imanes permanentes, debido principalmente a su menor tamaño y mayor eficiencia.

Un motor eléctrico de imanes permanentes es fabricado con imanes compuestos por tierras raras. Gracias a ellos, no necesitan excitación externa, ni escobillas, para generar el campo magnético en el rotor y hacerlo girar cuando se expone al campo generado externamente en el estátor, lo que los hace más compactos y sencillos. Los imanes permanentes se generalizaron industrialmente en la década de 1990. Esto se debe a su mayor eficiencia, hasta un 15 % en relación con los motores asíncronos de inducción, alcanzando mayor densidad de potencia disponible, tanto gravimétrica (kW/kg) como volumétrica (kW/cm<sup>3</sup>).



Figura 4.6: Comparativa de costes entre un motor de imanes permanentes y un motor de inducción [10]

El mayor problema de este tipo de motores es que contienen materiales difíciles de conseguir. Esta circunstancia los hace más caros de fabricar. Sin embargo, desde

el punto de vista de los fabricantes, su mayor eficiencia permite que otro componente fundamental como la batería, pueda ser de menor tamaño, manteniendo la autonomía. Aumentar la capacidad de un paquete de baterías de 60 [kWh] en un 5 %, para compensar el uso de un motor de inducción (asíncrono de excitación externa), puede aumentar el coste del tren motriz en más de 300 dólares.

Adamas concluye que la demanda de motores de imanes permanentes continuará creciendo en el futuro. Sin embargo, esta tendencia podría invertirse por el aumento de la oferta y demanda de vehículos eléctricos, lo que está provocando que el coste de las baterías por kWh esté disminuyendo más rápido de lo esperado. Esto abre la puerta al uso de motores de inducción para evitar el uso, de materiales escasos y dependientes de pocos suministradores, como son los imanes permanentes de tierras raras.

Tras años de desarrollo se ha logrado un sistema muy compacto, capaz de generar hasta 250 kW de potencia y que, gracias a la excitación externa, permite un mayor control del torque del motor, maximizando la potencia y la eficiencia.

Debido a las características de alta densidad de potencia a nivel volumétrico y gravimétrico, y por su eficiencia energética este tipo de motores es la mejor opción para realizar la adaptación del cargador frontal.

#### 4.5.1. Motores eléctricos de imanes permanentes comerciales

Para determinar la factibilidad de este proyecto es necesario conocer los motores eléctricos de imanes permanentes de 160 [kW] comercialmente disponibles, es por esto que se realizó un catastro de los productos ofertados por diferentes marcas (Tabla 4.5).

| Marca          | Ancho [m] | Alto [m] | Largo [m] | Volumen[m3] | Peso [kg] |
|----------------|-----------|----------|-----------|-------------|-----------|
| <b>Siemens</b> | 0,61      | 0,797    | 1,153     | 0,56        | 960       |
| <b>Nidec</b>   | 0,63      | 0,845    | 1,18      | 0,63        | 1160      |
| <b>Weg</b>     | 0,639     | 0,577    | 0,825     | 0,30        | 798       |

Tabla 4.5: Características de los motores eléctricos de imanes permanentes disponibles en el mercado

## 4.6. Análisis de convertidores e inversores

Los componentes que entregan potencia dentro de la adaptación no son capaces de llegar a los voltajes que accionan los motores eléctricos por lo que es necesario elevar la tensión que proveen al sistema a través de un convertidor DC/DC. Además las celdas de combustible, los SC y las baterías entregan su potencia en corriente continua y generalmente los motores actualmente fabricados para estos propósitos funcionan en corriente alterna por lo que es necesario realizar esta transformación a través de un inversor DC/AC.

### 4.6.1. Convertidor DC/DC

Los convertidores DC/DC elevan la tensión o la disminuyen según lo solicita el sistema, para ello existen las topología Buck y Boost.

#### Convertidor Boost

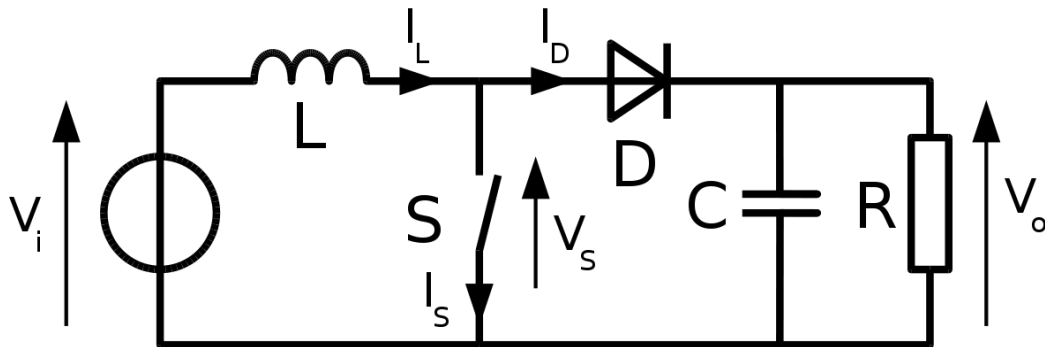


Figura 4.7: Circuito eléctrico convertidor Boost

La operación Boost consiste en conmutar el semiconductor para transferir energía de la fuente hacia la carga. Esto se logra cargando la inductancia al producir un cortocircuito de corta duración a través de ésta cuando se cierra  $S$ . Luego se abre  $S$  y la energía contenida en la inductancia pasa a través del diodo. [8].

## Conversor Buck

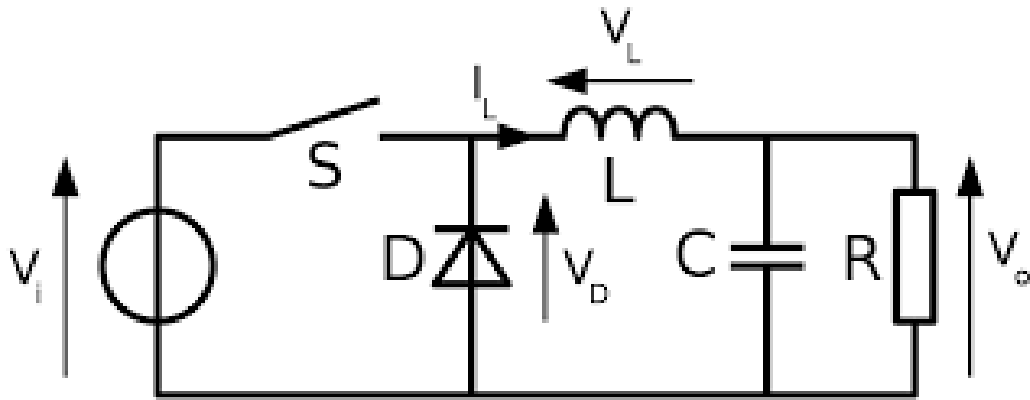


Figura 4.8: Circuito eléctrico conversor Buck

La operación Buck consiste en conmutar el semiconductor, transfiriendo así energía desde la fuente a la carga. Al cerrarse  $S$  pasa corriente a través de este y de la inductancia, en ese instante parte de la energía se transfiere a la carga, una pequeña fracción se disipa en la resistencia y otra parte se carga en la inductancia. Cuando se abre  $S$  la energía que se cargó en la inductancia se descarga en la carga, a través del diodo, obligando a la corriente a continuar hacia la carga [8].

Según [8] para sistemas de potencia que utilicen baterías y SC se hace necesario seleccionar convertidores de potencia tipo Buck-Boost ya que tienen la capacidad de transferir energía en ambos sentidos entre dos puntos fuentes de tensión, es decir, pueden elevar el voltaje o disminuirlo según sea necesario. Esta capacidad sirve para transferir energía desde las baterías y SC hacia el motor eléctrico e inversamente cuando está en funcionamiento el freno regenerativo. Para la celda de combustible solo es necesario un convertidor DC/DC tipo Boost ya que la transferencia de energía es en un solo sentido y se desea elevar la tensión.

### 4.6.2. Inversor DC/AC

Los inversores son aparatos eléctricos capaces de transformar la corriente desde alterna a continua. Un inversor simple consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda rectangular.

Esta onda rectangular alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo la tensión de salida necesaria. La forma de onda de salida de la tensión de un inversor ideal debería ser sinusoidal. Una buena técnica para lograr esto es utilizar la técnica de PWM logrando que la componente principal senoidal sea mucho más grande que las armónicas superiores. Según [2] la mejor opción de inversor para un sistema accionado por celdas de combustible es la topología de Elevador Puente Completo con Active-Clamp. Estos componentes son capaces de administrar la velocidad de los motores eléctricos y así poder cumplir con las demandas de torque y potencia solicitadas por la operación.

## Capítulo 5

# Formulación de la ingeniería conceptual de adaptación

Para realizar la adaptación del cargador frontal con un motor de combustión interna a una máquina eléctrica con base energética en el hidrógeno y las celdas de combustible, es necesario retirar todos los componentes asociados al motor diésel como lo es el motor y el tanque de combustible (petróleo diésel). Al extraer estos elementos del cargador frontal JCB 456 ZX se dispone de un total de 1.120 litros (estanque 215 litros y motor 905 litros). Con la disponibilidad de espacio ya determinada es necesario conocer el volumen que utilizarán los componentes electromecánicos principales para la adaptación. En este capítulo se dimensionan y detallan las especificaciones técnicas de los componentes de la adaptación basados en el consumo energético y la capacidad de potencia de cada uno de estos, dejando de lado los parámetros eléctricos de voltaje y corriente, ya que al no conocer con especificaciones la dinámica operacional del cargador frontal, se hace dificultoso reconocer estos parámetros para dimensionar, por esta misma razón se obvió el dimensionamiento de inversores y convertidores, además estos componentes, a nivel volumétrico y gravimétrico, no aportan de manera preponderante al peso y volumen de la adaptación, pudiendo así omitir el cálculo del impacto sobre la adaptación. Por lo que la metodología presentada a continuación da un acercamiento a nivel de perfil de los mínimos energéticos y de potencia que deben cumplir los aparatos.

