



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Eléctrica

Modelo y estudio de eficiencia energética de un vehículo industrial de 1.5 ton.

Trabajo de titulación previa a la obtención
del título de Ingeniero Eléctrico

Autores:

Cristian Junior Campoverde Alvarado
CI: 0104430293

David Santiago Pacheco Chérrez
CI: 0302058854

Director:

Ing. Luis Gerardo González Morales
CI: 1729711059

Cuenca - Ecuador

Abril 2019



Resumen

El modelo y estudio de los vehículos eléctricos industriales tienen como objetivo entre otros conocer que tan eficientes pueden ser al utilizar esta fuente de energía. Saber el tiempo de funcionamiento tomando en cuenta diferentes niveles de carga, conocer el funcionamiento del sistema de potencia el cual utiliza el vehículo para su desempeño es uno de los retos que se quiere tratar en esta investigación.

El reto es saber cuan eficiente puede ser la energía entregada por el banco de baterías para el correcto funcionamiento del vehículo. Resulta de gran importancia conocer la capacidad de almacenamiento de las mismas y el grado de descarga mediante el uso del vehículo para diferentes niveles de esfuerzo. El sistema eléctrico y de potencia también resulta de mucha importancia estudiar y analizar, ya que trabaja en conjunto con la fuente de energía, ya que es la encargada de convertir la energía a niveles requeridos por el equipo para su correcto funcionamiento.

El vehículo eléctrico industrial consta principalmente de un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías, un sistema de carga para las baterías, un sistema de potencia el cual consta de dos motores asíncronos con sus respectivos inversores.

La idea es estudiar a fondo dichos sistemas modelando su funcionamiento con lo cual podremos verificar su comportamiento frente a diversas pruebas a las cuales el vehículo será sometido. Dichas pruebas constan de hacer trabajar al vehículo con su fuente de energía al máximo, y con esto verificar la duración del suministro de energía y posteriormente determinar qué tan eficiente resulta esta fuente de energía.

Palabras clave

Eficiencia energética. Medición. Sistema de almacenamiento. Modelamiento. Variables eléctricas.



Abstract

The model and study of industrial electric vehicles have among other objectives to know how efficient they can be when using this energy source. Knowing the operating time taking into account different load levels, knowing the operation of the power system which uses the vehicle for its performance is one of the challenges that we want to address in this research.

The challenge is to know how efficient the energy delivered by the battery bank can be for the correct operation of the vehicle. It is very important to know the capacity storage both and the degree of discharge by using the vehicle for different levels of effort. It is responsible for converting the energy to levels required by the equipment for proper operation.

The industrial electric vehicle consists mainly of a system of storage of energy by batteries, a charging system for batteries, and a power system which consists of two asynchronous motors with their respective inverters. One of them constitutes the hydraulic system that is the one that provides the necessary force for the movement of the blade and mast of the vehicle and the other constitutes the traction system of the vehicle.

The idea is to study these systems thoroughly by modeling their operation so we can verify their behavior against various tests to which the vehicle will be subjected. These tests consist of making the vehicle work with its energy source to the maximum, and with this verify the duration of the power supply and later determine how efficient this source of energy is.

Keywords

Energy efficiency. Electric forklift. Electrical variables. Measurement. Modeling. Storage system.



Índice

Resumen	1
Abstract	2
Índice de figuras	6
Índice de tablas	10
DEDICATORIA	16
AGRADECIMIENTOS	17
CAPÍTULO 1	18
<i>Conceptos</i>	<i>18</i>
1.1 Introducción	18
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo General	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 Fundamentación teórica	20
1.3.1 Sistema de almacenamiento de energía, banco de baterías	20
Parámetros más importantes de los sistemas de almacenamiento	20
Baterías de Plomo-Acido	22
Baterías de tracción	23
Sistema automático de rellenado de las baterías de tracción	25
Sistema aéreo de las baterías de tracción	25
Indicador del nivel de electrolitos	26
Sistema de control de la batería	26
Ventajas de las baterías de tracción BLACKBULL	27
1.3.2 Motores del vehículo	27
Motor de desplazamiento	27
Modo de funcionamiento de los motores de acuerdo al ciclo de trabajo	29
S1, Servicio de carrera continua	29
S2, Funcionamiento a corto plazo	30
S3, Funcionamiento periódico intermitente	30
Motor de bombeo Hidráulico	31
1.3.3 Inversores	33
Características Operativas	36
1.3.4 Cargadores de alta frecuencia para aplicaciones de baterías de tracción universal.	37
Características	37
Operación y visualización	39
Seguridad	39
Características de carga	40
1.3.5 Celdas de Hidrogeno	40
Descripción	40
Ventajas e inconvenientes de las celdas PEM	42
Clasificación de las Pilas	42
CAPÍTULO 2	44
<i>ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS QUE CONFORMAN LOS OBJETOS DE ESTUDIO</i>	<i>44</i>
2.1 Recolección de datos	44
2.1.1 Características principales del vehículo industrial	44
2.1.2 Características principales del banco de baterías utilizados en el vehículo industrial	44
2.2 Comportamiento de carga y descarga del sistema de almacenamiento.	46
2.3 Características del sistema de carga para el sistema de almacenamiento.	47
2.4 Estudio del sistema eléctrico y de potencia que conforma el vehículo industrial.	48
2.4.1 Inversor Trifásico Zapi ACE-2 350	51
CRISTIAN JUNIOR CAMPOVERDE ALVARADO	3
DAVID SANTIAGO PACHECO CHERREZ	



2.4.2 Motor de Tracción	52
2.4.3 Motor Hidráulico o Bomba	53
2.5 Características del hidrógeno.	53
2.6 Celda de combustible.	54
CAPÍTULO 3	55
<i>DESARROLLO EXPERIMENTAL</i>	55
3.1 Toma de mediciones del sistema de almacenamiento (CC)	55
3.1.1 Descripción de los movimientos realizados para la toma de mediciones	55
3.1.2 Mediciones de consumo de energía sin carga	55
3.1.3 Mediciones con carga aproximadamente 1 Ton.	60
3.1.4 Caracterización de la Resistencia Interna del Sistema de Almacenamiento	63
3.2 Análisis de carga y descarga, rendimiento del sistema de almacenamiento	65
3.2.1 Mediciones del cargador del montacargas y eficiencia	65
3.2.2 Medición del Cargador de Batería utilizando el equipo: Analizador de Energía FLUKE 430-II	66
3.2.3 Medición de Carga utilizando el equipo: Medidor de Energía HIOKI PW3337	68
3.2.4 Medición de Descarga utilizando el equipo: Medidor de Energía HIOKI PW3337	71
3.3 Toma de mediciones del sistema eléctrico, inversor motor de bombeo hidráulico	75
3.3.1 Descripción de los movimientos realizados para la toma de mediciones	75
3.3.2 Mediciones sin carga	75
3.3.3 Mediciones con carga aproximadamente 1 Ton.	78
3.4 Toma de mediciones del sistema eléctrico, inversor motor de tracción	81
3.4.1 Toma de mediciones encoder, inversor motor de tracción	81
3.4.2 Mediciones sin carga	81
3.4.3 Mediciones con carga aproximadamente 1 Ton.	83
3.5 Proceso de Ecuación de la batería del montacargas	86
3.6 Degradación de las baterías de plomo ácido	89
3.6.1 Impacto del estado de carga	89
CAPÍTULO 4	91
<i>MODELAMIENTO DEL VEHÍCULO INDUSTRIAL</i>	91
4.1 Sistema de Almacenamiento	91
4.1.1 Ley de Peukert	91
4.1.2 Modelo de Shepherd Mejorado	92
4.2 Sistema de Tracción	95
4.3 Sistema Hidráulico	100
CAPÍTULO 5	105
<i>ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA ALIMENTACION ENERGETICA A PARTIR DE CELDAS DE HIDROGENO</i>	105
5.1 Estudio de factibilidad técnica a partir de una celda de hidrogeno de 5KW	106
5.1.1 Configuración General del Sistema	106
5.1.2 Celda de Hidrogeno y Supercapacitores utilizados en el estudio	106
5.1.3 Espacio Físico Requerido por el Sistema	107
5.1.4 Modelación del Sistema en Psim	109
5.1.5 Dimensionamiento Tanques de Hidrogeno	113
5.1.6 Resultados	113
CONCLUSIONES	114
RECOMENDACIONES	116
Bibliografía	117
ANEXOS	120
1. Instrumentación y equipos utilizados en el trabajo	120
1.1 ANALIZADOR DE ENERGÍA FLUKE 430-II	120



1.2 HIOKI PW3337	120
1.3 Fluke BT521 Analizador y Probador de Baterías Avanzado.	121
1.4 Fluke BTL-A. Zonda de Corriente	121
1.5 Osciloscopio de dos canales Tektronix	121
<i>2. Toma de mediciones mediante oscilogramas</i>	<i>122</i>
<i>3. Calibración de censado para la medición de corriente de salida y de la energía de descarga</i>	<i>123</i>
<i>4. Proceso de Ecuilización de las Baterías</i>	<i>124</i>
<i>5. Medición de Rendimiento del Banco de Baterías</i>	<i>125</i>
<i>6. Tanque utilizado como carga para las pruebas de rendimiento del vehículo aproximadamente 1 Tonelada</i>	<i>126</i>
<i>7. Pruebas de Descarga del Banco de Baterías</i>	<i>127</i>



Índice de figuras

Figura 1. 1 Circuito equivalente de una batería [2]	21
Figura 1. 2 Banco de baterías utilizado por el vehículo [8]	24
Figura 1. 3 Sistema mezclado del electrolito por aire [8].....	25
Figura 1. 4 Sistema de relleno [9]	25
Figura 1. 5 Vista aérea de baterías de tracción.....	26
Figura 1. 6 Indicador de nivel de electrolito [9].....	26
Figura 1. 7 Control de la batería [9]	27
Figura 1. 8 Modo de funcionamiento motor S1 [13].....	29
Figura 1. 9 Modo de funcionamiento motor S2 [13].....	30
Figura 1. 10 Modo de funcionamiento motor S3 [13].....	31
Figura 1. 11 Motor de transmisión directa con engranajes internos y externos. Ambos engranajes giran durante la operación. [14]	32
Figura 1. 12 Tipos de inversor [15].....	34
Figura 1. 13 Cargador de baterías de tracción [10]	38
Figura 1. 14 Esquema de funcionamiento de una celda de PEM [18]	42
Figura 2. 1 Esquema general sistema de tracción del vehículo [21]	45
Figura 2. 2 Placa técnica del fabricante del sistema de almacenamiento.	46
Figura 2. 3 Energía entregada según el tiempo de descarga	47
Figura 2. 4 Vista general del sistema eléctrico del montacargas	49
Figura 2. 5 Esquema eléctrico de fusibles, indicadores e iluminación del montacargas.	50
Figura 2. 6 Conexión de la parte de potencia del montacargas junto a los inversores y motor.	50
Figura 2. 7 Conexión del inversor al motor. [17]	52
Figura 2. 8 Motores AC trifásicos de inducción. b) Rueda trasera de tracción del montacargas. [20]	52
Figura 2. 9 Placa técnica del motor de tracción	53
Figura 2. 10 Placa técnica del motor hidráulico del montacargas	53
Figura 3. 1 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías cuando el montacargas está en standby	56
Figura 3. 2 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 1 rápido	56
Figura 3. 3 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 1 velocidad media.....	57
Figura 3. 4 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 1 lento	57
Figura 3. 5 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 2	58
Figura 3. 6 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 3	58
Figura 3. 7 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, todos los indicadores e iluminación activos.	59
Figura 3. 8 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, todos los indicadores e iluminación activos + movimiento 1+ carro en movimiento	59
Figura 3. 9 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, Standby	61
Figura 3. 10 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, A: movimiento 1 lento; B: movimiento 1 rápido	62
Figura 3. 11 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, A: movimiento 2; B:movimiento 3	62
Figura 3. 12 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, estando activo todos los indicadores (focos e iluminación)	62



Figura 3. 13 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, estando activos todos los indicadores con carro en movimiento	63
Figura 3. 14 Resistencia interna de las celdas de la batería	64
Figura 3. 15 Voltaje de las celdas de la batería	65
Figura 3. 16 Esquema para la medición del cargador del montacargas	65
Figura 3. 17 Corrientes y Fases en la medición del cargador	66
Figura 3. 18 Potencias de fase consumida en un ciclo de carga por el cargador	67
Figura 3. 19 Energía trifásica total activa, reactiva y aparente consumida en un ciclo de carga por el cargador	67
Figura 3. 20 Voltaje del sistema de almacenamiento	68
Figura 3. 21 Corriente de salida del cargador de batería	69
Figura 3. 22 Oscilograma, corriente que fluye hacia el sistema de almacenamiento en un instante dado.	69
Figura 3. 23 Potencia [W] entregada por el cargador de batería al sistema de almacenamiento en un ciclo de carga	70
Figura 3. 24 Energía [Ah] entregada por el cargador de batería al sistema de almacenamiento en un ciclo de carga	70
Figura 3. 25 Energía [Wh] entregada por el cargador de batería al sistema de almacenamiento en un ciclo de carga	71
Figura 3. 26 Voltaje instantáneo del sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga	72
Figura 3. 27 Corriente instantánea del sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga	72
Figura 3. 28 Potencia instantánea [W] en un ciclo de descarga	73
Figura 3. 29 Energía entregada por el sistema de almacenamiento [Ah] en un ciclo de descarga	73
Figura 3. 30 Energía entregada por el sistema de almacenamiento [Wh] en un ciclo de descarga	73
Figura 3. 31 Esquema para la medición de energía del cargador del montacargas	74
Figura 3. 32 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, Standby	75
Figura 3. 33 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 velocidad máxima	76
Figura 3. 34 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 velocidad media	76
Figura 3. 35 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 lento	77
Figura 3. 36 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 2	77
Figura 3. 37 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 3	77
Figura 3. 38 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, Standby	79
Figura 3. 39 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, Movimiento 1 velocidad máxima	79
Figura 3. 40 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, velocidad media	80
Figura 3. 41 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 lento	80
Figura 3. 42 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 2	80
Figura 3. 43 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 3	81
Figura 3. 44 Desplazamiento hacia adelante rápido, 8.7 km/h	82
Figura 3. 45 Desplazamiento hacia atrás, 8.4 km/h	82
Figura 3. 46 Desplazamiento hacia adelante, 1.4 km/h	82
Figura 3. 47 Desplazamiento hacia adelante, 3.1 km/h	83
Figura 3. 48 Desplazamiento hacia adelante, rápido, 8 km/h	84
Figura 3. 49 Desplazamiento hacia adelante, 4.7 km/h	84
Figura 3. 50 Desplazamiento hacia adelante, 0.8 km/h	84



Figura 3. 51 Desplazamiento hacia adelante, 0.8 km/h	85
Figura 3. 52 Desplazamiento hacia atrás, 1.4 km/h	85
Figura 3. 53 Desplazamiento hacia atrás, velocidad lenta, 0.8 km/h	85
Figura 3. 54 Voltaje en el proceso de ecualización	87
Figura 3. 55 Corriente en el proceso de ecualización	87
Figura 3. 56 Potencia [W] en el proceso de ecualización	87
Figura 3. 57 Energía entregada [Wh] en el proceso de ecualización	88
Figura 3. 58 Energía entregada [Wh] en el proceso de ecualización	88
Figura 3. 59 Voltaje de Flotación	89
Figura 4. 1 Modelo de la Batería en Simulink	94
Figura 4. 2 Resultado del Modelo de Shepherd Mejorado en Simulink de la Batería del Vehículo Industrial	94
Figura 4. 3 Comparación Modelo - Curva Real de la Batería	95
Figura 4. 4 Diagrama de bloques del inversor del vehículo industrial [17]	96
Figura 4. 5 Diagrama realizado en PSIM para la comprobación de valores nominales del motor de tracción	97
Figura 4. 6 Resultados del esquema en estado estacionario para la comprobación de los datos nominales del motor de tracción	97
Figura 4. 7 Esquema simulado en PSIM del Sistema de Tracción Inversor a lazo cerrado	98
Figura 4. 8 Lazo de control V/F de velocidad del motor de tracción	98
Figura 4. 9 Subcircuito para la medición de la velocidad del motor de tracción a partir del encoder incremental de 64 pulsos	99
Figura 4. 10 Resultados de la simulación del esquema de tracción en estado estacionario	99
Figura 4. 11 Simulación de la respuesta del sistema de tracción cambiando la referencia de velocidad del control en Psim	100
Figura 4. 12 Diagrama realizado en PSIM para la comprobación de valores nominales del motor de bombeo	101
Figura 4. 13 Resultados del esquema en estado estacionario para la comprobación de los datos nominales del motor de bombeo	101
Figura 4. 14 Esquema simulado en PSIM del Sistema Hidráulico Inversor a lazo cerrado	102
Figura 4. 15 Esquema simulado en PSIM del Sistema Hidráulico Inversor a lazo cerrado	102
Figura 4. 16 Subcircuito para la medición de la velocidad del motor hidráulico a partir del encoder incremental de 64 pulsos	103
Figura 4. 17 Resultados de la simulación del esquema de bombeo en estado estacionario	103
Figura 4. 18 Simulación de la respuesta del sistema hidráulico cambiando la referencia de velocidad del control en Psim	104
Figura 5. 2 Esquema general de FC / Supercapacitores Serie APU	106
Figura 5. 3 Espacio Requerido en comparación con espacio disponible	108
Figura 5. 4 Comportamiento Voltaje vs Corriente de la Celda de Hidrógeno Horizon	109
Figura 5. 5 Interpolación polinómica de la gráfica Voltaje vs Corriente de la celda de hidrogeno Horizon	109
Figura 5. 6 Modelado de la celda hidrogeno en PSIM	110
Figura 5. 7 Modelado del Sistema completo en PSIM, celda de hidrogeno, supercapacitor convertidor buck y carga	110
Figura 5. 8 Subcircuito de control simulado en PSIM	111
Figura 5. 9 Subcircuito de carga simulado en PSIM	111



Figura 5. 10 Comportamiento de la celda de hidrogeno al variar la carga necesaria del sistema en PSIM..... 112

Figura 5. 11 Voltaje DC simulado en PSIM 112

Figura A. 1 Analizador de Energía FLUKE 430-II 120

Figura A. 2 HIOKI PW3337 120

Figura A. 3 Fluke BT521 121

Figura A. 4 Zonda de Corriente Fluke BTL-A. 121

Figura A. 5 Osciloscopio 2 canales 122

Figura A. 6 Toma de Mediciones mediante oscilogramas 122

Figura A. 7 Ondas de corriente que muestran el nivel máximo al que puede llegar cada sonda 123

Figura A. 8 Nivel de corriente de saturación 123

Figura A. 9 Calibración de censado para la medición de corriente de salida y de la energía de descarga 124

Figura A. 10 Proceso de Ecuilización del Banco de Baterías 124

Figura A. 11 Medición del Rendimiento del Banco de Baterías 125

Figura A. 12 Peso utilizado para realizar las pruebas de rendimiento aproximadamente 1 Tonelada. 126

Figura A. 13 Pruebas de descarga del Banco de Baterías. 127

Figura A. 14 Pruebas de descarga del Banco de Baterías 128



Índice de tablas

Tabla 1. 1 Características de operación en carga del cargador flexy plus [10]	40
Tabla 1. 2 Datos comparativos de las diferentes pilas de combustible [18].....	43
Tabla 2. 1 Características técnicas del vehículo [20]	44
Tabla 2. 2 Parámetros de una batería de Plomo-Acido [20]	45
Tabla 2. 3 Sistemas que conforman el montacargas	45
Tabla 2. 4 Datos del tipo de batería.....	46
Tabla 2. 5 Características de carga [10]	48
Tabla 2. 6 Datos del cargador [10].....	48
Tabla 2. 7 Especificaciones técnicas del equipo [17].....	51
Tabla 3. 1 Mediciones del sistema de almacenamiento sin Carga	60
Tabla 3. 2 Mediciones del sistema de almacenamiento con carga de 1 tonelada.....	63
Tabla 3. 3 Caracterización resistencia interna y voltaje del sistema de almacenamiento	64
Tabla 3. 4 Datos de la medición a la entrada del cargador del vehículo eléctrico en el proceso de carga	68
Tabla 3. 5 Energía consumida por el cargador del vehículo eléctrico en el proceso de carga	68
Tabla 3. 6 Voltaje, corriente y potencia consumida por el sistema de almacenamiento en un ciclo de carga.....	71
Tabla 3. 7 Energía consumida por el sistema de almacenamiento en un ciclo de carga	71
Tabla 3. 8 Voltaje, corriente y potencia medida en el sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga.....	74
Tabla 3. 9 Energía desarrollada por el sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga.....	74
Tabla 3. 10 Mediciones del sistema inversor motor de bombeo hidráulico	78
Tabla 3. 11 Comparación de la frecuencia que posee la corriente y los pulsos medidos en el encoder.	78
Tabla 3. 12 Mediciones del sistema inversor motor de bombeo hidráulico	81
Tabla 3. 13 Toma de mediciones encoder, inversor motor de tracción en vacío	83
Tabla 3. 14 Toma de mediciones encoder, inversor motor de tracción, con carga	86
Tabla 3. 15 Datos de medida en el proceso de ecualización	88
Tabla 3. 16 Voltaje de inicio y final en el proceso de ecualización	89
Tabla 4. 1 Parámetros de Modelización de la Batería según el modelo de Shepherd Mejorado. 93	
Tabla 4. 2 Características de los elementos del Sistema de Tracción	96
Tabla 4. 3 Simulación del cambio de velocidad del motor de tracción en Psim	100
Tabla 4. 4 Características de los elementos del Sistema Hidráulico	101
Tabla 4. 5 Simulación del cambio de velocidad del motor hidráulico de bombeo en Psim.....	104
Tabla 5. 1 Valores de Corriente [A], Voltaje [V] y Potencia [W] extremos y promedios de la descarga del montacargas.....	105
Tabla 5. 3 Datos Técnicos de la Celda de Hidrogeno PEM.....	107
Tabla 5. 4 Datos Técnicos de los supercapacitores	107
Tabla 5. 5 Dimensiones Disponible y Requerida para la Celda de Hidrogeno y Supercapacitores	108



Tabla 5. 6 Constantes del controlador PI 111
Tabla 5. 7 Simulación de tiempo y potencia de la carga en PSIM..... 112



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, **Cristian Junior Campoverde Alvarado** en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Modelo y estudio de eficiencia energética de un vehículo industrial de 1.5 ton.**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de Abril del 2019

Cristian Junior Campoverde Alvarado

C.I: 0104430293



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, **David Santiago Pacheco Chérrez** en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Modelo y estudio de eficiencia energética de un vehículo industrial de 1.5 ton.**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de Abril del 2019

David Santiago Pacheco Chérrez

C.I: 030205885-4



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, **Cristian Junior Campoverde Alvarado**, autor/a del trabajo de titulación "**Modelo y estudio de eficiencia energética de un vehículo industrial de 1.5 ton.**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 22 de Abril del 2019

Cristian Junior Campoverde Alvarado

C.I: 0104430293



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, **David Santiago Pacheco Chérrez**, autor/a del trabajo de titulación "**Modelo y estudio de eficiencia energética de un vehículo industrial de 1.5 ton.**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 22 de Abril del 2019

David Santiago Pacheco Chérrez

C.I: 030205885-4



Dedicatoria

A mis Padres y Hermano quienes representan personas especiales en mi vida, seres queridos que suponen benefactores de importancia inimaginable en mis circunstancias de humano. No podría sentirme más infinitamente agradecido por el apoyo y la confianza puesta sobre mi persona, especialmente cuando he contado con su mejor apoyo desde que siquiera tengo uso de razón.

Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes Padres queridos y Hermano; he logrado concluir con éxito una etapa muy importante en vida, que en un principio podría parecer tarea titánica e interminable.

Dedico mi tesis a ustedes, personas de bien, seres que ofrecen amor, bienestar, apoyo incondicional y los finos deleites de la vida.

Muchas gracias y que Dios les pague Padres queridos y Hermano.

CRISTIAN JUNIOR

Dedico este trabajo a toda mi familia, especialmente a mis padres que siempre me han apoyado en este largo camino. Eh aquí el fruto de los esfuerzos.

A mis abuelos, por todos aquellos días con ustedes.

A mis hermanos por estar siempre ahí.

DAVID SANTIAGO



Agradecimientos

Quisiera empezar este trabajo dando mis más sinceros agradecimientos al Ing. Luis González quien ser de gran apoyo con todos sus conocimientos. Además, quien ha demostrado un gran profesionalismo al realizar este proyecto conjuntamente.

Su orientación, consejos, opiniones, recomendaciones y críticas, hicieron de gran forma que este trabajo culmine satisfactoriamente.



CAPÍTULO 1

Conceptos

El presente capítulo abarca los conceptos principales a los cuales se hará referencia en la investigación. Además, se incluye conceptos básicos sobre las metodologías y herramientas utilizadas para el desarrollo del mismo.

1.1 Introducción

Conscientes de la necesidad de las fuentes de energía no contaminantes, se ha empezado a investigar alternativas de energía que alimenten las maquinarias que son utilizadas en el transporte. El modelo y estudio de los vehículos eléctricos industriales tienen como objetivo conocer que tan eficientes pueden ser al utilizar esta fuente de energía. Saber el tiempo de funcionamiento tomando en cuenta diferentes niveles de carga y conocer el funcionamiento del sistema de potencia el cual utiliza el vehículo para su desempeño, son los principales retos que se quiere tratar en esta investigación, además de analizar si es factible utilizar fuentes de alimentación alternativas con bajas emisiones de dióxido de carbono, como es el uso de hidrógeno como fuente energética para su uso en movilidad industrial.

La disponibilidad de los combustibles fósiles decae con el transcurso del tiempo debido a sus múltiples inconvenientes principalmente, por lo cual se desarrollan vehículos industriales alimentados con otras fuentes energéticas que reduzcan las emisiones contaminantes. Uno de los desafíos en este escenario es saber cuan eficiente puede ser un sistema de provisionamiento de energía entregada por distintas fuentes, por ejemplo, sistemas de almacenamiento (Baterías) y por sistemas de aprovechamiento de hidrógeno que permita un correcto funcionamiento del vehículo. Basándose en lo antes mencionado, el presente documento estudia el comportamiento y caracterización del sistema de energía de un vehículo eléctrico y la factibilidad del uso del hidrogeno como fuente de energía alternativa, en este caso de estudio se ha tratado de forma teórica un sistema de las celdas de hidrógeno, con el fin de identificar la capacidad de almacenamiento de las mismas y el grado de descarga, mediante el uso del vehículo para diferentes niveles de esfuerzo.

Los sistemas eléctricos y de potencia de estos vehículos también resultan de mucha importancia estudiar y analizar, ya que trabaja en conjunto con la fuente de energía, ya



que es la encargada de convertir la energía a niveles requeridos por el equipo para su correcto funcionamiento. El vehículo eléctrico industrial consta principalmente de un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías, un sistema de potencia constituido principalmente por dos motores asíncronos con sus respectivos inversores y demás componentes, un sistema de carga para las baterías y los sistemas auxiliares. Los sistemas antes mencionados excluyendo a los sistemas auxiliares serán sujetos de estudio y en los cuales se centra nuestro trabajo. La idea es estudiar a fondo dichos sistemas modelando su funcionamiento con lo cual podremos verificar su comportamiento frente a diversas pruebas a las cuales el vehículo será sometido. Dichas pruebas constan de hacer trabajar al vehículo con su fuente de energía al máximo, y con esto verificar la duración del suministro de energía y posteriormente determinar qué tan eficiente resulta esta fuente de energía. Como primer paso a realizar en un proceso de eficiencia energética eléctrica es la diagnosis y auditoría de energía eléctrica. En ella, se va a proceder a tomar e interpretar mediciones de variables eléctricas, así como estimaciones de variables mecánicas, para la posterior toma de decisiones.

De acuerdo a la problemática planteada para este trabajo se ha tomado los siguientes pasos a seguir:

- i.** Extracción de datos y características de funcionamiento de cada uno de los equipos sometidos a estudio. Estos datos nominales vienen especificados generalmente en los catálogos de los equipos y en nuestro caso del vehículo industrial.
- ii.** Estudio del modo de funcionamiento en base a diversas situaciones, para el sistema de almacenamiento de energía.
- iii.** Teniendo claro el modo de funcionamiento, pasamos con el desarrollo experimental de toma de mediciones con lo cual tendremos una idea totalmente clara del nivel de eficiencia de esta fuente de energía.
- iv.** Modelado mediante software de los sistemas de almacenamiento y fuentes de energía ya antes mencionado, para verificar la eficiencia energética, y así analizar el comportamiento de los sistemas y su rendimiento.
- v.** Tomando como alternativa otra fuente de energía, se realizará el análisis de factibilidad técnica al usar fuentes alternativas para su alimentación, en este caso se empleará la celda de hidrogeno. Inicialmente se efectuará un análisis



del sistema de producción de hidrogeno y de la celda de energía, determinando las características afines con el propósito de la producción de hidrógeno y pretendiendo la proyección para determinar la factibilidad del uso de esta tecnología en el montacargas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar y modelar el funcionamiento del vehículo industrial por medio de las baterías, y verificar la eficiencia de las mismas tomando en cuenta la capacidad de carga del mismo.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Modelar y simular el sistema eléctrico y de potencia de un montacargas eléctrico con capacidad de 1.5 toneladas.
2. Modelar y analizar la capacidad del sistema de almacenamiento de energía, del vehículo industrial.
3. Realizar el estudio de eficiencia eléctrica del vehículo industrial y de su sistema de carga.
4. Realizar el estudio de factibilidad para alimentación energética a partir de otras fuentes.