## 5.1. Dimensionamiento de la celda de combustible

Las celda de combustible es la principal fuente de energía eléctrica dentro del tren de potencia de la adaptación y se caracterizan según su potencia nominal, estas se deben seleccionar sin ser sobredimensionadas, ya que la celda de combustible representa el mayor costo dentro de los componentes de la adaptación y este valor es proporcional a la potencia que entrega. Por otra parte la celda de combustible debe ser capaz de entregar una base energética sin verse afectada por cambios dinámicos bruscos en el desarrollo de la operación de la máquina minera. Según [6] una celda de combustible de potencia 20 [kW] puede variar su potencia hasta en 4 [kW/s] por lo que en 1 segundo puede variar su flujo energético en un 20 % de su potencia nominal. Las celdas no son capaces de afrontar cambios bruscos en el flujo energético que entregan, ya que afecta directamente en la vida útil del aparato, por lo que se recomienda que esta opere con la menor variación en los flujos de energía. Además de entregar una base energética también debe ser capaz de cargar al sistema complementario de potencia cuando este se encuentre descargado, esto se efectúa cuando el consumo de energía en la operación del cargador frontal no está en su peak de potencia, es decir, aquellas etapas que sobrepasen la potencia máxima de la celda de combustible. Por lo tanto la potencia de la celda debe ser capaz de suministrar toda la energía durante un ciclo operacional. Para determinar este parámetro se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones, donde la Ecuación 5.1 y 5.3 restringen a la potencia de la celda de combustible para que cumpla con el suministro de energía en el tiempo acotado por un ciclo operacional.

$$\int_0^{t_{ciclo}} P_{cc}(t) dt = E_{ciclo} \quad (5.1)$$

$$P_{cc}(t) = \begin{cases} m_{PEM}t & \text{si } t \leq \frac{P_{PEM}}{m_{PEM}} \\ P_{PEM} & \text{si } \frac{P_{PEM}}{m_{PEM}} < t < t_{ciclo} - \frac{P_{PEM}}{m_{PEM}} \\ P_{PEM} - m_{PEM}t & \text{si } t \geq t_{ciclo} - \frac{P_{PEM}}{m_{PEM}} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\frac{P_{PEM}}{m_{PEM}} + t_{Pot.cte.} + \frac{P_{PEM}}{m_{PEM}} = t_{ciclo} \quad (5.3)$$

Donde  $E_{ciclo}$  es la energía total del ciclo operacional (11.243 [kJ]),  $t_{ciclo}$  es el tiempo del ciclo operacional (126,6 [s]),  $P_{cc}(t)$  es la potencia en función del tiempo que entregará la celda de combustible en el transcurso del ciclo operacional,  $m_{PEM}$  es la variación en función del tiempo de la potencia de la celda de combustible ( $0,2P_{PEM}$  [kW/s]) y  $P_{PEM}$  es la potencia nominal que debe tener la celda de combustible, que para el caso de esta estudio es igual a 92,46[kW].

Siguiendo las premisas anteriormente propuestas y comparando los parámetro de operación del cargador frontal con la disponibilidad de equipos comerciales, se llega a la conclusión que la mejor opción de selección de la celda de combustible para el cargador frontal JCB 456 ZX es la Celda marca Ballard Modelo hd 100, ya que su potencia nominal es de 100 kW por lo que es capaz de suministrar energía durante las etapas de transporte y retorno; y además cargar el sistema complementario de potencia en el tiempo de un ciclo. Esta celda de combustible tiene un valor de potencia máxima aprovechable de 98 [kW], a esta se le debe sumar un volumen de 250 [L] y un peso de 434 [kg] debido a un sistema independiente de inyección de aire y refrigeración. La Figura 5.1 muestra la variación de la potencia en función del tiempo según los parámetros seleccionados y especificados anteriormente.

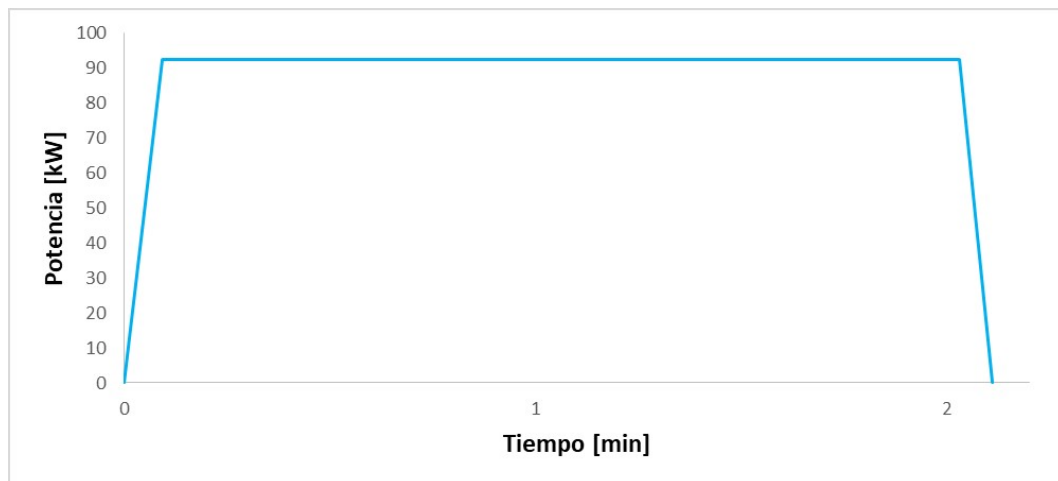


Figura 5.1: Distribución de la potencia en función del tiempo de la celda de combustible en un ciclo operacional

## 5.2. Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno

Para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento es necesario cumplir con las exigencias energéticas de operación, para ello se conoce la energía de cada turno, la cual es 1.372 [MJ]. La celda de combustible tipo PEM tiene una eficiencia promedio de 50 % y el motor eléctrico tiene una eficiencia de un 90 %. Para calcular la energía que debe almacenarse en hidrógeno se debe utilizar la Ecuación 5.4.

$$E_{H_2} = \frac{E_{operacional}}{\eta_{motor}\eta_{PEM}} \quad (5.4)$$

Donde  $E_{H_2}$  es la energía que debe almacenarse en hidrógeno,  $E_{operacional}$  es la energía utilizada en la operación,  $\eta_{PEM}$  es la eficiencia de la celda de combustible y  $\eta_{motor}$  es la eficiencia del motor.

Utilizando la Ecuación 5.4 se determina que la energía que deberían almacenar los tanques de hidrógeno es 3.048 [MJ]. Se conoce que el poder calorífico inferior del hidrógeno es de 120 [MJ/kg]. Por lo tanto para calcular el peso del hidrógeno, se debe utilizar la Ecuación 5.5.

$$HM_{H_2} = \frac{E_{H_2}}{PCI_{H_2}} \quad (5.5)$$

Donde  $M_{H_2}$  es la masa de hidrógeno y  $PCI_{H_2}$  es el poder calorífico inferior del hidrógeno. Utilizando la Ecuación 5.5 se determina que la masa de hidrógeno necesaria es de 25,4 [kg] por turno.

Dentro de las alternativas de sistemas de almacenamiento de hidrógeno hay dos opciones factibles de implementar, una es el almacenamiento en tanques a presión de 700 bar y la otra es la acumulación de hidrógeno en hidruros metálicos (MH), ambos tienen características favorables y desfavorables. Los tanques a presión tienen una mejor densidad de energía gravimétrica que los tanques de MH, por otra parte estos últimos tienen una mejor densidad de energía volumétrica en comparación a los tanque a 700 bar. Si se desea optimizar la adaptación por volumen se debe seleccionar un sistema de almacenamiento de MH en cambio si se desea optimizar por peso se debe seleccionar un sistema de almacenamiento de tanques a presión de 700 bar. Si dentro de los componentes comercialmente disponibles comparamos al que tiene mejor densidad vo-

lumétrica (tanque de Hidruro metálico) y con el que tiene mejor densidad gravimétrica (tanque a Presión) el de Metal hidruro es 500 % más pesado pero solamente 35 % menos volumétrico, por lo que se selecciona el almacenamiento a presión.

En base a la oferta de estos productos en el mercado, detallados en la tabla 7.1 (capítulo 3 sección 3.3), se seleccionó aquel que tiene la mejor densidad de energía volumétrica y cuya capacidad de almacenamiento de hidrógeno es de 1,6 [kg] por lo que es necesario contar con 16 tanques de este tipo para almacenar los 26 [kg] de hidrógeno y satisfacer la demanda energética operacional. Sabiendo que cada tanque ocupa un volumen de 90 [L], un peso de 29 [kg] y teniendo en cuenta la necesidad de 16 tanques el peso y volumen total del sistema de almacenamiento de hidrógeno es de 464 [kg] y 1.450 [L]

### **5.3. Dimensionamiento del sistema complementario de potencia**

En esta sección se dimensionará y seleccionará el mejor producto comercial para los SC y las baterías.