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Sistema de almacenamiento de energía, banco de baterías

Este sistema permite el almacenaje de energía que posteriormente será entregada a la carga que en este caso será nuestro vehículo industrial de acuerdo a las necesidades del mismo. En la actualidad existen varios sistemas de almacenamiento de energía. Para el vehículo industrial usado en este trabajo tenemos unas baterías con compuesto de plomo ácido. [1]

Parámetros más importantes de los sistemas de almacenamiento

- Tensión de las baterías y celdas (V): Las celdas eléctricas, de acuerdo al compuesto, tendrá una tensión nominal que a su vez entregará cuando la batería esté en funcionamiento. Para obtener los voltajes requeridos las celdas son conectadas en serie. Sin embargo, la tensión que entrega puede variar. Al entregar corriente, la tensión de las baterías disminuye y al estar en proceso de carga la

tensión de las mismas aumenta. El cambio repentino de la tensión de la celda se debe a la resistencia interna y su circuito equivalente, de acuerdo a como se muestra en la Figura 1. 1 [2]

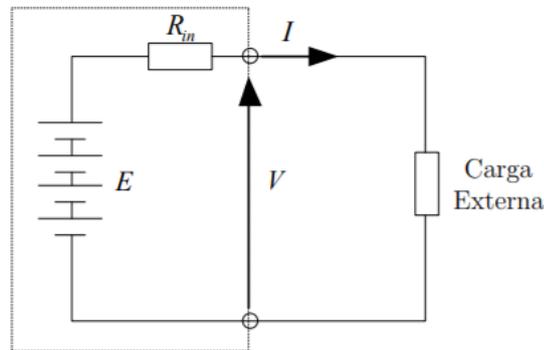


Figura 1. 1 Circuito equivalente de una batería [2]

La celda es representada con una fuente de voltaje fija (E), la resistencia interna con R_{in} , con lo que se obtiene una tensión en los bornes de la batería. Asumimos que la corriente I sale de la batería, tenemos:

$$V = E - IR_{in}$$

De acuerdo a la ecuación planteada, si aumenta la corriente de salida, la tensión en los bornes disminuye. Al tener una corriente en sentido contrario, cuando la batería está en proceso de carga, la tensión en los bornes aumenta. Si se utilizan baterías de tracción se debe tener variaciones mínimas de la tensión en el banco, por esta razón la resistencia interna de las baterías debe ser muy pequeña. [4] [5]

- Capacidad de Carga (C): Determina la cantidad de energía que la batería puede entregar. La unidad de medida utilizada es el Amperio/hora (Ah). Si una batería tiene una capacidad de $10 Ah$, significa que puede entregar 10 Amperios en 1 hora, cosa que no siempre se cumple en la práctica dado a la ley de Peuker. La capacidad de carga de la batería es afectada por la velocidad en que es removida la carga. [4] [5]
- Energía Almacenada: Este parámetro depende básicamente de la tensión nominal (V) y la capacidad de carga (C). Para esto se usa la unidad de Watt/hora y se obtiene con la siguiente formula:

$$\text{Energía en Watt/hora} = \text{Voltaje} \times \text{Capacidad de Carga} = V \times C$$



Es importante notar que, debido a su dependencia con el voltaje y la capacidad de carga, la energía almacenada puede variar dependiendo de la velocidad con que es extraída la energía. [3]

- **Energía Específica:** Hace referencia a la cantidad de energía eléctrica almacenada por cada kilogramo de batería. La unidad de este parámetro es el Wh/kg .
- **Densidad Energética:** Corresponde a la cantidad de energía eléctrica almacenada por cada m^3 de batería. La unidad de este parámetro es el Wh/m^3 [3]
- **Eficiencia de Carga:** Es la relación entre la energía entregada por la batería, y la que recibe al estar en proceso de carga. El valor de este parámetro, depende del tipo de batería, temperatura, y velocidad de carga de la misma. También es susceptible al estado de carga de la batería, por ejemplo, entre el 20 % y 80 % tiene una eficiencia de carga cercana al 100 %, cuando se acerca a la carga total esta disminuye de forma importante. [3]
- **Eficiencia Energética:** Relación entre la energía que entrega una batería y la que necesita para volver al estado de carga antes de la descarga.
- **Tasa de auto-descarga:** Las baterías sufren una descarga cuando no están en uso constantemente, debido a esto es importante saber que las baterías no pueden estar sin cargar por un periodo prolongado de tiempo. Este parámetro varía según el tipo de batería y la temperatura de la misma, al ser muy grande aumenta considerablemente la auto-descarga. [3]
- **Vida útil y ciclos de descarga:** Todas las baterías agotan o van perdiendo su capacidad de carga a medida que estas sufren descargas y más si estas están en constante uso. Este parámetro depende principalmente del tipo de batería y del trato y uso que se le da a la misma. Es una variable muy importante ya que, al definir la vida útil de las baterías, se pueden realizar aproximaciones de los costos. [6] [2]

Baterías de Plomo-Acido

Las baterías de plomo ácido son las más comúnmente usadas en vehículos eléctricos, estas almacenan energía eléctrica en forma de energía química. Las baterías que usa este vehículo sujeto a estudio son las de tipo selladas o reguladas por válvula (VRLA) el escape de los gases producidos por la electrólisis del electrolito es controlado automáticamente por una válvula sensitiva a la presión. Como su propio nombre indica, están selladas, por lo que no tiene fugas de electrolito, mínima emisión de gases, nula



posibilidad de contaminación del electrolito y no requiere de mucho mantenimiento. Una desventaja es que presentan limitaciones tales como un menor número de ciclos, la imposibilidad de reponer el agua perdida por exceso de sobrecarga, no se puede verificar en forma confiable su estado de carga, y en algunos casos su mayor sensibilidad a la temperatura de operación. Está formada por un depósito de ácido sulfúrico y dentro de este un conjunto de placas de plomo, paralelas entre sí dispuestas alternadamente con polaridad positiva y negativa. Cada batería está formada por celdas de 2V cada una, con un total de 12 baterías en el vehículo sujeto a prueba tenemos una tensión total de salida de 24V. [7] [3]

Este sistema de almacenamiento depende básicamente de tres parámetros y en los cuales se base nuestro trabajo:

- Tiempo de descarga
- Tiempo de carga
- Capacidad de almacenamiento

Baterías de tracción

Las baterías de tracción están diseñadas para satisfacer las necesidades más exigentes en aplicaciones industriales ya sea con el uso de vehículos como carretillas elevadoras, apiladores eléctricos, máquinas de limpieza, plataformas móviles elevadoras, vehículos eléctricos, etc.), desde un uso moderado hasta un uso muy exigente. [8]

Las baterías de tracción ofrecen una muy alta fiabilidad, gracias a su robusta construcción basada en la tecnología de plomo abierto tubular colado bajo presión (PzS). Las placas negativas tienen una configuración plana con óxido empastado y el separador es de tipo micro poroso. El recipiente y la tapa del elemento están soldados herméticamente y son resistentes a los golpes y las temperaturas extremas tal como se muestra en la Figura 1. 2. [8]



Figura 1. 2 Banco de baterías utilizado por el vehículo [8]

Las bornes están diseñadas para asegurar que los elementos sean completamente estancos, además están conectados a través de cables flexibles aislados. Sus conexiones atornilladas facilitan el montaje y la sustitución de los elementos. Las baterías BLACKBULL que son las utilizadas en el vehículo industrial sometido a estudio, vienen equipadas con tapones con cierre basculante e indicador de nivel de electrolito, lo que facilita el escape de los gases producidos durante la carga y protege a la batería de los derrames de electrolito. Además, las tapas permiten la instalación de sondas de medición de la temperatura, así como sistemas de mezclado/agitación del electrolito. Estas están disponibles también con el electrolito gelificado. Las baterías de tracción BLACKBULL de gel no requieren mantenimiento, aceptan descargas de hasta el 80% en C5 y permiten una carga rápida de 8 horas al 60%. Además, están exentas de fugas y derrames.

Las baterías BLACKBULL vienen equipadas opcionalmente con un sistema de relleno automático de agua Figura 1. 3, que permite rellenar todos los elementos simultáneamente. Además, los tapones facilitan la medición de la densidad del electrolito y aseguran el nivel correcto de relleno. El mezclado del electrolito por aire es un sistema de tubería instalado en el interior del elemento está formado por una bomba de aire de membrana que facilita la circulación del electrolito, evitando la estratificación y optimizando la carga de la batería (30% menos de tiempo y un ahorro de hasta el 20% de energía). [8] [9] [10]

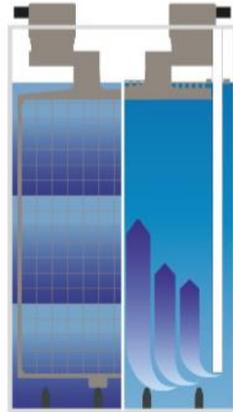


Figura 1. 3 Sistema mezclado del electrolito por aire [8]

Sistema automático de rellenado de las baterías de tracción

Sistema de tubos centralizado fijado permanentemente a la batería que distribuye rápidamente la cantidad necesaria de agua a todos los elementos de la batería de forma que el nivel y la densidad de los electrolitos sean siempre los correctos Figura 1. 4. [9] [11]

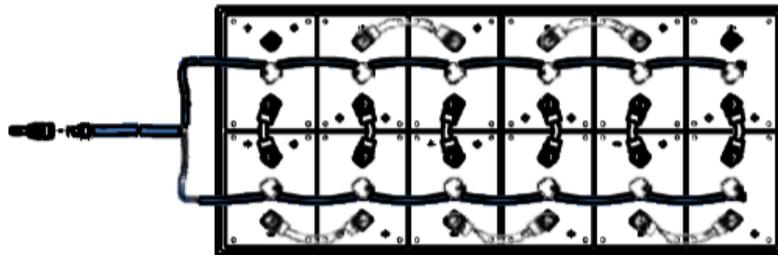


Figura 1. 4 Sistema de relleno [9]

Sistema aéreo de las baterías de tracción

Sistema de tubos centralizado fijado permanentemente a los elementos de la batería y a las que proporciona aire a baja presión (requiere un cargador con configuración aérea) Figura 1. 5. El aire mezcla la solución de electrolitos con numerosas e importantes ventajas para la vida útil de la batería y los costes derivados:

- Tarda menos en cargar.
- Menor consumo de agua gracias a que se necesita considerablemente menos energía (factor de recarga de hasta 1,07) de forma que con la recarga se puede ahorrar un 60 % de agua.
- La temperatura de la batería es inferior durante la recarga.

- Disminución general de los costes energéticos debido a que requiere menos energía. [9]

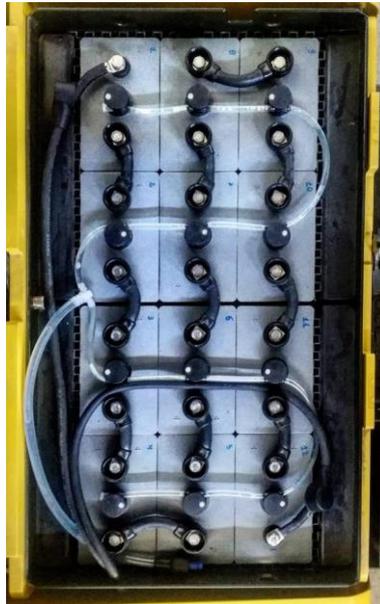


Figura 1. 5 Vista aérea de baterías de tracción

Indicador del nivel de electrolitos

Sistema de control sencillo, pero muy eficaz, del nivel de electrolitos de los elementos Figura 1. 6. [9]



Figura 1. 6 Indicador de nivel de electrolito [9]

Sistema de control de la batería

Sistema de recopilación de datos muy avanzado fijado permanentemente a la batería. La información recogida se puede guardar de forma remota y puede utilizarse para que el usuario comprenda y mejore el uso de la batería Figura 1. 7. [9]

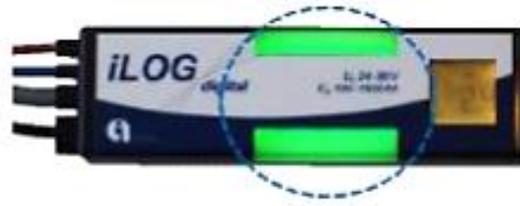


Figura 1. 7 Control de la batería [9]

Ventajas de las baterías de tracción BLACKBULL

- 100% libre de mantenimiento.
- Auto descarga extremadamente baja.
- Sin derrames en caso de daño del elemento.
- Emisiones de gas extremadamente bajas.
- Sin contaminación ni corrosión debido a pérdidas de electrolito.
- Carga rápida: 8 horas al 60% de profundidad de descarga.
- Carga rápida: 12 horas al 80% de profundidad de descarga.
- Acepta descargas de hasta el 80%.
- Construcción robusta resistente a golpes y temperaturas extremas.
- Diseño optimizado que incrementa la capacidad de la batería.
- Cofre estanco antiácido.
- Conexiones flexibles atornilladas.
- Terminales totalmente aislados.
- Máxima duración en ciclos.
- Opciones de mezclado/agitación de electrolito por aire.
- Opciones de sistemas de relleno.
- Opciones de Indicador luminoso de nivel del electrolito. [8] [9] [10]

1.3.2 Motores del vehículo

Motor de desplazamiento

El motor utilizado para el desplazamiento es un motor asíncrono de inducción, es un motor eléctrico de corriente alterna (CA), en el cual, el rotor gira a una velocidad diferente que la del campo magnético del estator. [12]

El motor asíncrono de inducción es trifásico y está formado por un rotor, que a su vez puede ser de dos tipos, de jaula de ardilla y bobinado, y un estator en el cual se



encuentran las bobinas inductoras. Las bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° en el espacio y por las cuales se hace circular un sistema de corrientes trifásicas equilibradas, con un desfase igual a 120° , dichas corrientes cuando la maquina está en funcionamiento inducen un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión eléctrica en el rotor según la ley de inducción de Faraday. En el motor de inducción asíncrono el devanado del rotor no se encuentra conectado al circuito de excitación, este se encuentra eléctricamente aislado. Este motor utiliza barras de conducción a lo largo del rotor, en forma de ranuras a iguales distancias alrededor de la periferia. Estas barras se conectan por anillos en cortocircuito a cada extremo del rotor. Por esta forma de conexión y ensamblado estos motores son llamados, motores de jaula de ardilla. [12]

El principio de funcionamiento se basa en el principio de inducción de Faraday. Al aplicar corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras, se produce un campo magnético giratorio, con la frecuencia igual a la de la corriente alterna (CA) que es la que alimenta al motor. Este campo al girar alrededor del rotor en estado de reposo, inducirá corrientes en dicho rotor, que a su vez produce un campo magnético siguiendo el movimiento del campo estático, produciendo un par motor que hace que el rotor gire. Sin embargo, como la inducción en el rotor se produce si hay una diferencia en las velocidades del campo estático y el giratorio, la velocidad del rotor nunca alcanza a la del campo giratorio. En cambio, si las velocidades fuesen iguales, no se daría la inducción y el rotor no produciría par. A esta diferencia entra las velocidades de los campos se la denomina deslizamiento y se mide porcentualmente, debido a esto, los motores de inducción se los denomina asíncronos, ya que la velocidad del campo rotórico presenta una pequeña diferencia con la del campo rotante. El deslizamiento es diferente dependiendo de la carga aplicada al rotor, siendo máximo el deslizamiento con la máxima carga aplicada al mismo. No obstante, el motor variará su velocidad, haciendo que el par motor aumenta siendo estos, motores de velocidad constante. [13]

Los motores de inducción a diferencia de otros, tienen una particularidad es que no usan imanes con un campo magnético el cual puede ser ajustado de acuerdo al requerimiento, debido a que el campo magnético es proporcional al voltaje dividido para la frecuencia (V/f). Es por esto que para cargas ligeras el inversor reduce la tensión y a su vez reduce las pérdidas magnéticas con lo cual maximiza la eficiencia. Entonces, el motor de inducción cuando funciona con un inversor inteligente tiene una ventaja con respecto

a un motor de CC sin escobillas es decir las pérdidas magnéticas y de conducción pueden ser tratadas con lo cual se optimizará la eficiencia. Dicha ventaja es muy importante a medida que aumenta el rendimiento. Con el motor de CC sin escobillas las pérdidas magnéticas aumentan debido al tamaño de la máquina, por ende, la eficiencia para cargas parciales se ve disminuida. Por lo contrario, debido a la inducción, las pérdidas no crecen según el tamaño de la máquina, por lo que se utilizan mucho para aplicaciones donde se requiera de alto rendimiento o eficiencia. [12]

Modo de funcionamiento de los motores de acuerdo al ciclo de trabajo

S1, Servicio de carrera continua

Una vez arrancado, el motor funciona a una carga constante al menos hasta que se alcanza el equilibrio térmico. Entonces ese motor puede ser operado por un período ilimitado Figura 1. 8. [13]

$P \rightarrow$ Carga

$P_v \rightarrow$ Pérdidas Eléctricas

$T \rightarrow$ Temperatura

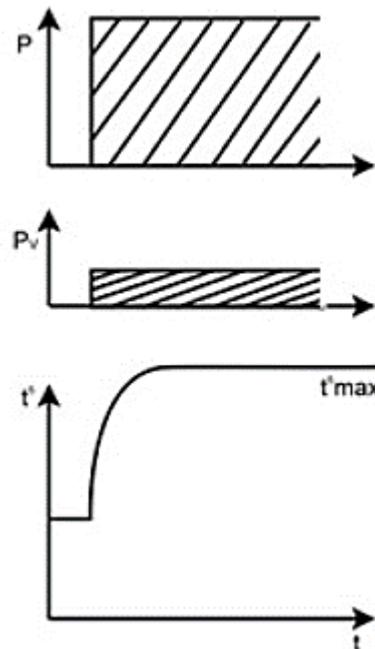


Figura 1. 8 Modo de funcionamiento motor S1 [13]

S2, Funcionamiento a corto plazo

Una vez arrancado, el motor funciona a una carga constante durante un período limitado y no se alcanza el equilibrio térmico. El motor arrancará por segunda vez y luego cuando su temperatura haya descendido a temperatura ambiente (se restablecen las condiciones de arranque) Figura 1. 9. [13]

Ejemplos: S2 – 60 min (El tiempo significa 60 minutos de clasificación)

T_{\max} → temperatura máxima

T_b → tiempo de operación

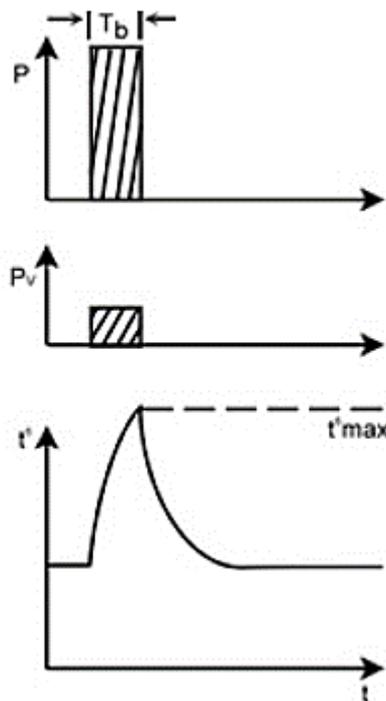


Figura 1. 9 Modo de funcionamiento motor S2 [13]

S3, Funcionamiento periódico intermitente

Una secuencia de ciclos de trabajo idénticos, compuesta por un tiempo de operación con carga constante y un tiempo de reposo. Cuando está en reposo, el motor no se alimenta. La corriente de arranque no influye significativamente en el aumento de la temperatura Figura 1. 10. [13]

Ejemplo: S3 – 5% (la cifra porcentual se refiere al factor de duración cíclica)

T_b → tiempo de operación

$T_s \rightarrow$ tiempo de descanso

$$ED\% = \frac{T_b}{T_b + T_s}$$

$T_b + T_s =$ *aproximadamente 1 a 10 minutos*

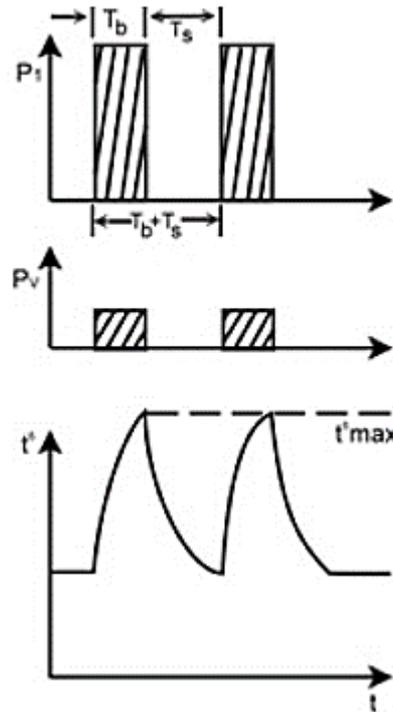


Figura 1. 10 Modo de funcionamiento motor S3 [13]

Motor de bombeo Hidráulico

Este motor es una máquina que transforma la energía mecánica y la velocidad del motor, en energía hidráulica o caudal. Cuando un motor bomba está en funcionamiento, cumple básicamente dos funciones:

1. Inicialmente, su acción mecánica crea un vacío en la succión lo cual permite que la presión atmosférica fuerce el líquido del tanque hacia la entrada de la misma.
2. Posteriormente, la misma acción entrega éste líquido a la salida de la bomba y lo empuja hacia el circuito hidráulico.

Es importante destacar que un motor bomba produce movimiento del líquido, las bombas no generan presión. Se genera el caudal necesario para el desarrollo de la presión en el sistema, la cual es realmente resultado de la resistencia al flujo. Por ejemplo: la presión de un fluido a la salida de la bomba es nula si ésta no está conectada a un sistema o carga. Es decir, si una bomba está entregando caudal a un sistema, la presión llegará

solamente al nivel necesario para vencer la resistencia de la carga aplicada al mismo. [14]
[12]

Un motor desplazamiento positivo es una máquina que entrega una cantidad igual de líquido o fluido por cada ciclo de rotación del motor de bombeo. La cantidad de líquido que pasa por el motor de bombeo en una bomba de desplazamiento positivo es casi despreciable comparándolo con el caudal máximo teórico de la bomba. Los motor-bomba de desplazamiento positivo pueden ser fijas o variables. Para una bomba de desplazamiento positivo el caudal se mantiene constante en el ciclo de bombeo al igual que la velocidad específica. En las bombas de desplazamiento variable este puede ser modificado alterando la geometría del conducto de desplazamiento. Los tipos de motores hidráulicos tienen características similares de diseño por ejemplo una superficie de conducción que depende del diferencial de presión, sincronismo al transportar el fluido a presión a la superficie de presión logrando que la rotación sea continua, una conexión mecánica entre la superficie y un eje de salida. [14]

Dependiendo si el motor hidráulico es fijo o variable en base al desplazamiento. Los fijos tienen un par constante. La cantidad de fluido de entrada se controla con lo que varía la velocidad. Los variables son de par y velocidad variable. Con el fluido de entrada y su presión constante, variar el desplazamiento, variaría la relación de velocidad de torsión para cumplir con los requisitos de carga. La velocidad del motor depende básicamente del desplazamiento del motor y el volumen o cantidad de fluido entregado al motor.

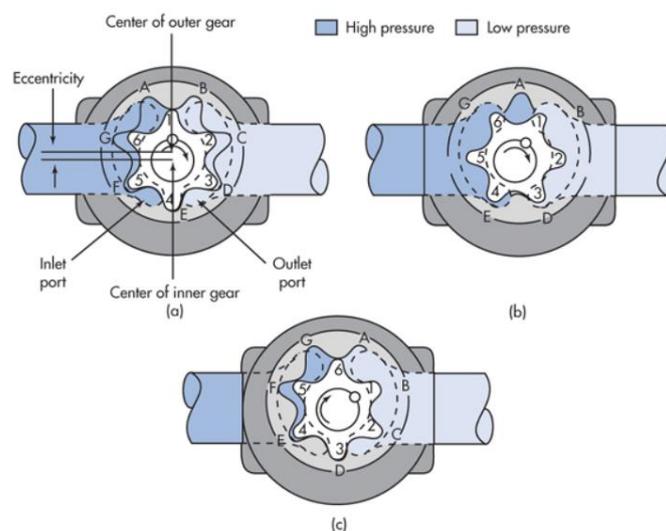


Figura 1. 11 Motor de transmisión directa con engranajes internos y externos. Ambos engranajes giran durante la operación. [14]



Los motores hidráulicos con engranajes internos pueden ser de dos categorías. De transmisión directa que contienen engranajes interno-externo y un eje de salida, Figura 1. 11 . Cuando introducimos fluido a presión en el motor, los engranajes giran. El fluido a presión se introduce al motor a través del puerto de entrada, Figura 1. 11 a. El puerto de entrada con forma de riñón está diseñado de manera que al igual que el volumen de este bolsillo alcanza el máximo, el flujo de fluido se cierra con las puntas de los dientes de engranaje internos 6 y 1 proporcionando un sello como se muestra en la Figura 1. 11 b.

Cuando los engranajes internos y externos continúan girando, se forma un nuevo bolsillo entre los dientes internos 6 y 5 y el casquillo externo G, Figura 1. 11 c . Mientras tanto, el bolsillo formado entre los dientes internos 6 y 1 y el receptáculo externo A se ha movido en dirección opuesta al puerto de salida con forma de riñón, drenando constantemente a medida que disminuye el volumen del bolsillo. El cambio controlado del volumen de las cavidades durante el ingreso y evacuación proporciona un flujo discreto y uniforme con un mínimo de variación de presión. [14]

1.3.3 Inversores

Los inversores son convertidores de potencia que se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para controlar alta potencia como es el caso de este estudio. Los inversores convierten la corriente continua generada por baterías, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en el equipo que lo requiera.

El inversor transfiere la energía que proporcionan las baterías en corriente continua al motor, modificando el voltaje y la señal según las necesidades de éste, que generalmente requiere de corriente alterna para su correcto funcionamiento. Los inversores de onda senoidal pura son aquellos que son capaces de reproducir una onda uniforme entre los diferentes pulsos. La ventaja que tiene este tipo de inversor frente a los inversores de onda senoidal modificada o cuadrada es que los pulsos entre las ondas son mucho más bruscos y segmentados. Es por ello, que para la utilización de aparatos electrónicos será muy recomendable la utilización de los inversores de onda senoidal pura, ya que permitirá que el tipo de corriente con el que alimentemos el aparato será exactamente igual a la que podemos recibir de la red eléctrica convencional. La repercusión de la utilización de inversores de onda senoidal pura es que la vida de los

aparatos electrónicos será mucho más larga en comparación con los inversores de onda senoidal modificada. [15] [16]

El proceso básico denominado inversión que interpreta aquel equipo capaz de transformar la energía continua en alterna. Como sabemos los rectificadores son los encargados de transformar la corriente alterna en corriente continua, si bien al estudiar los rectificadores controlados, se determina que podía funcionar en sentido inverso, transformando la corriente continua en alterna, y por tanto trabajando como inversores. Sin embargo, para que los rectificadores controlados realicen esta faceta, necesitan estar conectados a una fuente alterna del exterior como carga, que impone la frecuencia en el lado de alterna, por lo que se llaman inversores controlados. El inversor utilizado en el vehículo industrial funciona automáticamente, sin necesidad de estar conectados a ninguna red de alterna, de forma que se permita la transformación de continua a alterna cuando en el lado de alterna sólo haya receptores de energía. A estos dispositivos se les denominará inversores u onduladores autónomos o auto guiados. El funcionamiento de los inversores auto guiados se caracterizará por ser el propio dispositivo quién determina la frecuencia y la forma de onda de la tensión alterna suministrada a la carga. Dentro de los inversores estáticos con semiconductores, estos utilizan Figura 1. 12:

- Con transistores para aplicaciones de baja potencia <500 kW
- Con SRC aplicables hasta potencias más elevadas < MW

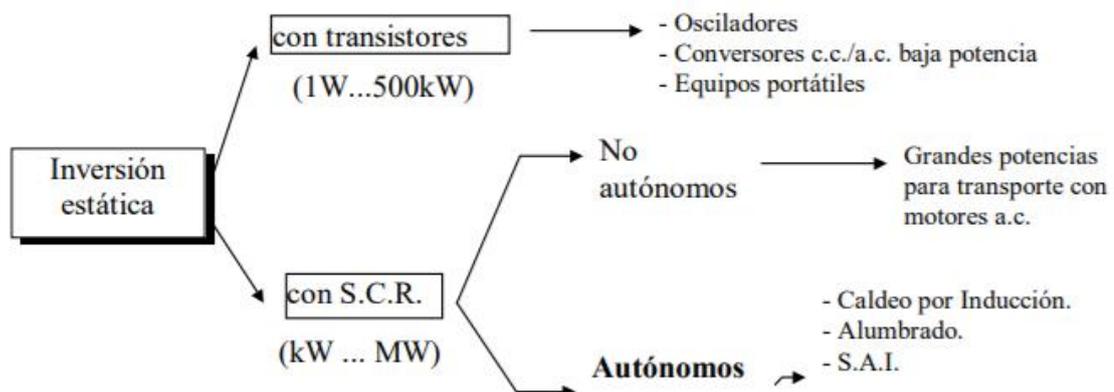


Figura 1. 12 Tipos de inversor [15]

En este tipo de inversor la tensión de la salida depende de la batería de entrada de forma exclusiva. Una exigencia de los inversores prácticos es la posibilidad de mantener constante el valor eficaz de la tensión de salida frente a las variaciones de la tensión de



entrada y de la corriente de la carga, o incluso poder variar la tensión de salida entre unos márgenes más o menos amplios. Las soluciones existentes para este último problema se pueden agrupar en tres procedimientos:

- Control de la tensión continua de entrada: El control de la tensión de las baterías que alimentan al inversor, proporcionara una forma directa de controlar el valor eficaz de la salida.
- Regulación interna en el propio inversor: La tensión de las baterías de entrada es constante y la modulación PWM en la secuencia de conducción de los transistores, proporciona una cierta regulación de la tensión eficaz de salida y una reducción del contenido armónico, con ciertas restricciones dependiendo del tipo de modulación. [15]
- Regulación en la tensión de salida: consiste en disponer de un autotransformador en la salida del inversor, controlado mecánicamente o electrónicamente mediante tiristores. Esta solución incorpora un retraso en la respuesta del sistema y un aumento del volumen si se necesita una tensión de salida elevada.

Actualmente existen multitud de aplicaciones para los convertidores DC/AC. Entre ellas puede citarse el control de motores de corriente alterna, donde se hace necesario un rectificador controlado para convertir a continua la señal alterna y regular la potencia entregada al motor, para después volver a ondular la señal mediante un inversor.

El inversor utilizado en el vehículo es el inversor ACE-2, es el modelo adecuado para el control de motores de 4,0 kW a 9,0 kW. Ha sido expresamente diseñado para la tracción eléctrica de la batería. Es apto para montacargas, para el manejo de materiales de hasta 2,0 toneladas, para la plataforma elevadora. [16]

El ACE-2 se puede suministrar en tres versiones:

1. Versión con sensor: el uso de un codificador (cojinete del sensor) en el eje del motor que realiza un control de par motor y velocidad extremadamente preciso y confiable.

2. Versión SenseCoils: en su lugar, se utilizan devanados auxiliares especiales dentro del motor. De un encoder se realiza el control de par motor y velocidad.

3. Versión sin sensor: se implementa solo el uso de la tensión de fase. El control del par y la velocidad del motor con el software de control patentado.



Aquí se describe la versión con sensor que adopta un codificador integrado en el eje del motor (cojinete del sensor). El codificador establece el rendimiento del camión, respecto de las versiones Sensorless y Sense Coils, con una velocidad mínima inferior al servicio de "parada en la rampa" y una inversión más suave; por otro lado, la fiabilidad se ve penalizada por la frágil mecánica y la posición inaccesible de los rodamientos del sensor. [17]

Características Operativas

- Control de velocidad, tres versiones disponibles: sensor, bobina de detección y sin sensor, como se explica en el tipo de versión.
- Comportamiento óptimo en un perfil de velocidad debido a la retroalimentación de la misma: la velocidad del motor sigue al acelerador, iniciando un frenado regenerativo si la velocidad supera el punto de ajuste de la velocidad.
- El sistema puede realizar una parada eléctrica en una rampa (la máquina está mantenida eléctricamente en una pendiente, durante un tiempo programable
- Velocidad estable en todas las posiciones del acelerador.
- La rampa de frenado de liberación puede ser modulada por una entrada analógica, de modo que se obtiene característica de freno proporcional.
- Sensibilidad óptima a bajas velocidades.
- Aumento de voltaje al inicio y con sobrecarga para obtener más torque (con control actual).
- El inversor puede accionar un freno electromecánico.
- Función de dirección hidráulica:
 - Inversor de tracción
 - El inversor de tracción envía una solicitud de "función de dirección hidráulica" al inversor de la bomba en la línea de bus CAN
 - Además, si el inversor de la bomba no está presente (por ejemplo: tractor aplicación), el inversor de tracción puede gestionar una "función de dirección hidráulica" mediante la conducción de un contactor hidráulico que impulsa un motor hidráulico de dirección
- Inversor de bomba, el inversor de la bomba gestiona una "función de dirección hidráulica". Esto es que se acciona el motor de la bomba a la velocidad programada para la hora.
- Alta eficiencia de motor y batería debido a conmutaciones de alta frecuencia.



- Autodiagnóstico, los fallos se pueden visualizar a través del MDI / Display.
- Modificación de parámetros a través de la consola de programación.
- Contador de horas interno con valores que se pueden visualizar en la consola.
- Memoria de las últimas cinco alarmas con hora-metro y temperatura relativa se muestra en la consola.
- Función de prueba dentro de la consola para verificar los parámetros principales.