#### **5.3.1. Estrategia de control de potencia**

Para dimensionar un sistema de potencia híbrido es necesario reconocer las características de cada uno de sus componentes y con esta información identificar el momento en el que cada uno de ellos debe proveer de energía. Para ello se debe realizar una estrategia de control que administre el funcionamiento de los equipos de potencia.

Los equipos que suministrarán potencia en esta adaptación serán las celdas de combustible, con una dinámica de potencia baja, los SC, con una dinámica de potencia alta, y las baterías con una dinámica de potencia intermedia.

#### **Celdas de combustible**

Las celdas de combustible generarán una base energética con una potencia de baja variabilidad, esta energía es utilizada para alimentar al sistema. Cuando la demanda de potencia es menor al flujo energético que está entregando la celda, este delta de energía

es utilizado para cargar las baterías, siempre y cuando, estas se encuentren con un SOC menor al 90 %.

### **Supercondensadores**

Los SC están encargados de suministrar grandes potencias en cortos periodos de tiempo, es decir, cuando la celda de combustible no es capaz de suministrar la demanda de potencia del sistema estos proveen del flujo energético necesario. También estos aparatos son lo primeros en acumular la energía proveniente del sistema de freno regenerativo, siempre y cuando el voltaje no supere el máximo voltaje permitido por los SC. Por otra parte cuando estos aparatos se encuentran descargados y no están acumulando energía desde el freno regenerativo la batería es la encargada de cargarlo, siempre y cuando, esta tenga un estado carga (state of charge SOC) superior al 70 %.

### **Baterías**

Las baterías tienen variadas funciones dentro de la acumulación de energía y la transmisión de potencia, una de ellas es suministrar de energía al sistema cuando este llega a un mínimo, según [4] 7,55 % de la potencia nominal de la celda de combustible. Para el caso de este estudio, la potencia mínima es de 10 [kW]. También son las encargadas de suministrar potencia cuando, en combinación, el SC y las celdas de combustibles no son capaces de suplir la demanda. Son las responsables de acumular la energía proveniente de la celda de combustible cuando la potencia requerida por el sistema es menor a la potencia que está entregando la celda de combustible, y de liberar esta cuando los SC se encuentran descargados. Finalmente acumulan la energía que proviene del sistema de freno regenerativo cuando el voltaje supera el máximo del SC. Se recomienda que el SOC se muevan en un rango 70 % y 90 % [12] por lo que estas deben entregar y acumular energía hasta que se llegue a estos límites y a la vez no sobrepasar el flujo de corriente determinado por el fabricante de cada batería, por otra parte cuando estas se encuentren con un SOC de 70 % o menor y necesitan de proveer de energía al sistema la encargada de elevar su SOC es la celda de combustible.

En base a lo antes mencionado se genera un diagrama de flujo que explica la administración de las potencias de cada componente para suplir la demanda energética operacional (Figura 5.2).

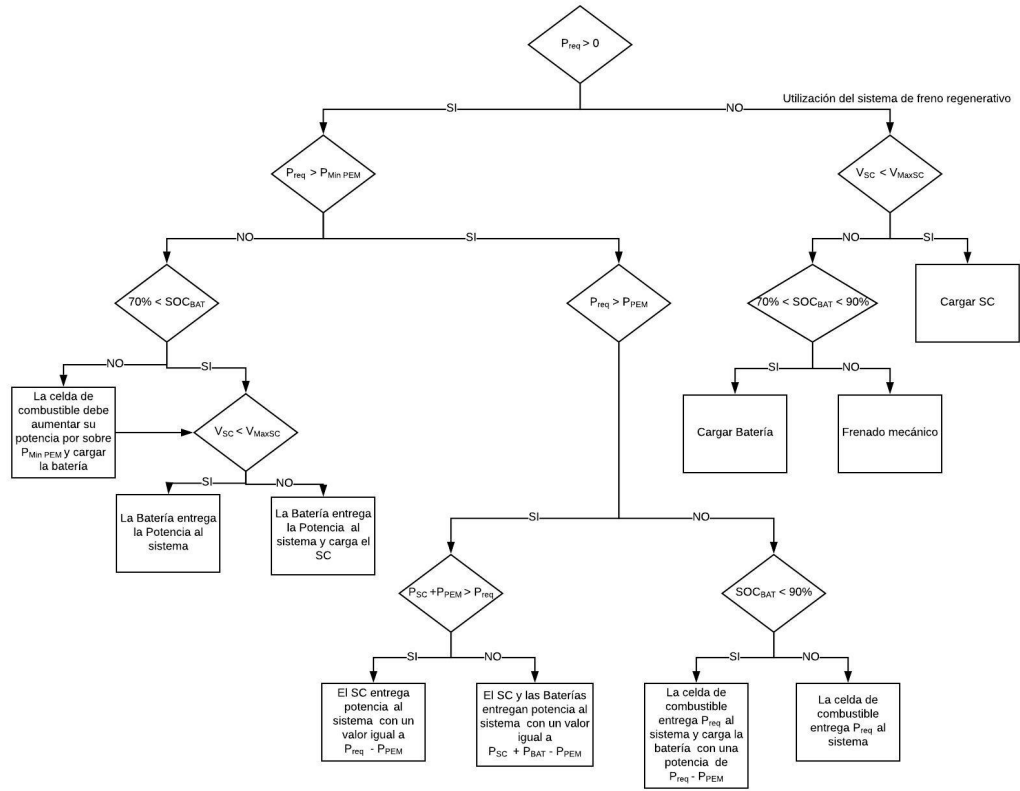


Figura 5.2: Diagrama de flujo de la estrategia de control del sistema de generación y almacenamiento de energía de la adaptación

### 5.3.2. Dimensionamiento de las baterías

Para el caso de las baterías estas deben ser capaces de suministrar la potencia cuando la celda de combustible no puede satisfacer la demanda y además cuando estos intervalos son de largos periodos de tiempo. Por lo que para el caso del ciclo operacional estudiado la energía que debe almacenar la batería se representa en la ecuación 5.6.

$$E_B = \int_0^{t_{ciclo}} P_{Bat} dt \quad (5.6)$$

$$P_{Bat}(t) = \begin{cases} m_{Bat}(t)t - P_{cc}(t) & si & t \leq t_{carga} \\ P_{trpte} - P_{cc}(t) & si & t_{carga} < t < t_{trpte} + t_{carga} \\ P_{trpte} - m_{Bat}(t)t - P_{cc}(t) & si & t_{trpte} + t_{carga} < t < t_{trpte} + t_{carga} + t_{descarga} \\ 0 & si & t_{trpte} + t_{carga} + t_{descarga} < t < t_{ciclo} \\ P_{aux} & si & t \geq t_{pausa} \end{cases} \quad (5.7)$$

Donde  $P_{Bat}(t)$  es la potencia que debe entregar la batería al sistema,  $m_{Bat}(t)$  es la variación en función del tiempo de la potencia de la batería,  $P_{trpte}$  es la potencia asociada a la etapa de transporte del ciclo operacional,  $t_{carga}$ ,  $t_{trpte}$ ,  $t_{descarga}$  son los tiempos que demoran las etapas de carga, transporte y descarga en ciclo operacional,  $t_{pausa}$  es el tiempo que está detenido el cargador frontal durante un ciclo operacional y  $E_{Bat}$  es la energía que debe almacenar la batería la cual para el caso de estudio tiene un valor de 0,91 [kWh], como se recomienda que esta energía sea liberada entre un SOC de 70 % a 90 % por lo que las baterías finalmente tienen que tener una capacidad de almacenamiento final de 4,55 [kWh].

Gráficamente la distribución de la potencia en función del tiempo de la batería se muestra en la Figura 5.3.

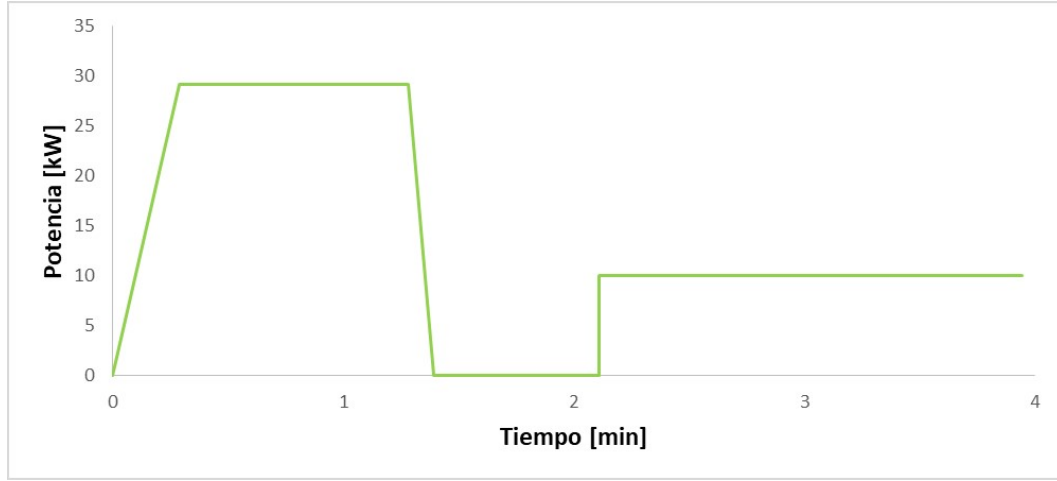


Figura 5.3: Variación de la potencia de la batería en función del tiempo durante un ciclo operacional