[17]

1.3.4 Cargadores de alta frecuencia para aplicaciones de baterías de tracción universal.

A diferencia de los cargadores de baja frecuencia, llamados también cargadores convencionales, los cuales han sido de gran utilidad, pero al mismo tiempo han perdido credibilidad debido a que producen mucho calor perdiendo un 30% de su capacidad por el calentamiento. Por lo tanto, no son ya recomendados ni rentables, ya que estas solo cargan las baterías hasta un 70% resultando insuficiente. Por lo que los cargadores de alta frecuencia son más ligeros, más compactos y son mucho más eficientes llegando a cargar hasta un 90% de la capacidad de la batería. Éstos utilizan corrientes de carga más bajas y están mejor sincronizadas que los cargadores convencionales. Además, son capaces de elegir los ajustes exactos que la batería requiere en ese momento. Y una ventaja muy importante es que consumen mucho menos energía y no tienen un pico de arranque elevado, a diferencia de los cargadores de baja frecuencia que consumen más al arranque, subiendo los costes de energía Figura 1. 13. A continuación, presentamos las características de funcionamiento de los cargadores de alta frecuencia Tabla 1. 1. [10]

Características

- Reduce la influencia de las variaciones de tensión de red.
- Arranque suave (cargadores monofásicos).
- Proceso de carga equilibrada.
- Carga de ecualización automática.
- Carga automática de mantenimiento.
- Adaptación al comportamiento del voltaje de las baterías sulfatadas.
- Compatibilidad electromagnética y seguridad de acuerdo con las directrices de EMC y las normas EN.
- Etiqueta frontal resistente a los ácidos.

- Modo de protección IP21.
 - Programa de carga totalmente regulado con curva de carga por impulsos.
 - Ahorro de energía debido a la tecnología HF + característica de pulso (charg.fact. 1,1).
 - Pantalla de datos de carga de los últimos 10 ciclos.
 - Disponibilidad aún mayor debido a - Sistema de ventilación exclusivo con ventilación forzada a través de un conducto de aire separado, lo que resulta en una menor sensibilidad al polvo.
 - Reducción de los costos de energía hasta en un 25% - Mayor eficiencia hasta un 95% - Muy poca potencia reactiva, $\cos > 0,95$ - Retrocesos bajos en la red eléctrica.
 - Proceso de carga equilibrada.
 - Tiempos de recarga garantizados en caso de variaciones de tensión de red $\pm 10\%$.
 - Corriente de red sinusoidal debido a la corrección del factor de potencia activa (PFC) ($> 700W$).
 - Corriente de carga completamente suavizada (100% DC), por lo tanto, reduce el aumento de la temperatura de la batería (aprox. $-5^{\circ}C$) durante el proceso de carga
 - Adecuado para aplicaciones industriales y domésticas, respetando las directrices de EMC y las normas EN.
 - Carga automática de ecualización y mantenimiento.
 - Memoria de datos y análisis de datos almacenados a través de la interfaz USB.
- [10]



Figura 1. 13 Cargador de baterías de tracción [10]



Operación y visualización

Totalmente automático:

- arranque suave
- Ajuste del parámetro de carga.
- Programa completo de carga y finalización de la carga.

Simple operación:

- Sólo conecte la batería con el cargador
- Sin ajuste de parámetros o cambio manual.
- Visualización del estado de funcionamiento mediante gran pantalla LED.

Seguridad

- Protección contra polaridad inversa
- Comprobación automática de los parámetros de la batería antes del inicio del proceso de carga.
- Control permanente del programa de carga sobre errores y parámetros de desconexión de seguridad.
- Control térmico para proteger el cargador.
- Si se detecta una falla de presión en el sistema de circulación de aire, cambie al programa de carga estándar. [10]

Características de carga

<i>flexy plus</i>			<i>Ladegerät / charger / chargeur Wsa</i>								
Ladezeit je Batterie-Kapazität (Ah/5h) in Stunden ca. Charging time acc. to battery capacity (Ah/5h) in (h) approx. Temps de charge selon capacité (Ah/5h) de batterie en (h) env.			Gerätedaten / Charger data / Données du chargeur								
Batterie-spannung	Traktionsbatterie PzS, PzB mit Wsa		Gerätetyp	Netzspannung	Netzleistung	Netzstrom	Netz-sicherung (träge)	Netz-leitung u. Netzstecker	Ladeleitung	Gehäuse	Gewicht brutto
Voltage	Traction battery PzS, PzB with Wsa		Charger type	Mains voltage	Mains power rating	Mains current	Mains fuse (slow)	Power line Plug	charger cable	Housing	Gross weight
Voltage V	Batterie traction PzS, PzB avec Wsa		Type de chargeur	Secteur voltage	Puissance secteur	Courant secteur	Fusible secteur (lent)	Câble du secteur et prise	Câble de charge	Armoire	Poids brut
	10 - 12 h	12- 14 h	V / A	V	kVA	A / Phase	A	mm ²	mm ²		ca. kg
24 V	121 - 160	161 - 199	E 24 / 20	E 230 V	0,8	3,2	10	1,5 Schuko	6	C0-4	16
	161 - 199	200 - 255	E 24 / 25	E 230 V	0,9	3,9	10	1,5 Schuko	6	C0-4	16
	200 - 255	256 - 290	E 24 / 30	E 230 V	1,1	4,7	10	1,5 Schuko	6	C0-4	17
	256 - 290	291 - 320	E 24 / 35	E 230 V	1,3	5,5	10	1,5 Schuko	6	C0-4	18
	291 - 320	321 - 375	E 24 / 40	E 230 V	1,5	6,5	10	1,5 Schuko	10	C1-4	22
	321 - 375	376 - 420	E 24 / 45	E 230 V	1,6	7,0	10	1,5 Schuko	10	C1-4	25
	376 - 420	421 - 480	E 24 / 50	E 230 V	1,9	8,2	16	1,5 Schuko	16	C1-4	25
	421 - 480	481 - 560	E 24 / 60	E 230 V	2,2	9,5	16	1,5 Schuko	16	C1-4	26
	481 - 560	561 - 680	E 24 / 70	E 230 V	2,6	11,3	16	1,5 Schuko	16	C10-4	34
	561 - 680	681 - 750	E 24 / 80	E 230 V	3,1	13,4	16	1,5 Schuko	25	C10-4	40
	681 - 750	751 - 870	D 24 / 90	D 400 V	3,3	4,7	10	1,5 CEE 16	25	E4-4	49
	751 - 870	871 - 1000	D 24 / 100	D 400 V	3,8	5,4	10	1,5 CEE 16	25	E4-4	50
	871 - 1000	1001 - 1200	D 24 / 125	D 400 V	4,8	6,9	10	1,5 CEE 16	25	E4-4	62

Tabla 1. 1 Características de operación en carga del cargador flexy plus [10]

1.3.5 Celdas de Hidrogeno

Descripción

Una celda de combustible opera básicamente como una batería. Este equipo genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión. A diferencia de las baterías utilizadas para aplicaciones que requieren de gran potencia, la característica más importante es que la celda de combustible no se agota ni tampoco requiere recarga como las convencionales. La celda de combustible está conformada por dos electrodos que a su vez están separados por un electrólito. El oxígeno es suministrado a través de un electrodo al igual que el hidrógeno se lo hace sobre el otro. Al momento que el hidrógeno es ionizado pierde un electrón, ambos el hidrógeno y el electrón se dirigen por diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrógeno se traslada hacia el otro electrodo por medio del electrólito mientras que el electrón se traslada a través de un material conductor. Todo este proceso lo que hace es producir agua, corriente eléctrica y calor útil. Cuando se requiere una cantidad de corriente que puede ser utilizable las celdas de combustibles son apiladas en varias capas. Otra característica de las celdas de combustible es que operan a diferentes temperaturas. Por ejemplo, las celdas de combustible de membrana eléctrica polimérica que se han sometido a estudio, han resultado muy apropiadas para la aplicación en autos, caso contrario las



celdas de combustible de carbonatos fundidos pueden ser más apropiadas para el uso con turbinas a gas. [4]

La energía química procedente del hidrógeno, que puede ser convertida en energía eléctrica, sin el paso de accionamiento térmico de un ciclo de potencia. Dicha conversión directa se da en las llamadas pilas de combustible, que convierten mediante un proceso electroquímico, la energía química del hidrógeno en energía eléctrica. La energía eléctrica producida por las celdas de hidrogeno puede utilizarse para aplicaciones estacionarios como energía final para consumidores industriales, domésticos y de servicios al igual que puede emplearse en aplicaciones de transporte, es decir en vehículos eléctricos. Incluso se puede emplear en aplicaciones portátiles en las que la típica batería sería reemplazada por un cartucho de hidrógeno o metanol y una pila de combustible. [18]

Pese a que una pila está conformada por elementos básicos descritos como electrodos y electrolito ver la Figura 1. 14, a esta asociación la conocemos más técnicamente como celda o monocelda, dejando el término utilizado como pila, asociado a stack, como la conexión en serie de las mono celdas necesarias para lograr una tensión requerida. Es por esto que la pila, es considerada como una estructura más compleja debido a que lleva asociados unos sistemas auxiliares como por ejemplo evacuación de calor, reformado de combustible, alimentación del mismo, control de la humedad del electrolito, etc. [17]

Las celdas de hidrogeno pueden encontrarse en distintos tipos, donde una de ellas son las de tipo PEM (Membrana de intercambio protónico o Protón Exchange Membrane) que se muestra en la Figura 1. 14, estas celdas operan a bajas temperaturas alrededor de unos 200F, con una densidad de potencia alta, con lo que la salida varía rápidamente satisfaciendo los cambios en la demanda de potencia, haciéndolas totalmente adecuadas para aplicaciones que requieren una demanda inicial rápida, como es el caso de automóviles. Las pilas de combustible poliméricas tienen una característica principal y es que tienen como electrolito una matriz polimérica conductora de protones como se muestra en la Figura 1. 14, que la hace una pila de tipo ácido. La estructura que se forma entre electrodos y electrolito es muy fina, y suelen estar conectadas mediante placas bipolares formando pilas compactas. Las PEM operan relativamente a temperaturas bajas alrededor de 40 a 80°C, suficientes para mantener la humedad del electrolito. [18]

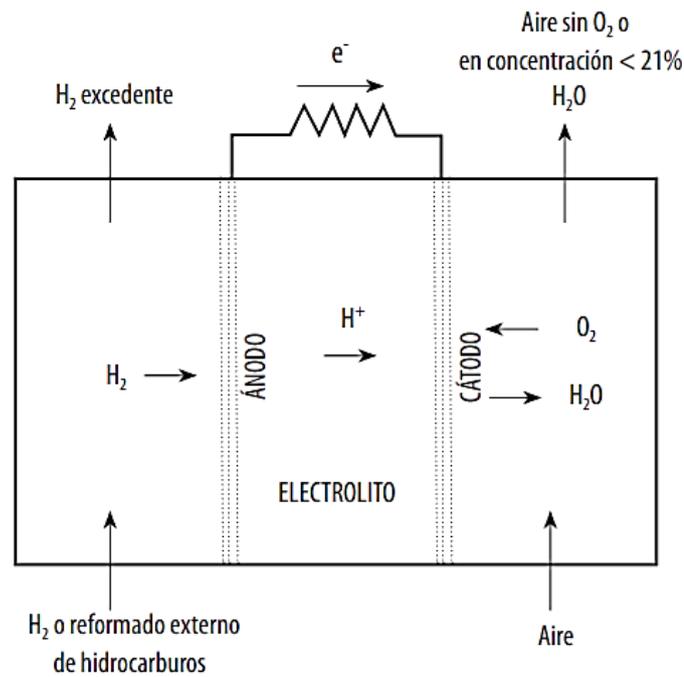


Figura 1. 14 Esquema de funcionamiento de una celda de PEM [18]

Ventajas e inconvenientes de las celdas PEM

La principal ventaja de estas celdas es que se adaptan fácilmente a un gran número de aplicaciones, desde aplicaciones de gran potencia del nivel de los MW hasta los kW, ya sean de modo portátiles o estacionarias descritas anteriormente, debido a que no toma en cuenta la temperatura relativa de operación. Cuando opera a temperaturas bajas, el tiempo de encendido es bajo. Puede trabajar en cualquier orientación con altas densidades de potencia, en comparación con otros tipos de pilas, ver la Tabla 1. 2 , lo que les hace idóneas para aplicaciones de transporte y equipos portátiles.

Clasificación de las Pilas

Se clasifican el tipo de pila en base al electrolito que emplean, con lo que podemos dar a conocer los tipos de pilas más utilizadas: Tabla 1. 2

- Pilas de membrana de intercambio protónico (PEMFC).
- Pilas alcalinas (AFC).
- Pilas de ácido fosfórico (PAFC).
- Pilas de carbonatos fundidos (MCFC).
- Pilas de óxidos sólidos (SOFC).

La característica más importante de los tipos de pila son la temperatura a la que trabaja Tabla 1. 2, en base a esta característica se presenta la siguiente clasificación:



- Trabajan a baja temperatura alrededor de unos 80°C:
 - PEMFC.
 - AFC.
- Trabajan a una temperatura intermedia alrededor de unos 200°C:
 - PAFC.
- Trabajan a altas temperaturas el rango se sitúa entre 650 y 1.100°C:
 - MCFC.
 - SOFC.

A continuación en la Tabla 1. 2 se presentan otras características importantes de los tipos de pilas al igual que las ya descritas anteriormente:

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSOFC
Temperatura (°C)	80	65-220	205	650	600-800	800-1.000
Reformador externo (CH ₄)	Sí	Sí	Sí	No	No	No
Tiempo de encendido (h)	<0,1	<0,1	1-4	5-10	-	-
Densidad de potencia (mW cm ⁻²)	420	620	250 (8 bar)	> 150	120	-
Eficiencia (% PCS) ^a	>50	>50	36-45	43-55	43-55	43-55

Tabla 1. 2 Datos comparativos de las diferentes pilas de combustible [18]



CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS QUE CONFORMAN LOS OBJETOS DE ESTUDIO

El presente capítulo abarca el estudio de los principales sistemas eléctricos del vehículo al cual se hace referencia en la investigación. Nuestro objeto de estudio será el montacargas eléctrico con el que cuenta el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de Cuenca, de modelo **15BTR-9** marca **HYUNDAI**.

2.1 Recolección de datos

2.1.1 Características principales del vehículo industrial

A continuación, mostramos las características más relevantes del vehículo eléctrico sujeto a estudio Tabla 2. 1: [20]

Tecnología	
Características	Montacargas
Motor-Generador	-Motor de tracción: 4.3 kW -Sistema de bombeo hidráulico (levantamiento): 9 kW
Capacidad de Carga	1.5 Toneladas
Batería	Plomo Acido
	Descarga profunda de 24 V
	750 Ah
	12 celdas en serie de 2V c/u
Estación de Carga	24 V
	70 A

Tabla 2. 1 Características técnicas del vehículo [20]

2.1.2 Características principales del banco de baterías utilizados en el vehículo industrial

Los parámetros más importantes a tener en cuenta de las baterías se detallan a continuación Tabla 2. 2:

Tensión nominal de cada celda	2V
Energía	20 – 35 Wh/L
Potencia	250W/kg con plena eficiencia
Eficiencia de carga	80%, varia con el rango de descarga y temperatura
Resistencia interna	0,022Ω para celda de 1Ah
Temperatura de operación	Temperatura ambiente
Ciclos de vida	800 al 80% de la capacidad

Tabla 2. 2 Parámetros de una batería de Plomo-Acido [20]

A continuación, en la Figura 2. 1 se presenta un esquema del funcionamiento de los diferentes sistemas que posee la máquina [21]. En la cual las flechas representan la dirección en la que fluye la energía, ésta puede variar dependiendo de la tecnología que se aplique. Por ejemplo, es posible introducir energía en el sistema de acumuladores desde el motor, usando frenos regenerativos.

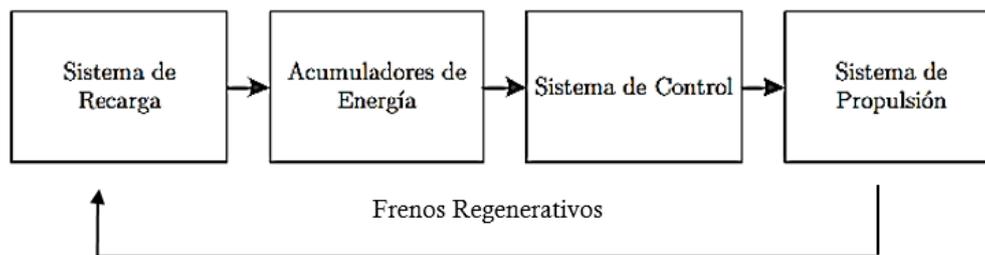


Figura 2. 1 Esquema general sistema de tracción del vehículo [21]

En el cual desglosando cada parte del esquema se tiene los diferentes componentes que posee el montacargas, como se observa en la Tabla 2. 3:

Sistema	Tipo
Sistema de Recarga	Cargador de batería, frenos regenerativos.
Acumuladores de energía	Baterías de Plomo Acido
Sistema de control	Inversores trifásicos y sensores
Sistemas de Propulsión	Motores trifásicos de inducción

Tabla 2. 3 Sistemas que conforman el montacargas

A continuación, se realizará la descripción de cada uno de estos elementos:

2.2 Comportamiento de carga y descarga del sistema de almacenamiento.

El tipo de batería que utiliza el montacargas se presenta a continuación en la Tabla 2. 4 y Figura 2. 2:

Modelo 24V6PZS750	
Capacidad Nominal 5 H En Ah	750
Longitud mm.	827
Anchura mm.	446
Altura mm.	627
Peso En Kg. +/- 5% Con Electrolito	720

Tabla 2. 4 Datos del tipo de batería

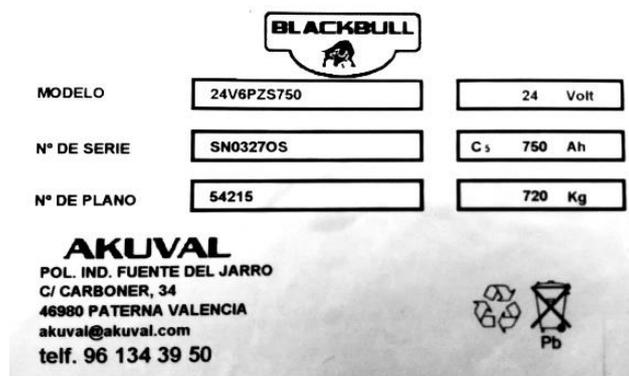


Figura 2. 2 Placa técnica del fabricante del sistema de almacenamiento.

$$24 V \quad 750 Ah \quad C_5$$

Lo que nos quiere decir que es una batería de plomo ácido que posee una energía de $750 Ah \cdot 24 V = 18 KWh$ que el banco puede entregar si se descarga la batería según C_5 en 5 horas.

Esto se debe tener en cuenta para el dimensionamiento de las baterías a usarse ya que; por ejemplo, si la batería en lugar de descargarse en 5 horas como recomienda el fabricante se descarga en 2 horas no brindará los 18 KWh que es la energía máxima sino por el contrario el banco será capaz de entregar menor energía de acuerdo a la ley de Peuker.

El índice C_5 nos indica que el fabricante sugiere que la batería debería ser descargada no en una hora, sino en cinco horas para ayudar a la vida útil de la batería. De esta manera

$$\frac{750}{5} = 150 Ah$$

Para ayudar a la vida útil y rendimiento de la batería el fabricante sugiere que se debería descargar la batería en 5 horas entregando así cada hora 150Ah. O una potencia igual a $150A \cdot 24V = 3,6 \text{ KW}$ cada hora.

Esto se puede observar de una mejor manera en la Figura 2. 3.

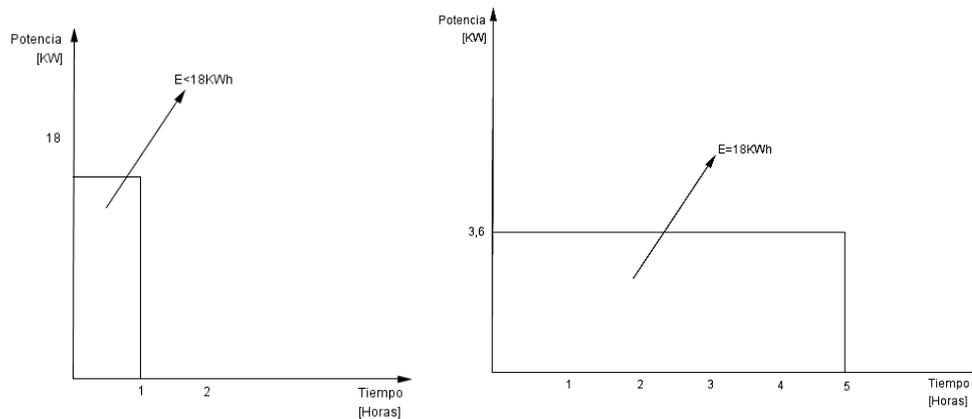


Figura 2. 3 Energía entregada según el tiempo de descarga

Mediante la toma de mediciones se realizará la verificación de que cantidad de energía puede entregar la batería según la carga que presente la máquina y el tiempo.

2.3 Características del sistema de carga para el sistema de almacenamiento.

El cargador que se utilizará para la carga de las baterías del montacargas pertenece a “industrie automation” cuyas características se muestran a continuación en la Tabla 2. 5 y Tabla 2. 6:

flexy plus



Type table

flexy plus			Ladegerät / charger / chargeur Wsa									
Ladezeit je Batterie-Kapazität (Ah/5h) in Stunden ca. Charging time acc. to battery capacity (Ah/5h) in (h) approx. Temps de charge selon capacité (Ah/5h) de batterie en (h) env.			Gerätedaten / Charger data / Données du chargeur									
Batterie-spannung	Traktionsbatterie PzS, PzB mit Wsa		Gerätetyp	Netzspannung	Netzleistung	Netzstrom	Netz-sicherung (träge)	Netz-leitung u. Netzstecker	Ladeführung	Gehäuse	Gewicht brutto	
Voltage	Traction battery PzS, PzB with Wsa		Charger type	Mains voltage	Mains power rating	Mains current	Mains fuse (slow)	Power line Plug	charger cable	Housing	Gross weight	
Voltage	Batterie traction PzS, PzB avec Wsa		Type de chargeur	Secteur voltage	Puissance secteur	Courant secteur	Fusible secteur (lent)	Câble du secteur et prise	Câble de charge	Armoire	Poids brut	
V	10 - 12 h	12- 14 h	V / A	V	kVA	A / Phase	A	mm ²	mm ²		ca. kg	
24 V	121 - 160	161 - 199	E 24 / 20	E 230 V	0,8	3,2	10	1,5 Schuko	6	C0-4	16	
	161 - 199	200 - 255	E 24 / 25	E 230 V	0,9	3,9	10	1,5 Schuko	6	C0-4	16	
	200 - 255	256 - 290	E 24 / 30	E 230 V	1,1	4,7	10	1,5 Schuko	6	C0-4	17	
	256 - 290	291 - 320	E 24 / 35	E 230 V	1,3	5,5	10	1,5 Schuko	6	C0-4	18	
	291 - 320	321 - 375	E 24 / 40	E 230 V	1,5	6,5	10	1,5 Schuko	10	C1-4	22	
	321 - 375	376 - 420	E 24 / 45	E 230 V	1,6	7,0	10	1,5 Schuko	10	C1-4	25	
	376 - 420	421 - 480	E 24 / 50	E 230 V	1,9	8,2	16	1,5 Schuko	16	C1-4	25	
	421 - 480	481 - 560	E 24 / 60	E 230 V	2,2	9,5	16	1,5 Schuko	16	C1-4	26	
	481 - 560	561 - 680	E 24 / 70	E 230 V	2,6	11,3	16	1,5 Schuko	16	C10-4	34	
	561 - 680	681 - 750	E 24 / 80	E 230 V	3,1	13,4	16	1,5 Schuko	25	C10-4	40	
	681 - 750	751 - 870	D 24 / 90	D 400 V	3,3	4,7	10	1,5 CEE 16	25	E4-4	49	
	751 - 870	871 - 1000	D 24 / 100	D 400 V	3,8	5,4	10	1,5 CEE 16	25	E4-4	50	
	871 - 1000	1001 - 1200	D 24 / 125	D 400 V	4,8	6,9	10	1,5 CEE 16	25	E4-4	62	
	200 - 255	256 - 290	E 48 / 30	E 230 V	2,2	9,5	16	1,5 Schuko	6	C10-4	45	
	256 - 290	291 - 320	E 48 / 35	E 230 V	2,6	11,2	16	1,5 Schuko	6	C10-4	47	
290 - 320	321 - 375	E 48 / 40	E 230 V	3,2	13,9	16	1,5 Schuko	10	C10-4	49		
321 - 375	376 - 420	D 48 / 45	D 400 V	3,4	5,0	10	1,5 CEE 16	10	E4-4	54		
376 - 420	421 - 480	D 48 / 50	D 400 V	3,6	5,2	10	1,5 CEE 16	10	E4-4	55		

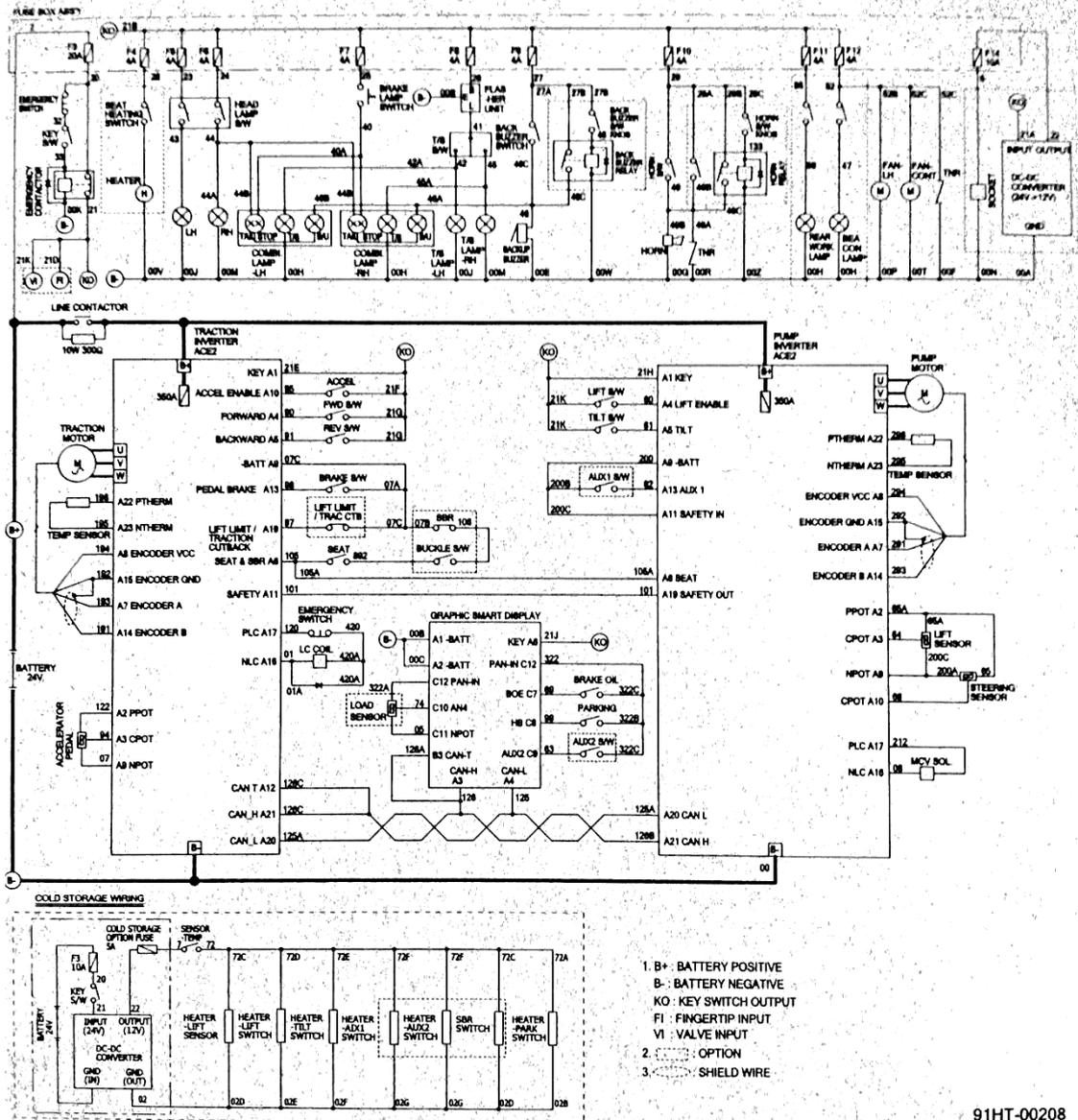
Tabla 2. 5 Características de carga [10]

Serie	flexy plus
Entrada AC	230V 4,74KVA 11,19A
Salida CD	24V / 125A
Batería	871 – 1200 Ah
Código Protección	IP 21

Tabla 2. 6 Datos del cargador [10]

2.4 Estudio del sistema eléctrico y de potencia que conforma el vehículo industrial.

A continuación, se muestra el esquema eléctrico del montacargas utilizado modelo 15BTR-9 Figura 2. 4:



91HT-00208

Figura 2. 4 Vista general del sistema eléctrico del montacargas

Como se puede observar en la Figura 2. 4 nos presenta tres partes del sistema eléctrico. El primero, mostrado en la Figura 2. 5 se trata acerca del cuadro de fusibles e indicadores e iluminación del montacargas, es decir la parte de baja potencia que es básicamente en corriente continua.

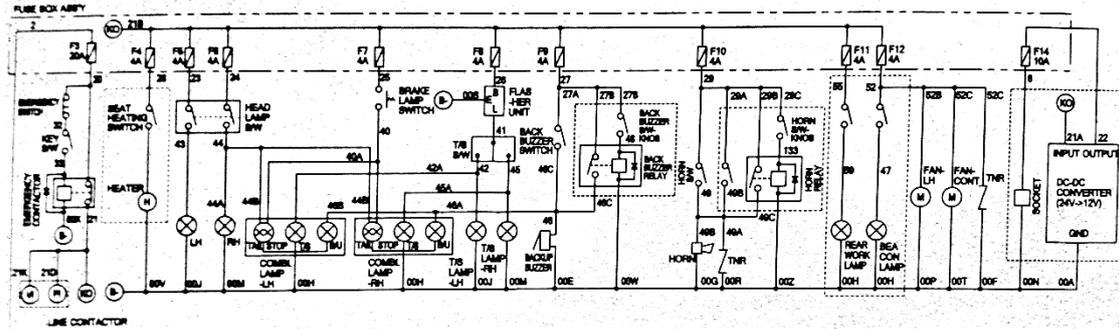


Figura 2. 5 Esquema eléctrico de fusibles, indicadores e iluminación del montacargas.

Estos son llamados también servicios auxiliares y ayudan para la iluminación y ventilación, claxon, etc. que el montacargas requiera para su trabajo. En el capítulo 3 se realizará la toma de mediciones de este grupo.

La segunda parte, que se presenta en la Figura 2. 6 del sistema eléctrico es el de potencia. Constituido básicamente por dos inversores trifásicos para los motores asíncronos de tracción y el sistema hidráulico cuyo esquema se muestra a continuación.