Conociendo la energía que debe almacenar la Batería se procede a seleccionar este elemento a partir de la Tabla 4.4 (Capítulo 3 sección 3). Con esta información se analiza la cantidad de baterías necesarias, al dividir la energía a almacenar de la batería por la energía de almacenamiento de cada batería comercial, para luego con esta información determinar el volumen y peso total ocupado.

$$N_B = \frac{E_{Baterias_{total}}}{E_{alm}} \quad (5.8)$$

$$V_{total_{Bat}} = N_B V_{Bat} \quad (5.9)$$

$$W_{total_{Bat}} = N_B W_{Bat} \quad (5.10)$$

$E_{alm}$  es la energía de almacenamiento de la batería seleccionada (6,3 [kWh]),  $V_{Bat}$  es el volumen de ocupado por la batería seleccionada (24 [L]),  $W_{SC}$  es el peso de la batería seleccionada (126 [kg]).  $N_B$  es la cantidad de baterías necesarias para cumplir con las necesidades de energía, el cual, en este caso son 1 unidad,  $V_{total_{Bat}}$  es el volumen ocupado por la batería, en esta oportunidad es igual a 24 [L] y  $W_{total_{Bat}}$  es el peso total de la batería, en esta oportunidad es igual a 126 [kg].

### 5.3.3. Dimensionamiento de los Supercondensadores

Los SC son los encargados de suministrar la energía durante los peaks de potencia, para el caso del ciclo. El dimensionamiento de un SC se debe realizar en base a un

máximo energético, es decir, este debe entregar la energía para las etapas de carga y descarga del ciclo operacional y ser capaz de acumular la energía proveniente del freno regenerativo. Por lo que debe proveer al sistema la diferencia de potencia y energía entre lo que entrega la celda de combustible y las baterías mientras que estos llegan a su punto operacional determinado. A través de la Ecuación 5.11 se determina la energía que debe acumular el SC.

$$E_{SC} = \int_0^{t_{ciclo}} P_{SC}(t) dt \quad (5.11)$$

$$P_{SC}(t) = \begin{cases} P_{req} - m_{Bat}(t)t & si & t \leq t_{carga} \\ 0 & si & t_{carga} < t < t_{trpte} + t_{carga} \\ P_{req} - m_{Bat}(t)t - P_{cc}(t) & si & t_{trpte} + t_{carga} < t_{trpte} + t_{carga} + t_{descarga} \\ 0 & si & t \geq t_{trpte} + t_{carga} + t_{descarga} \end{cases} \quad (5.12)$$

Donde  $P_{req}$  es la potencia requerida por el sistema,  $t_{descarga}$  es el tiempo que demora la etapa de descarga del ciclo operacional y  $E_{SC}$  es la energía que debe almacenar el SC que para el caso de este estudio es de 0,61[kWh].

Gráficamente la distribución de la potencia en función del tiempo del SC se muestra en la Figura 5.4.

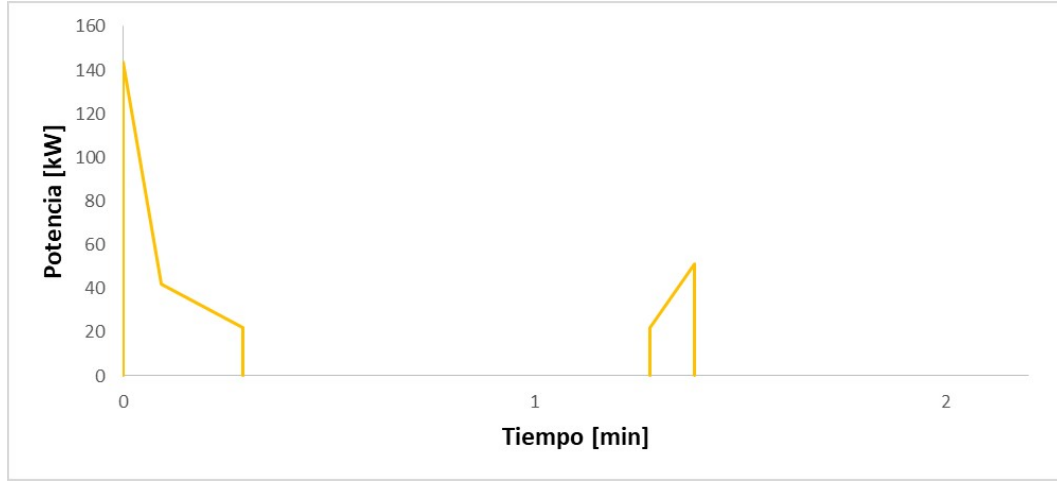


Figura 5.4: Variación de la potencia del supercondensador en función del tiempo durante un ciclo operacional

Conociendo la energía que debe almacenar el SC se procede a seleccionar este elemento a partir de la Tabla 4.4.2. Con esta información se analiza la cantidad de SC necesarios, al dividir la energía a almacenar del SC por la energía de almacenamiento de cada SC comercial, para luego con esta información determinar el volumen y peso total ocupado.

$$N_B = \frac{E_{SC_{total}}}{E_{alm}} \quad (5.13)$$

$$V_{total_{SC}} = N_{SC} V_{SC} \quad (5.14)$$

$$W_{total_{SC}} = N_{SC} W_{SC} \quad (5.15)$$

$E_{alm}$  es la energía de almacenamiento del SC seleccionado (0,213 [kWh]),  $V_{SC}$  es el volumen ocupado por el SC seleccionado (60 [L]),  $W_{SC}$  es el peso del SC seleccionado (63 [kg]).  $N_{SC}$  es la cantidad de SC necesarios para cumplir con las necesidades de energía, el cual, en este caso son 3 unidades,  $V_{total_{SC}}$  es el volumen ocupado por todos los SC, en esta oportunidad es igual a 180 [L] y  $W_{total_{SC}}$  es el peso total de todos los SC, en esta oportunidad es igual a 189 [kg].

### 5.3.4. Resultado de la aplicación de la estrategia de control en el ciclo operacional

La figura 5.5 resume el resultado de la aplicación la estrategia de control para la administración de la potencia de los componentes de la adaptación.

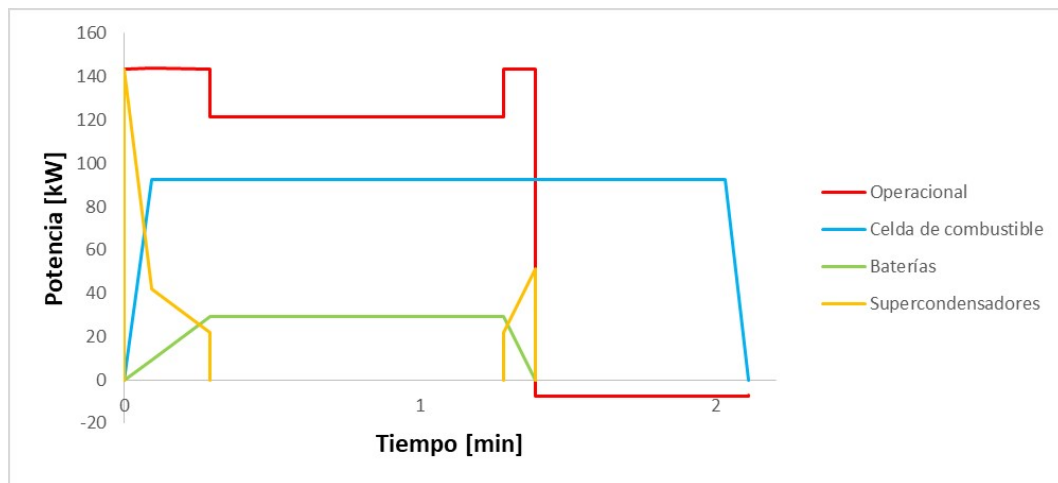


Figura 5.5: Potencia en función del tiempo de los distintos componentes de la adaptación durante un ciclo operacional

La Figura 5.6 muestra que componente es el encargado de suplir la demanda energética en función del tiempo dentro del ciclo operacional.

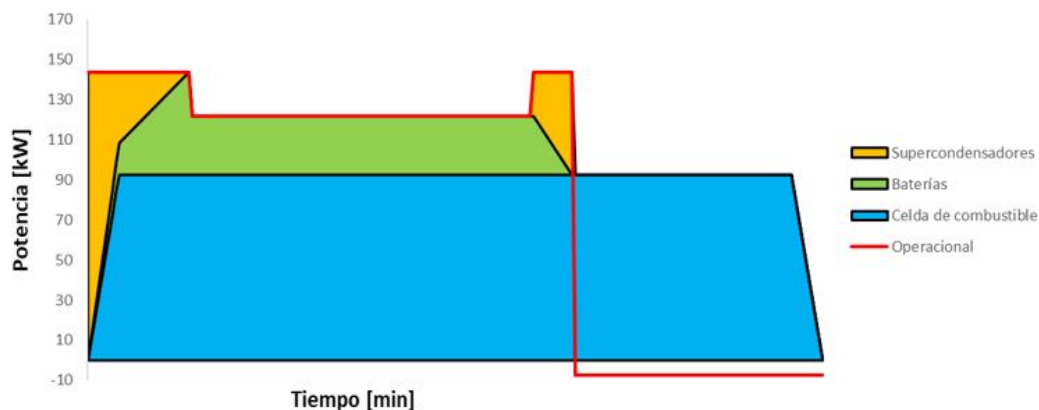


Figura 5.6: Energía en función del tiempo de los distintos componentes de la adaptación durante un ciclo operacional

## 5.4. Dimensionamiento del motor eléctrico

El motor eléctrico debe ser capaz de suministrar la potencia máxima del cargador (160 [kW]) y el torque máximo que solicita la máquina minera (680 [Nm]). Dentro de los motores comercialmente disponible analizados en la Tabla 4.5 (Capítulo 3 sección 3.5), la mejor opción para ser seleccionado es el de marca WEG debido a su volumen y peso comparativamente menores.