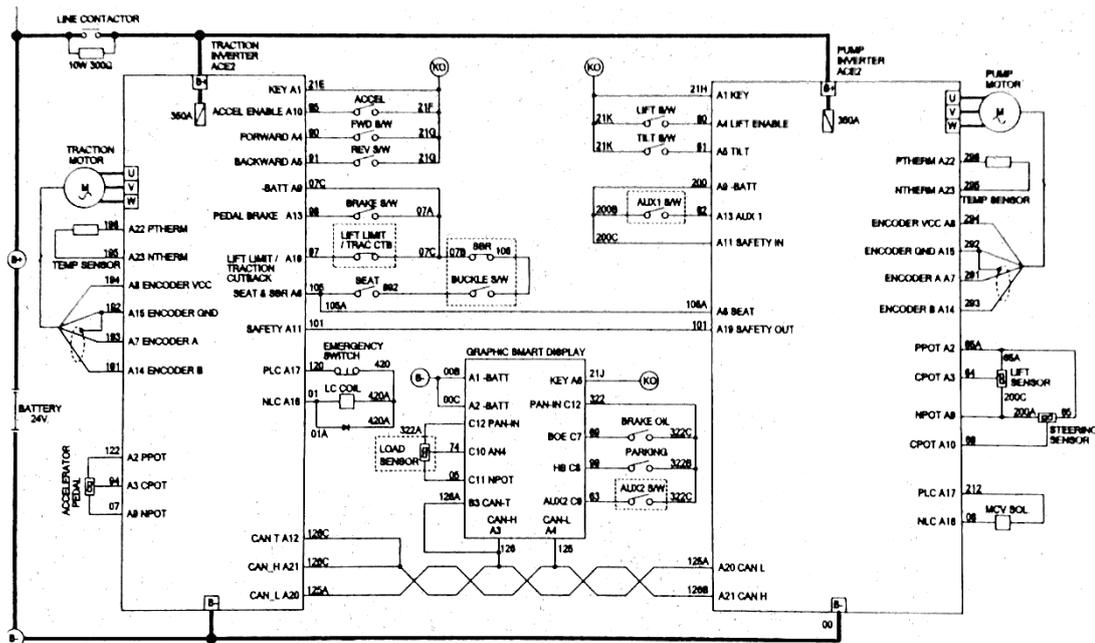


Figura 2. 6 Conexión de la parte de potencia del montacargas junto a los inversores y motor.

Como se puede apreciar en el esquema el sistema de potencia consta con dos motores los cuales cada uno es controlado por un inversor trifásico a lazo cerrado mediante encoder incremental de 64 pulsos/revolución que poseen en el eje de su respectivo motor. El motor que en el sistema se presenta a la izquierda del esquema sirve para la tracción del vehículo. Mientras que el otro motor hidráulico o también conocido como bomba sirve para la dirección hidráulica y el movimiento de la hidráulico del montacargas.

A continuación, se describirá cada uno de los principales elementos que constan en el esquema:

2.4.1 Inversor Trifásico Zapi ACE-2 350

Dentro de la familia ZAPIMOS, el inversor ACE-2 (E significa evolución) es el modelo utilizado para controlar motores de 4.0 kW a 9.0 kW. Ha sido expresamente diseñado para la tracción eléctrica de la batería.

Es apto para carretillas eléctricas, manejo de materiales: recolectores de pedidos, carretillas retráctiles, CB 2.0 toneladas, tractores, elevador de pluma y elevador de tijera.

El ACE-2 se puede suministrar en tres versiones:

1) Versión con sensor: el uso de un codificador (cojinete del sensor) en el eje del motor se realiza mediante un control del par de velocidad y par motor extremadamente preciso y confiable

2) Versión bobina censadas: mediante el uso de devanados auxiliares especiales dentro del motor en lugar de un codificador, se realiza la velocidad del motor y el control del par.

3) Versión sin sensor: utilizando solo la retroalimentación de voltaje de fase se implementa el control de par y velocidad del motor con el software de control sin sensor patentado de Zapi. [17]

La versión con sensor, que es la que usa el montacargas, adopta un codificador integrado en el rodamiento de bolas (rodamiento de sensor). El Encoder mejora el rendimiento de la máquina, con respecto a las versiones sin sensor y bobinas censadas, con una velocidad mínima más baja, el servicio de "parada en la rampa" y una inversión más suave; por otro lado, la confiabilidad se ve penalizada por la frágil mecánica y la posición inaccesible del cojinete del sensor. [17]

A continuación Tabla 2. 7, se muestran las especificaciones técnicas del equipo:

INVERSOR ACE-2 24 V/400	
Inversor para motores trifásicos asíncronos de CA	
Funciones de frenado regenerativo.	
Interfaz can-bus	
Memoria flash (128 Kbytes de memoria de programa en chip)	
Control digital basado en un microcontrolador.	
Voltaje	24 V
Corriente máxima ACE2 24V/400	400 A (RMS)
1 Hora a corriente nominal	200 A (RMS)
Frecuencia de operación	8 KHz
Rango de temperatura externa	-30 °C ÷ 40 °C
Temperatura máximo del inversor	85 °C

Tabla 2. 7 Especificaciones técnicas del equipo [17]

Diagrama de bloques del inversor

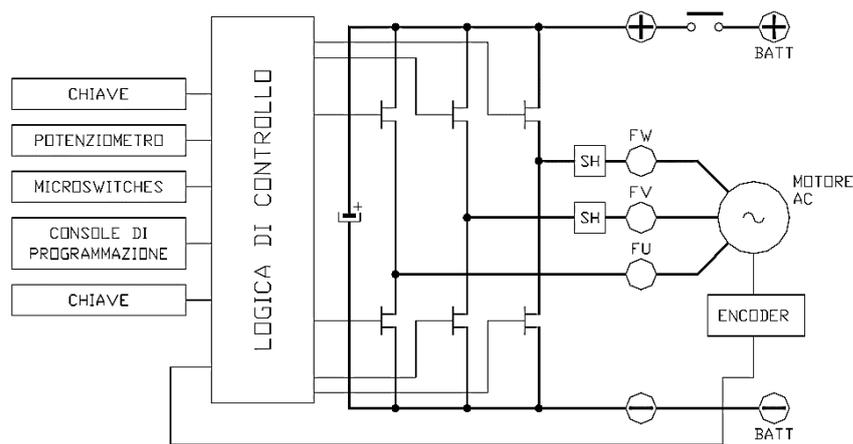


Figura 2. 7 Conexión del inversor al motor. [17]

Como se puede observar en la Figura 2. 7, el control de velocidad se realiza variando la frecuencia que es brindada al motor y mediante el sensor tipo encoder censa la velocidad del motor para controlar la velocidad según el peso que este soportando el montacargas.

2.4.2 Motor de Tracción

El motor de tracción es un motor trifásico de inducción o asíncrono de 4,3 KW. Como el que se muestra en la Figura 2. 8 a. En la Figura 2. 9 se muestra las características técnicas del motor. Además, este motor es acoplado a la transmisión ZF que convierte la potencia del motor en cualquier dirección que requiera el conductor. [20]



a



b

Figura 2. 8 Motores AC trifásicos de inducción. b) Rueda trasera de tracción del montacargas. [20]



Figura 2. 9 Placa técnica del motor de tracción

2.4.3 Motor Hidráulico o Bomba

El motor hidráulico es el que brinda la fuerza para el movimiento de la cuchilla y también interviene en la dirección hidráulica del vehículo. Es un motor trifásico de inducción o asíncrono de 9 KW. Como el que se muestra en la Figura 2. 10.



Figura 2. 10 Placa técnica del motor hidráulico del montacargas

2.5 Características del hidrógeno.

El hidrógeno es el elemento químico más simple (formado solamente por un protón y un electrón) y más abundante del universo. Se encuentra principalmente en forma de gas hidrógeno (H₂) en las estrellas y en los planetas gaseosos, y además aparece unido a otros elementos formando una gran variedad de compuestos químicos, como el agua (H₂O) y la mayoría de los compuestos orgánicos.

Se trata de un gas incoloro, inodoro e insípido a temperatura ambiente. Es el elemento más liviano que existe, siendo aproximadamente 14 veces menos pesado que el aire. Su molécula consiste en dos átomos de hidrógeno (H₂) unidos por un enlace covalente. [22]

Características generales como elemento químico:



- Lugar en la tabla periódica = 1
- Peso atómico = 1,00794
- Símbolo = H
- Fusión = 259,3°C
- Ebullición = 252,87°C
- Volumen atómico 14,24

El hidrógeno no es un recurso energético, pues no se encuentra aislado en la Naturaleza, sino que es preciso producirlo a partir de diferentes energías primarias (fósil, nuclear o renovables). En este sentido es un portador de energía (un vector energético), y éste es uno de los principales aspectos a tener en cuenta para lograr los beneficios que promete la economía del hidrógeno.

Hoy día casi todo el hidrógeno se obtiene por procesos químicos (fundamentalmente reformado) a partir de combustibles fósiles (fundamentalmente gas natural).

El método más utilizado en la industria para la producción de hidrógeno se basa en la reacción química del hidrógeno en unión con el oxígeno generando agua, calor y electricidad. Tiene dos electrodos y un electrolito al igual que una pila convencional, este tipo de almacenamiento contiene una eficiencia energética de 35%-50% y es amigable con el medio ambiente. Debido a su tamaño es muy fácil de utilizar, permite confiabilidad y robustez en el suministro ofreciendo gran seguridad. [23]

2.6 Celda de combustible.

La energía química del hidrógeno puede ser convertida de forma directa en energía eléctrica, sin el paso intermedio del accionamiento térmico de un ciclo de potencia. Esta conversión directa se lleva a cabo en las llamadas celdas o pilas de combustible, capaces de convertir por medios electroquímicos la energía química del hidrógeno en energía eléctrica. La supresión del ciclo termodinámico intermedio permite superar las limitaciones impuestas por el rendimiento de Carnot, alcanzándose así elevados rendimientos energéticos. La energía eléctrica producida puede emplearse tanto con fines estacionarios (electricidad como energía final para consumidores industriales, domésticos y de servicios) como con fines de transporte, mediante su uso en vehículos eléctricos. Incluso se puede emplear en aplicaciones portátiles en las que la típica batería sería reemplazada por un cartucho de hidrógeno o metanol y una pila de combustible. [18]



CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se realizará la descripción y muestra de los resultados encontrados con las tomas de mediciones experimentales de las necesidades energéticas del montacargas. De esta forma se procederá a realizar la caracterización de la maquina con el fin de realizar el modelamiento de los principales elementos que posee el vehículo industrial, el estado que se encuentra cada uno y las características de funcionamiento.

3.1 Toma de mediciones del sistema de almacenamiento (CC)

3.1.1 Descripción de los movimientos realizados para la toma de mediciones

En los siguientes apartados se referirá como movimiento 1, 2 y 3 a los movimientos de las partes del montacargas de la siguiente manera:

Movimiento 1 (mov 1): movimiento cuchilla en forma vertical (arriba-abajo).

Movimiento 2 (mov 2): movimiento mástil adelante – atrás.

Movimiento 3 (mov 3): movimiento cuchilla en forma horizontal (izquierda –derecha).

3.1.2 Mediciones de consumo de energía sin carga

Se realizó la toma de mediciones mediante oscilogramas del banco de baterías, cuando el montacargas está funcionando con el motor de fuerza (motor hidráulico), el montacargas está en vacío (sin ninguna carga), es decir sin peso alguno. A continuación, se presenta las mediciones realizadas con cada uno de sus oscilogramas en donde para todos los oscilogramas el Canal 1 muestra la corriente absorbida, el Canal 2 el voltaje que entrega el banco de baterías. La componente matemática nos muestra la potencia en ese instante.

En la Figura 3. 1 se presenta la forma de onda tanto de voltaje, corriente como de potencia con la componente matemática.

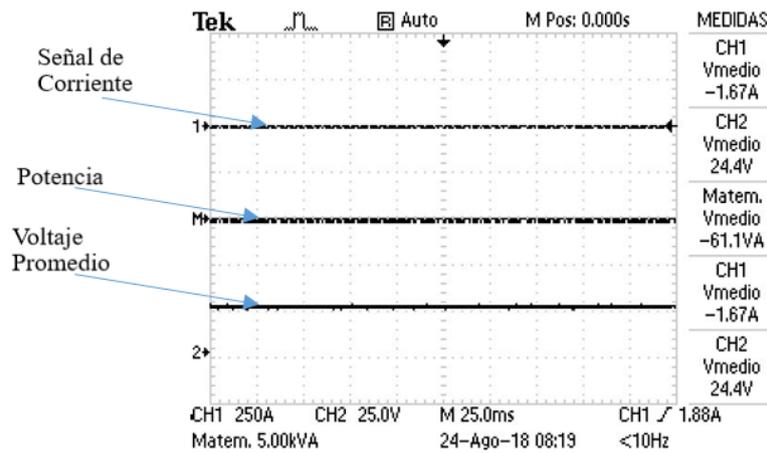


Figura 3. 1 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías cuando el montacargas está en standby

En la Figura 3. 1 se observa la señal de corriente con un valor de 1.67 A la cual se atribuye al montacargas en estado de reposo o standby es decir sin realizar movimiento alguno. El voltaje promedio en la batería en el mismo estado es de 24.4 V. La potencia consumida en ese instante es de 61.1 W.

La Figura 3. 2, Figura 3. 3 y Figura 3. 4 muestra voltaje, corriente y potencia. Cada figura representa el movimiento 1 con diferente velocidad tanto rápido, movimiento medio como lento. Podemos observar que las magnitudes cambian de acuerdo a cada movimiento.

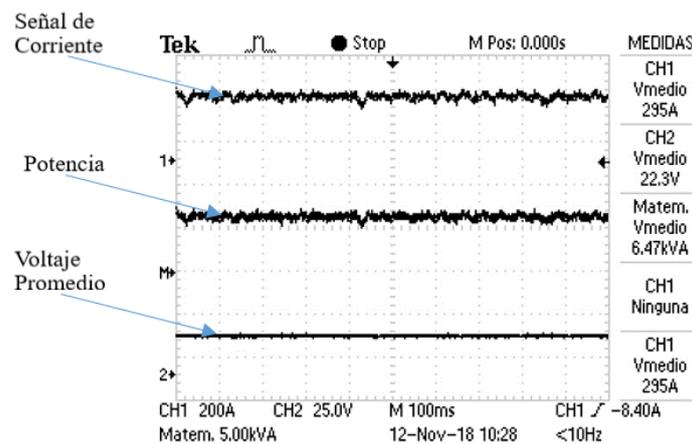


Figura 3. 2 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 1 rápido

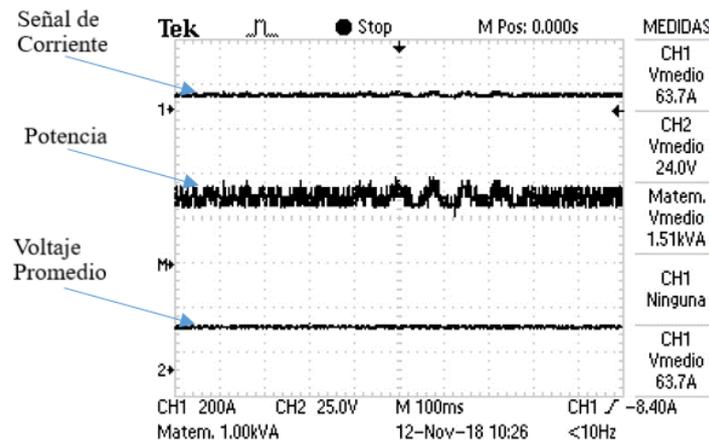


Figura 3. 3 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 1 velocidad media

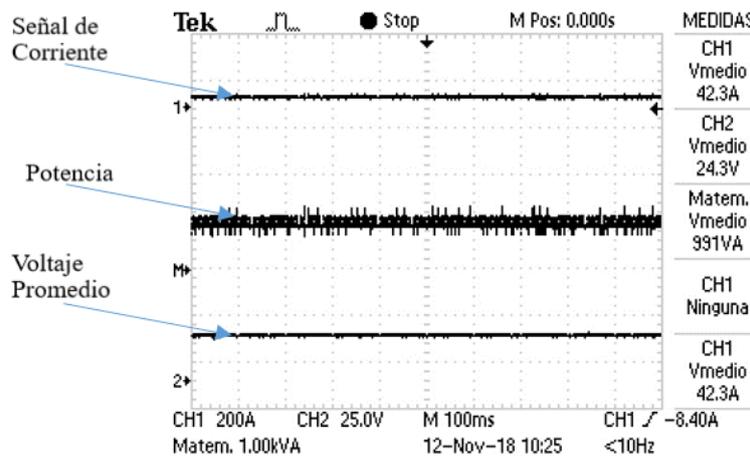


Figura 3. 4 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 1 lento

Con el movimiento 1 se realizaron tres mediciones para diferente velocidad, debido a que este movimiento tiene una amplia zona de desplazamiento, es decir puede llegar a una altura de 5.2 m con respecto al suelo con lo que se puede desplazar hacia arriba a diferente velocidad sin problema. Mientras que con los otros movimientos el 2 y 3 la zona de desplazamiento es muy reducida por lo que no se puede estimar diferentes velocidades. Cuando realizamos el movimiento 1 con distinta velocidad, nos arrojó resultados distintos de consumo de energía por ejemplo para el movimiento 1 rápido, el consumo es el máximo que puede alcanzar el vehículo con un valor de potencia de 6.47 kW (ver Figura 3. 2). Al igual realizamos el movimiento 1 pero con una velocidad media con lo cual el consumo se reduce 5 veces con respecto al movimiento rápido, dando un valor de potencia consumida de 1.5 KW (ver Figura 3. 3). Finalmente realizamos el movimiento 1 pero con

una velocidad lenta, dando un valor de potencia de 991 W (ver Figura 3. 4) que es 2 veces menos que el movimiento medio y alrededor de 7 veces menos que el movimiento rápido.