## 5.5. Disposición final de los componentes

En esta sección se resumirá y representará gráficamente la adaptación del cargador frontal JCB 456 ZX según el dimensionamiento anteriormente planteado.

### 5.5.1. Resumen de las dimensiones de los componentes

En la Tabla 5.1 se resume el dimensionamiento de los componentes de la adaptación y se destaca su aporte porcentual a esta en cuanto a peso y volumen.

| Componente                  | Volumen [L]  | Proporción Volumen | Peso [kg]    | Proporción Peso |
|-----------------------------|--------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Motor                       | 905          | 81 %               | 587          | 73 %            |
| Tanque de combustible       | 215          | 19 %               | 220          | 27 %            |
| <b>Total diésel</b>         | <b>1.120</b> |                    | <b>807</b>   |                 |
| Celdas de combustibles      | 775          | 29 %               | 390          | 20 %            |
| Almacenamiento de hidrógeno | 1.450        | 54 %               | 464          | 24 %            |
| Motor eléctrico             | 304          | 11 %               | 798          | 41 %            |
| Baterías                    | 24           | 1 %                | 126          | 7 %             |
| <b>Supercondensador</b>     | 180          | 7 %                | 189          | 10 %            |
| <b>Total eléctrico</b>      | <b>2.705</b> |                    | <b>1.967</b> |                 |

Tabla 5.1: Resumen de los componentes de la adaptación

Utilizando la ecuación 5.16 y 5.17 se demuestra el aumento porcentual en volumen y peso al implementar la adaptación.

$$W_{\%} = \frac{W_{Adaptacion} - W_{Operacional} - W_{diesel}}{W_{Operacional}} 100 \quad (5.16)$$

$$V_{\%} = \frac{V_{Adaptacion} - V_{diesel}}{V_{diesel}} 100 \quad (5.17)$$

Donde  $W_{Adaptacion}$ ,  $W_{Operacional}$  y  $W_{diesel}$  son el peso total de la adaptación, de los componentes asociados al motor diésel y el del cargador frontal respectivamente.  $V_{Adaptacion}$ , y  $V_{diesel}$  son el volumen total de la adaptación, de los componentes asociados al motor diésel.  $V_{\%}$  es el aumento porcentual en volumen, 144 %, y  $W_{\%}$  es el aumento porcentual en peso, 6 %. En la Figura 5.7 se representa gráficamente el aumento porcentual en cuanto a volumen al implementar la adaptación.

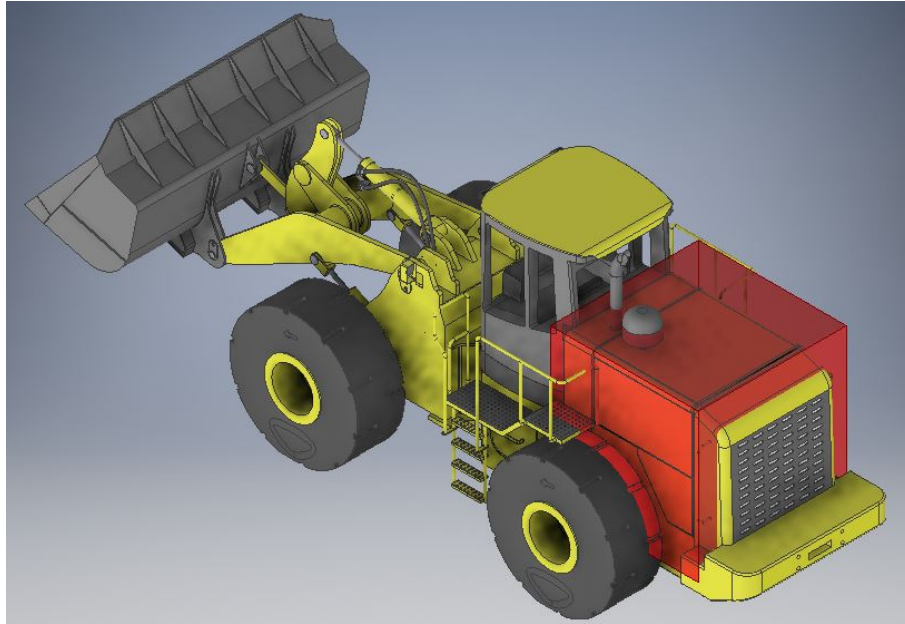


Figura 5.7: Representación del aumento de volumen en la adaptación

### **Supercondensadores**

Los supercondensadores deben ubicarse alejados de fuentes de calor ya que su temperatura máxima de operación es de 65°C, por lo que debe alejarse lo más posible de las celdas de combustible ya que son la principal fuente de calor de la adaptación.

### **Almacenamiento de hidrógeno**

Los tanques a presión de 700 bar se deben distribuir uniformemente dentro del vano motor tratando de que el centro de gravedad del cargador quede lo más bajo posible para que este no pierda estabilidad.

### 5.5.2. Flujo energético de la adaptación

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno son los encargados de contener el combustible que alimenta de energía química a las celdas de combustible, estas a la vez transforma esta energía química en energía eléctrica, aprovechada por el motor, para transformarla en energía cinética y accionar el sistema hidráulico de carga y el sistema de tracción en conjunto con los servicios auxiliares. Cuando los sistemas de consumo de energía requieren más potencia que la entregada por la celda de combustible los SC y las baterías proveen de este delta de flujo energético para que el cargador pueda operar, iniciando con la acción del SC para que después actúen las baterías.

Para las ocasiones que la demanda de potencia sea menor que la entregada por la celda de combustible, esta última, utilizando esta diferencia favorable de energía carga a las baterías y estas a la vez, cuando los SC se encuentran sin carga, les provee de energía. Finalmente cuando se hace uso del freno regenerativo el motor transforma la energía cinética en eléctrica, esta es almacenada en una primera etapa por los SC y cuando estos sobrepasan el voltaje máximo para el cual fueron diseñados, el almacenamiento de energía proveniente del freno regenerativo pasa a ser responsabilidad de las baterías. Cuando ninguno de estos dos es capaz almacenar la energía del freno regenerativo los frenos mecánicos detiene el movimiento del cargador. La Figura 5.8 representa la configuración final de los componentes principales de la adaptación y el flujo energético de la esta, representado por las flechas negras.

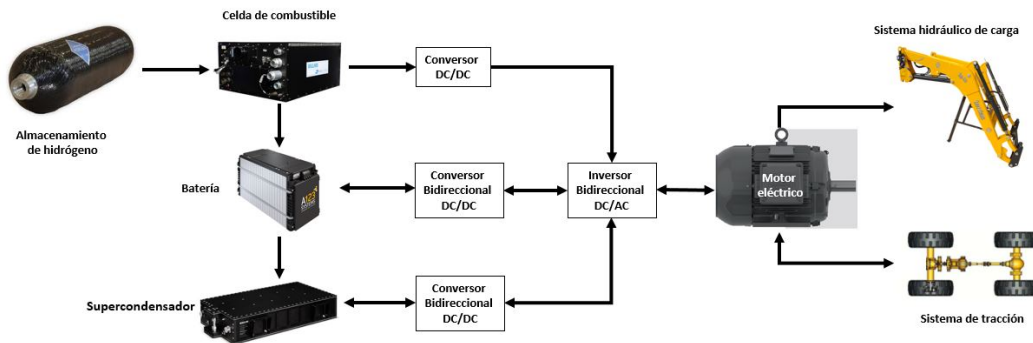


Figura 5.8: Topología de la adaptación

### **5.5.3. Recomendaciones de disposición de los componentes de la adaptación**

A continuación se dan recomendaciones para la disposición de los componentes dentro del espacio disponible en el vano motor al retirar los componentes asociados al motor de combustión interna.

#### **Motor**

El motor eléctrico debe posicionarse en el mismo lugar que el antiguo motor de combustión interna, es decir, el eje del nuevo motor debe conectarse al eje de transmisión ya implementado en el cargador. Esta opción es la más factible de implementar ya que se deben hacer el mínimo de modificaciones dentro del tren motriz y por ende se simplifica el montaje y operación posterior de la adaptación.

#### **Celda de combustible**

Esta se debe posicionar, junto con su sistema de refrigeración y su sistema de inyección de aire, en el sector donde se encuentra el radiador del cargador frontal, esto principalmente se debe a que la celda opera entre los 80°C y 100 °C por lo que necesita ser refrigerada constantemente para que esta temperatura no aumente de manera drástica y genere fallas en este componente.

#### **Baterías**

Las baterías deben posicionarse en la parte inferior del vano motor, ya que sobre estas irán los otros componentes de la adaptación y el acceso a ellas será más difícil. Como estas no necesitan un mantenimiento periódico pueden ubicarse en este lugar sin retrasar afectar en la disponibilidad del equipo.

### **5.5.4. Representación gráfica de la disposición final de los componentes**

En la Figura 5.9 se muestra el paquete de componentes de la adaptación.

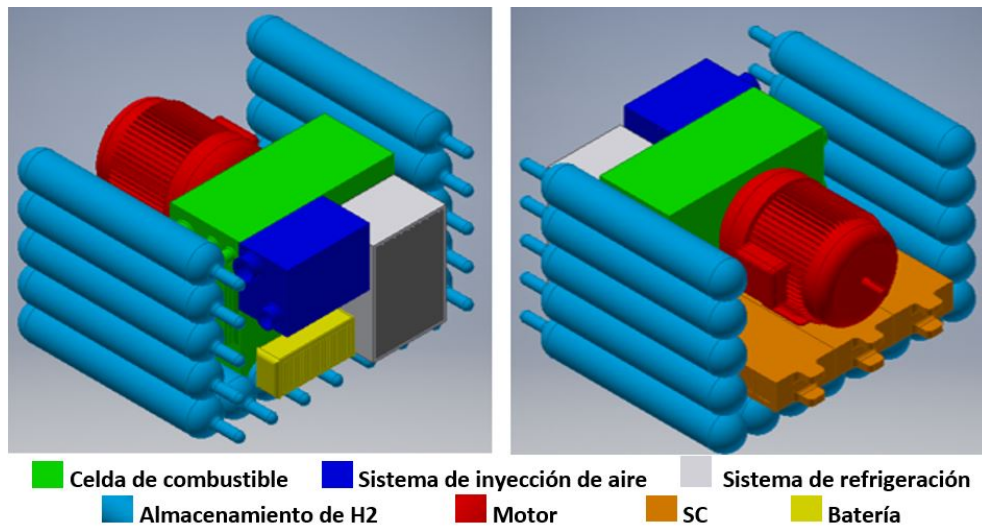


Figura 5.9: Representación gráfica de la distribución de los componentes de la adaptación

En la Figura 5.10 se representa gráficamente como deberían estar dispuestos los componentes de la adaptación dentro del cargador frontal.

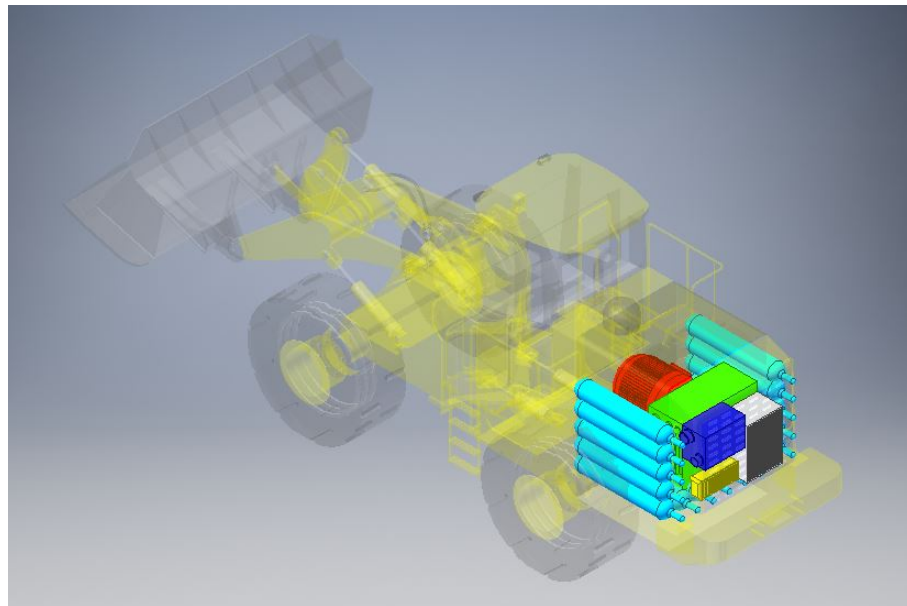


Figura 5.10: Representación gráfica de la disposición de los componentes en el cargador frontal

# Capítulo 6

## Conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Conclusiones generales

Motivado por la generación de tecnologías amigables con el medio ambiente aplicadas a la industria minera, es que Chile, a través de sus Programas tecnológicos estratégicos de Corfo, generó un proyecto para implementar el uso de celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia en la minería Chilena, programa liderado por el departamento de Eléctrica de la Universidad Técnica Federico Santa María y representado por el Doctor Antonio Sánchez . Uno de los primeros pasos para analizar la factibilidad técnica de la implementación de este tipo de tecnología fue el desarrollo de la presente investigación.

Para iniciar se analizó experiencia internacional, donde destacó la implementación de celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia de una máquina de carga de minería subterránea, o LHD, en Estados Unidos. Entre los años 2004 y 2008 el departamento de energía de Estados Unidos, en cooperación con privados de la industria minera, desarrolló un proyecto de adaptación de un LHD, marca Caterpillar modelo R1300 de potencia nominal de 123 [kW]. Este se inició con la identificación de las variables energéticas durante la demanda operacional del cargador frontal, basándose en su operación más demandante. Con esta información se identificó la factibilidad técnica del proyecto y se dimensionaron los componentes de la adaptación. Estos comprendieron una celda de combustible de 87 [kW], un sistema de almacenamiento de metal hidruro para 14 [kg] de hidrógeno, un motor eléctrico de 336 [kW] y baterías de NiMH de 6,25 [kWh] de almacenamiento. Debido a la optimización por peso del sis-

tema, la autonomía del cargador frontal disminuyó de 8 [h] a 4[h] y aún así la máquina aumentó su peso operacional en un 14 %. Los beneficios al utilizar un sistema eléctrico de potencia están, en el aumento de la eficiencia, la mejora de las características de torque y potencia, y en el aumento de la disponibilidad del cargador al disminuir los mantenimientos. Esta iniciativa demostró que es factible desarrollar un LHD que opere con Celdas de combustibles en minas subterráneas [7].

Como segunda etapa de este trabajo se analizaron las especificaciones técnicas de un cargador frontal marca JCB 456 ZX, de potencia 160 [kW], y así se identificaron los parámetros más importantes, como lo es el peso operacional, cargas máximas, características del sistema hidráulico, velocidades de desplazamiento y el torque máximo de la máquina. Basándose en lo antes mencionado se procedió a identificar las variables energéticas como lo son la potencia y la energía consumida durante un turno de 8 [hrs] de operación. Para simplificar el análisis se determinó que un cargador frontal debe repetir un ciclo operacional 122 veces durante un turno. Este ciclo operacional se dividió en 4 etapas carga, transporte, descarga y retorno. Para cada etapa del ciclo operacional se le asocio una potencia las cuales fueron:  $P_{carga}$  y  $P_{carga}$  con un valor de 144 [kW],  $P_{transporte}$  de 122 [kW] y  $P_{retorno}$  de -7 [kW], esta última tomó un valor negativo ya que se consideró una pendiente de 5 % desfavorable para la etapa de transporte y favorable para la etapa de retorno, esta energía es capaz de ser aprovechada a través de un sistema de freno regenerativo ya que la adaptación se trata de una máquina eléctrica, estas tienen esta capacidad debido a que utilizan un motor eléctrico. Conociendo las potencias asociadas a cada etapa se procede a reconocer el consumo energético operacional de un turno de 8 [hrs] el cual para este caso tomó un valor de 1.372 [MJ].

Siguiendo esta línea investigativa, se procede a reconocer los componentes principales de la adaptación, por lo que se analizó la topología más eficiente para este tipo de tecnología y se identificó la oferta comercial de cada componente. Se llegó a la conclusión de que los principales aparatos son: una celda de combustible tipo PEM, un sistema de almacenamiento de hidrógeno a presión de 700 [bar], un sistema de supercondensadores (SC), baterías de Litio y un motor de imanes permanentes.

Conociendo las variables operacionales, los componentes y las características técnicas de estos, se generó una estrategia de control para administrar los componentes que entregan potencia al sistema. A partir de esta estrategia se dimensionaron los aparatos

de la adaptación, teniendo como resultado una celda de combustible de potencia 100 [kW], un sistema de almacenamiento de hidrógeno que debe acumular un total de 25,4 [kgH<sub>2</sub>], un sistema de SC que debe acumular una energía total de 0,213 [kWh], un sistema de baterías que debe acumular un total de 4,55 [kWh] y un motor eléctrico capaz de suministrar 160 [kW] de potencia y 680 [Nm] de torque. Los componentes del sistema trabajan a distintos voltajes por lo que dentro de la adaptación se hace necesario implementar conversores DC/DC que administren las tensiones desde la celda de combustible, baterías y SC hacia el motor y desde el motor hacia las baterías y SC. Por otra parte el motor funciona en corriente alterna y los componentes de entrega y acumulación de potencia eléctrica operan en corriente continua, por lo que dentro de la topología se incluyó un inversor DC/AC capaz de realizar esta transformación.

Al realizar esta adaptación se determinó que el aumento porcentual en volumen será de un 144 % y el aumento de peso de un 6 %. Finalmente se representó de forma gráfica la disposición de los componentes, ya dimensionados dentro del cargador frontal.

## 6.2. Conclusiones específicas

La implementación de celdas de combustible a hidrógeno en la minería chilena debe tener a los representantes de esta industria como actores primordiales, ya que sin la participación de empresas mineras, se hace imposible implementar este tipo de tecnologías, ellos son los llamados a ser principales inversionistas, y hacerse responsables de los efectos perjudiciales para el medio que sus propias operaciones puedan generar.

El presente trabajo se inició al aplicar una metodología que obtiene los parámetros energéticos de operación del cargador frontal JCB 456 ZX. Con la información generada se lograron dimensionar todos los componentes de la adaptación, por lo que la determinación del consumo energético y de potencia, a través del tiempo en un turno, se hace una de las tareas más preponderante y el primer paso para verificar la factibilidad del proyecto. Esto ratifica la importancia de las empresas mineras en el desarrollo del programa estratégico, ya que son estas las que proveen de la información operacional y exigencias a la que está sometida una máquina de carga.

El reconocimiento de la topología más eficiente para realizar la adaptación genera

un conjunto de componentes que aumentan la vida útil de cada uno de ellos y promueven un ahorro en el consumo de combustible, en este caso el hidrógeno. Conociendo el paquete de componentes de la adaptación, se debe seleccionar la tecnología más adecuada dentro de las ofertas comercialmente disponibles, optimizando la elección de estos a nivel volumétrico, de peso y/o económico. La mejor opción de tecnologías comercialmente disponibles para cada equipo son: una celda de combustible tipo PEM, un sistema de almacenamiento de hidrógeno a presión de 700 [bar], un sistema de supercondensadores (SC), baterías de Litio y un motor de imanes permanentes

Para la administración de la entrega de los flujos energéticos se debe generar una estrategia de control para que las celdas de combustible, los supercondensadores y las baterías provean de energía y potencia en el momento más adecuado. Las celdas de combustible deben generar una base energética sin variar abruptamente su potencia, ya que esto provoca un deterioro de sus componentes, además deben ser capaces de transformar y entregar la energía pertinente a un turno completo. Los supercondensadores son los encargados de afrontar las variaciones abruptas de potencia durante el ciclo operacional y además acumular la energía proveniente del sistema de freno regenerativo, estos elementos están diseñados para variar de manera brusca su contenido energético en repetidas ocasiones sin desgastar sus componentes internos, en desmedro de esta característica la capacidad de almacenamiento de energía es baja. Las baterías son responsables de complementar la entrega de energía de la celda de combustible y los supercondensadores, cuando estos no son capaces de suplir la demanda energética. Además son encargadas de entregar la potencia demandada cuando se llega a un mínimo operacional, por ende la celda de combustible no es capaz de suministrar flujos energéticos tan bajos. Estas celdas deben acumular la energía cuando la potencia entregada por las mismas, es menor que la demanda operacional y emitirlas cuando los supercondensadores se encuentran descargados, toda la operación de este elemento se debe realizar entre rangos de SOC adecuados, con el fin de no generen deterioros de sus componentes.

La selección del sistema de almacenamiento de hidrógeno debe contemplar la acumulación del combustible necesario para que el cargador frontal sea capaz de operar sin inconvenientes durante un turno completo, por lo que, para el movimiento del cargador y la operación del sistema hidráulico, se debe tener en cuenta las ineficiencias provocados por la transformación de la energía interna de este combustible en energía

cinética.

El motor eléctrico debe ser capaz de transformar la energía eléctrica en energía cinética cuando el cargador así lo necesite, y la energía cinética en eléctrica cuando la potencia es negativa, situación que se presenta en pendientes favorables para el movimiento del cargador y cuando se desea detener a este.

La distribución de los componentes dentro del vano motor debe ser adecuada para mantener el centro de gravedad lo más bajo, realizar la menor cantidad de modificaciones, mantener a los componentes en su temperatura operacional y ser distribuidos equitativamente para que se no afecte la estabilidad del cargador. Según este estudio el aumento de peso del cargador frontal es de un 6 % y el de volumen de un 144 %, este último valor se asocia al sistema de almacenamiento de hidrógeno, por lo que se debe poner énfasis en la optimización del consumo de combustible para que el número de tanques sea el menor posible.

Debido a la implementación de un sistema eléctrico, se puede tener un constante monitoreo de variables operacionales, pudiendo así, generar sistemas de mantenimiento predictivos que mejoren la disponibilidad de la máquina y por ende aumentar la producción.

Utilizando este tipo de tecnología en industrias sumamente contaminantes, se puede provocar un gran impacto al disminuir los gases de efecto invernadero, mejorando sustancialmente las condiciones de salud del entorno donde realizan estas faenas y la calidad del medio ambiente a nivel global.

### **6.3. Recomendaciones**

La utilización de información real sobre la demanda energética operacional es uno de los factores más relevantes para la determinación del paquete de componentes y el dimensionamiento estos. Por lo que se recomienda realizar mediciones durante una operación minera real dentro de la gran variada oferta de estas en Chile.

El desarrollo de este tipo de tecnología se debe asociar a estándares de seguridad mineros, por lo que se hace necesario realizar estudios acerca de normas internacionales y Chilenas para el transporte y almacenamiento del hidrógeno y cotejarlo con los protocolos mineros que regulan el uso y administración de los combustibles gaseosos dentro de sus faenas.

Para lograr los dos puntos antes mencionados se hace necesario buscar un socio de empresa minera que suministre de equipos, información detallada sobre las operaciones y regulaciones de seguridad que estas tienen.

Este trabajo se basó en variables de potencia y energía. Por el contrario las variables eléctricos, como lo son la tensión y corriente, no fueron a analizados con detalle, por lo que uno de los siguientes pasos para este programa es desarrollar investigación en el área de la electrónica de potencia con el fin de poder controlar y administrar la energía de manera eficiente y con el menor deterioro de los componentes, aumentando así su vida útil.

Aún cuando las conclusiones de esta investigación entregan promisorios avances en la tecnología de celda de combustible como fuente de energía móvil, es necesario darle continuidad a investigaciones y trabajos de este tipo, de manera que en el largo plazo el conjunto de actores interesados, del área de la minería, sean capaces de utilizar de manera sostenible las celdas de combustible a hidrógeno como fuente de energía.

## **Capítulo 7**

### **Anexos**

## 7.1. Anexo 1

| Tipo de celda de combustible           | AFC<br>(Alkaline Fuel Cell)                              | PAFC<br>(Phosphoric Acid Fuel Cell)      | SOFC<br>(Solid Oxide Fuel Cell)                 | MCFC<br>(Molten Carbonate Fuel Cell)               | PEMFC<br>(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)              | DMFC<br>(Direct Methanol Fuel Cell)            |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Electrolitos más comúnmente utilizados | Solución acuosa de hidróxido de potasio sobre una matriz | Ácido fosfórico líquido sobre una matriz | Circonia estabilizada con Itria (YSZ)           | Carbonatos fundidos de litio, sodio y/o potasio    | Polímero orgánico sólido-acido perfluorosulfónico (Nafion) | Nafion                                         |
| Reacción anódica                       | $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$                  | $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$           | $O^{2-}(s) + H_2(g) \rightarrow H_2O(g) + 2e^-$ | $H_2O + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$  | $H_2(g) \rightarrow 2H^+ + 2e^-$                           | $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ |
| Reacción catódica                      | $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$                   | $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$    | $1/2 O_2(g) + 2e^- \rightarrow O^{2-}(s)$       | $1/2 O_2 + CO_3^{2-} + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ | $1/2 O_2(g) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$                | $3/2 O_2 + 6e^- + 6H^+ \rightarrow 3H_2O$      |
| Portador de carga                      | $OH^-$                                                   | $H^+$                                    | $O^{2-}$                                        | $CO_3^{2-}$                                        | $H^+$                                                      | $H^+$                                          |
| Combustible                            | $H_2$ puro                                               | $H_2$ puro                               | $H_2, CO, CH_4$ , otros                         | $H_2, CO, CH_4$ , otros                            | $H_2$ puro                                                 | $CH_3OH$                                       |
| Oxidante                               | $O_2$ (aire)                                             | $O_2$ (aire)                             | $O_2$ (aire)                                    | $O_2$ (aire)                                       | $O_2$ (aire)                                               | $O_2$ (aire)                                   |
| Cogeneración                           | Sí                                                       | Sí                                       | Sí                                              | Sí                                                 | Sí                                                         | Sí                                             |
| Voltaje de la celda                    | 1.0                                                      | 1.1                                      | 0.8 - 1.0                                       | 0.7 - 1.0                                          | 1.1                                                        | 0.2 - 0.4                                      |

Figura 7.1: Resumen de especificaciones de funcionamiento en la tecnología de celdas de combustible [3]

## 7.2. Anexo 2

| Tipo de celda de combustible                                                                          | Temperatura de operación (°C)        | Potencia de salida (kW) | Eficiencia eléctrica (%) | Eficiencia con sistema de potencia y calor combinados (CHP) | Aplicaciones                                                                               | Ventajas                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Celda de Combustible Alcalina (Alkaline Fuel Cell, AFC)                                               | 90 - 100                             | 10 - 100                | 60                       | >80                                                         | -Militar<br>-Espacial                                                                      | -La reacción catódica es más rápida en electrolitos alcalinos<br>-Permite alto rendimiento<br>-Puede utilizar una variedad de catalisis (electrodos)                                                                                  |
| Celda de Combustible de Ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)                             | 150 - 200                            | 50 - 1000               | >40                      | >85                                                         | -Distribución de energía                                                                   | -Alta eficiencia con CHP<br>-Aumenta la tolerancia a impurezas en el hidrógeno                                                                                                                                                        |
| Celda de Combustible de Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)                                    | 600-1000                             | >1 - 3000               | 35 - 43                  | <90                                                         | -Potencia auxiliar<br>-Alta distribución de energía                                        | -Alta eficiencia<br>-Flexibilidad del combustible<br>-Puede utilizar una variedad de catalisis (electrodos)<br>-Electrolito más delgado (reduce la caída óhmica)<br>-Mantenimiento mínimo<br>-Capacidad para CHP<br>-Ciclo híbrido/GT |
| Celda de Combustible de Carbonatos Fundidos (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)                        | 600-700                              | <1-1000                 | 45 - 47                  | >80                                                         | -Alta distribución de energía                                                              | -Alta eficiencia<br>-Flexibilidad del combustible<br>-Puede utilizar una variedad de catalisis (electrodos)<br>-Capacidad para CHP                                                                                                    |
| Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) | 50 - 100 (>100 electrolito = Nafion) | <1 - 250                | 53 - 58                  | 70 - 90                                                     | -Energía portátil<br>-Distribución de baja energía<br>-Vehículos espaciales<br>-Transporte | -El electrolito sólido reduce los problemas de corrosión<br>-Mantenimiento mínimo<br>-Temperatura de operación baja<br>-Rápido inicio de funcionamiento                                                                               |
| Celda de Combustible de Metanol Directo (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)                             | 20 - 90                              | 0.001-100               | 40                       | 80                                                          | -Computadoras y otros servicios portátiles                                                 | -Arranque rápido, reducción de costos.                                                                                                                                                                                                |

Figura 7.2: Comparación de las características técnicas de las celdas de combustible [3]

### 7.3. Anexo 3

Results of hydrogen storage capability in different carbon nanostructures.

| Sample material                      | H <sub>2</sub> content<br>wt% ( $\pm 0.01$ ) | H <sub>2</sub> loading |       |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|-------|
|                                      |                                              | T/°C                   | p/bar |
| MWNT: as grown                       | 0.05                                         | RT                     | 45    |
| treated: 550 °C air HNO <sub>3</sub> | 0.02                                         | 200                    | 45    |
| GNF: as grown                        | 0.04                                         | RT                     | 45    |
| treated: 1000 °C argon               | 0.18                                         | RT                     | 45    |
| treated: HCl, 950 °C vacuum          | 0.04                                         | RT                     | 45    |
| treated: HCl                         | 0.07                                         | 120                    | 0.25  |
| treated: HCl                         | 0.04                                         | 200                    | 45    |
| treated: HCl                         | 0.03                                         | 400                    | 45    |
| SWNT: as grown 30 vol %              | 0.07                                         | RT                     | 45    |
| treated, 90 vol %                    | 0.63                                         | RT                     | 45    |
| Reference samples:                   |                                              |                        |       |
| Tubes@Rice, untreated                | 0.51                                         | RT                     | 40    |
| Tubes@Rice, untreated                | 0.88                                         | 200                    | 40    |
| Mg (samples size: 4 mg)              | 7.6 $\pm$ 0.3                                | 400                    | 65    |
| Mg <sub>2+x</sub> Ni                 | 4.3 $\pm$ 0.1                                | RT                     | 7     |
| LaNi <sub>5</sub>                    | 1.4 $\pm$ 0.05                               | RT                     | 10    |

Figura 7.3: Capacidad de almacenamiento de distintas nanoestructuras de carbono [3]



## 7.4. Anexo 4

| Tecnología        | Marca                 | Diámetro [m] | Largo [m] | Volumen [m3] | Capacidad [kg] | Peso [kg] | D. Volumétrica | D. Gravimétrica |
|-------------------|-----------------------|--------------|-----------|--------------|----------------|-----------|----------------|-----------------|
| Presión 700 [bar] | Hexagon               | 0,319        | 0,906     | 0,09         | 1,40           | 34,0      | 15,2           | 0,041           |
| Presión 700 [bar] | Hexagon               | 0,238        | 1,6       | 0,09         | 1,60           | 29,0      | 17,7           | 0,055           |
| Presión 700 [bar] | Hexagon               | 0,42         | 0,845     | 0,15         | 2,60           | 43,0      | 17,4           | 0,060           |
| Presión 700 [bar] | Hexagon               | 0,44         | 1,05      | 0,20         | 3,10           | 59,0      | 15,2           | 0,053           |
| Presión 700 [bar] | Hexagon               | 0,515        | 2,783     | 0,74         | 12,40          | 365,0     | 16,8           | 0,034           |
| Presión 700 [bar] | MAHYTEC               | 0,328        | 1,16      | 0,12         | 2,00           | 55,6      | 16,0           | 0,036           |
| Presión 700 [bar] | Faber                 | 0,346        | 0,84      | 0,10         | 1,56           | 87        | 15,5           | 0,018           |
| Presión 700 [bar] | Faber                 | 0,307        | 1,06      | 0,10         | 1,58           | 68,0      | 15,8           | 0,023           |
| Presión 700 [bar] | Faber                 | 0,246        | 1,43      | 0,09         | 1,52           | 83,0      | 17,6           | 0,018           |
| Hidruro metálico  | MAHYTEC               | 0,144        | 0,631     | 0,01         | 0,19           | 23,0      | 14,4           | 0,008           |
| Hidruro metálico  | Hydrogen Components   | 0,114        | 0,287     | 0,00         | 0,07           | 6,8       | 20,1           | 0,011           |
| Hidruro metálico  | Heliocentris Academia | 0,102        | 0,47      | 0,00         | 0,07           | 7,3       | 14,7           | 0,010           |
| Hidruro metálico  | Hbank                 |              |           | 0,11         | 1,47           | 180,0     | 12,8           | 0,008           |
| Hidruro metálico  | Hbank                 | 0,075        | 0,38      | 0,00         | 0,06           | 6,1       | 27,6           | 0,010           |

Tabla 7.1: Características de sistemas de almacenamiento de hidrógeno disponibles comercialmente

# Bibliografía

- [1] Francisco Acuña Garrido and Ventura Muñoz Yi. Celdas de combustible una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de colombia en el siglo xxi. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 10(10):94–104, 2011.
- [2] Carlos Aguilar, Alejandro Vazquez, Francisco Canales, and Josefa Gordillo. Integrated dc-ac converter as power conditioner for fuel cell based system. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5):2107–2113, 2016.
- [3] Clara Fernández Bolaños Badía. Energética del hidrógeno. contexto, estado actual y perspectivas a futuro.
- [4] Jennifer Bauman and Mehrdad Kazerani. A comparative study of fuel-cell–battery, fuel-cell–ultracapacitor, and fuel-cell–battery–ultracapacitor vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(2):760–769, 2008.
- [5] Cochilco. Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2017). Technical report, Corporación Chilena del Cobre, 2018.
- [6] P Corbo, F Migliardini, and O Veneri. An experimental study of a pem fuel cell power train for urban bus application. *Journal of Power Sources*, 181(2):363–370, 2008.
- [7] James L Dipppo, Tim Erikson, and Kris Hess. Fuelcell-hybrid mine loader (lhd). Technical report, Vehicle Projects LLC, 2009.
- [8] Micah Etan Ortúzar Dworsky. Diseño y construcción de conversor dc-dc para control de ultracapacitores en vehículo eléctrico. Santiago de Chile2002, 2002.
- [9] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Stefano Longo, and Kambiz Ebrahimi. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC press, 2018.

- [10] Gonzalo García. Informe de adamas intelligence. [urlhttps://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/motores-electricos-iman-permanentes-tierras-raras-copan-mercado/20190312103411026283.html](https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/motores-electricos-iman-permanentes-tierras-raras-copan-mercado/20190312103411026283.html), 2019.
- [11] Ander González, Eider Goikolea, Jon Andoni Barrena, and Roman Mysyk. Review on supercapacitors: technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58:1189–1206, 2016.
- [12] Tianyu Li, Huiying Liu, Dingxuan Zhao, and Lili Wang. Design and analysis of a fuel cell supercapacitor hybrid construction vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28):12307–12319, 2016.
- [13] JCB Sales Limited. Datasheet jcb456.
- [14] M.A. Ricardo Llamas Cabello M. C. Miguel Escamilla López, Dr. Jorge Meza Jiménez. Estudio de productividad del equipo de carga en una mina de mineral de hierro a cielo abierto. Departamento de Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Colima, 2011.
- [15] Cinthya Fiorella Malpica Quijada. Evaluación de rendimientos de equipos en las operaciones de movimiento de tierras en el minado cerro negro yanacocha-cajamarca. 2014.
- [16] Saša Milojević. Reconstruction of existing city buses on diesel fuel for drive on hydrogen. *Applied Engineering Letters*, 1(1):16–23, 2016.
- [17] Carlos Peña Ordoñez. Estudio de baterías para vehículos eléctricos. B.S. thesis, 2011.
- [18] Zhongyue Zou, Junyi Cao, Binggang Cao, and Wen Chen. Evaluation strategy of regenerative braking energy for supercapacitor vehicle. *ISA transactions*, 55:234–240, 2015.