La Figura 3. 5, Figura 3. 6 nos muestra voltaje, corriente y potencia. Estas mediciones fueron tomadas al realizar el movimiento 2 y 3 respectivamente.

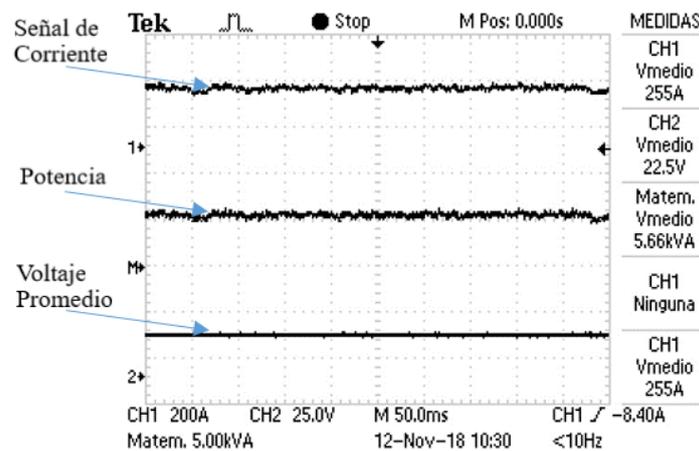


Figura 3. 5 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 2

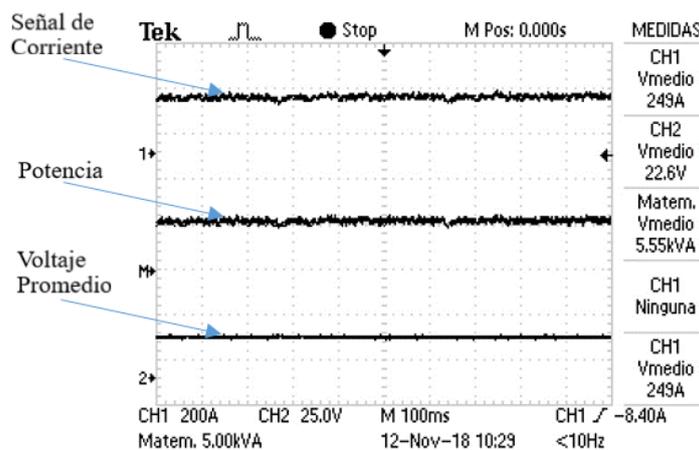


Figura 3. 6 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, movimiento 3

Con el movimiento 2 y 3 se realizó una sola medición para cada uno, debido a que estos movimientos tienen una zona de desplazamiento reducida. Al realizar el movimiento 2 y 3, tenemos resultados similares en el consumo de energía, dándonos un valor de potencia de 5.66 KW (ver Figura 3. 5) y 5.55 KW (ver Figura 3. 6) para el movimiento 2 y 3 respectivamente.

En la Figura 3. 7 podemos observar el voltaje, corriente y potencia. El canal 1 muestra la corriente, que en este caso resulta de todas las luces, focos e indicadores encendidos al mismo tiempo en el vehículo dando un valor de 11.7 A (ver Figura 3. 7). En el canal 2 observamos el voltaje que entrega el banco de baterías que se mantiene en un valor

promedio de 24 V (ver Figura 3. 7). La componente matemática nos muestra la potencia en ese instante que es de 271 W en relación cuando está en movimiento el consumo es mucho mayor alrededor de los 6 KW como se indica y explica en las figuras anteriores, con lo cual nos muestra que el consumo de energía es 20 veces menor aproximadamente al no estar en funcionamiento los motores.

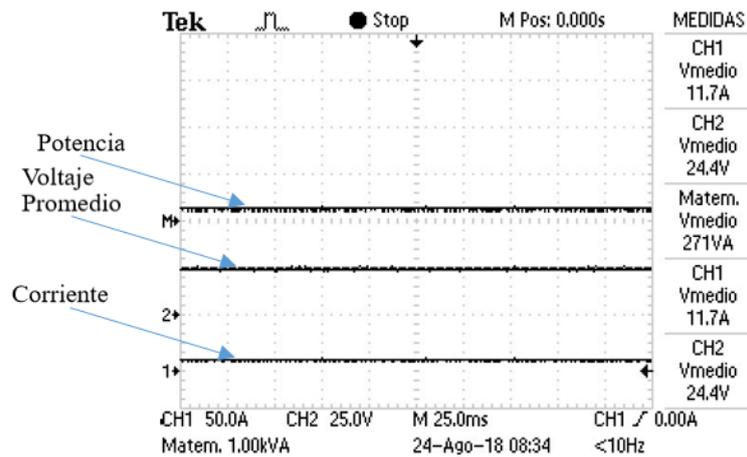


Figura 3. 7 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, todos los indicadores e iluminación activos.

En la Figura 3. 8 observamos el voltaje, corriente y potencia. El canal 1 muestra la corriente absorbida por la carga, que en este caso resulta de todas las luces, focos e indicadores encendidos al mismo tiempo en el vehículo más el movimiento 1 más el vehículo en movimiento. En el canal 2 observamos el voltaje que entrega el banco de baterías.

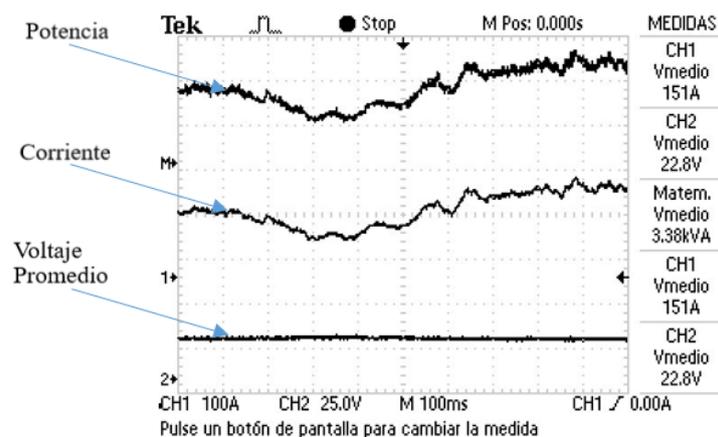


Figura 3. 8 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, todos los indicadores e iluminación activos + movimiento 1+ carro en movimiento

En la Figura 3. 8 tenemos los resultados de voltaje, corriente y potencia conseguidos al estar el banco de baterías suministrando energía a diferentes cargas como los indicadores o direccionales, toda la iluminación que posee, el movimiento 1 (cuchilla arriba y abajo), y por último el carro en movimiento (desplazamiento hacia adelante=2Km/h aprox.) dando como resultado una corriente de 151 A, voltaje de 22.8 V, y una potencia de 3.38 KW. Estos valores de consumo son considerados como un valor medio ya que el valor máximo de consumo del vehículo recordemos es de 6.5 KW. En la gráfica (Figura 3. 8) podemos observar que la señal de corriente y potencia no son constantes esto se debe a que el vehículo esta con las luces de dirección encendidas es decir estas están prendiéndose y apagándose constantemente por lo que provocan una pequeña distorsión en las señales.

A continuación, en la Tabla 3. 1 presentamos un resumen de cada una de las mediciones realizadas de acuerdo a cada movimiento:

Toma de mediciones del sistema de almacenamiento								
Mediciones Sin Carga								
Estado								
	Standby	MOV 1			MOV 2	MOV 3	Indicadores e iluminación activos, vehículo en standby	Indicadores e iluminación activos + MOV 1 (2.8km/h)
		Rápido (0,42m/s)	Velocidad media (0,17m/s)	Lento (0,07 m/s)				
Voltaje (V)	24.4	22.3	24.0	24.3	22.5	22.6	24.4	22.8
Corriente (A)	1.67	295	63.7	42.3	255	249	11.7	151
Potencia (kW)	0.061	6.47	1.51	0.99	5.66	5.55	0.271	3.38

Tabla 3. 1 Mediciones del sistema de almacenamiento sin carga

3.1.3 Mediciones con carga aproximadamente 1 Ton.

Se realizó la toma de mediciones mediante oscilogramas del banco de baterías, cuando el montacargas está funcionando con el motor de fuerza (motor hidráulico), con carga aproximadamente 1 Ton. A continuación, se presenta las mediciones realizadas con cada uno de sus oscilogramas:

La Figura 3. 9 describe la corriente que absorbe el vehículo cuando este se encuentra en standby es decir en reposo y con una carga de 1 Ton., dando un valor de 2.36 A que prácticamente resulta en un valor similar al que se obtuvo cuando el vehículo estaba sin

carga ver la Tabla 3. 1. Se observa que la potencia no cambia cuando el vehículo está en reposo con y sin carga dando resultados similares de 61 W y 41.7 W cuando el vehículo esta con carga y sin carga respectivamente, es decir la potencia no aumenta cuando el vehículo sostiene un peso en standby.

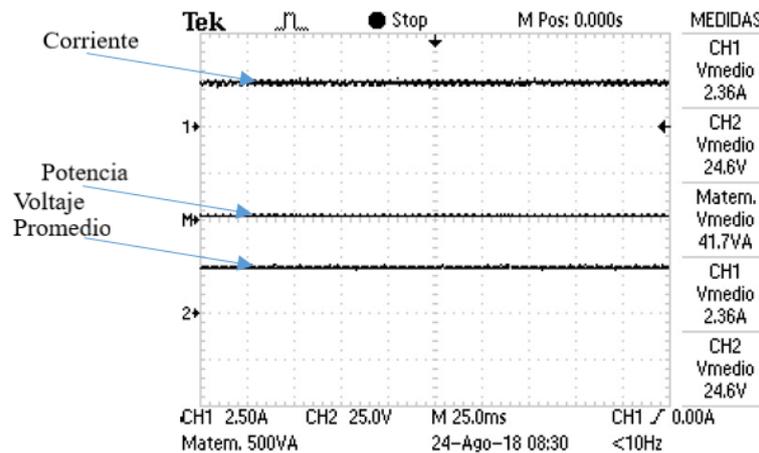


Figura 3. 9 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, Standby

La Figura 3. 10 y la Figura 3. 11 muestra la tensión, corriente y potencia. El canal 1 muestra la corriente absorbida por la carga, al realizar el movimiento 1, movimiento 2 y movimiento 3. En el canal 2 observamos el voltaje que entrega el banco de baterías. La componente matemática nos muestra la potencia en ese instante, observando que el consumo aumenta considerablemente al valor máximo cuando los motores están en funcionamiento. Este valor de potencia varia para cada uno de los movimientos, es decir el consumo es diferente cuando se realiza cada movimiento con el mismo peso (aprox. 1 Ton.).

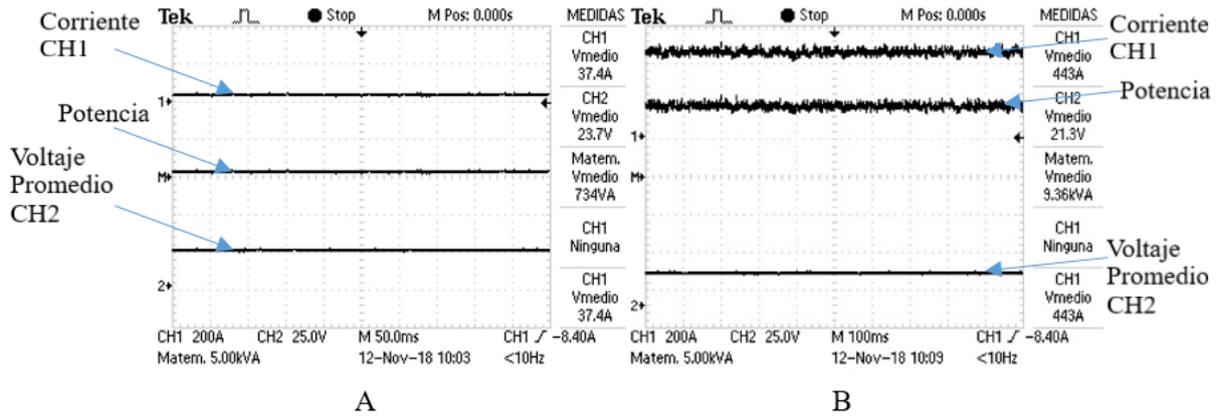


Figura 3. 10 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, A: movimiento 1 lento; B: movimiento 1 rápido

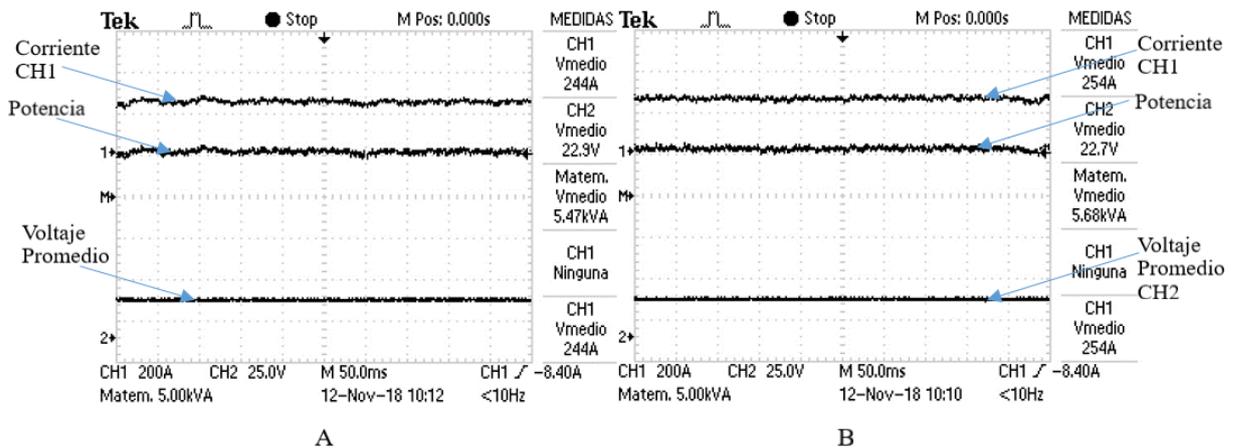


Figura 3. 11 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, A: movimiento 2; B: movimiento 3

La Figura 3. 12 muestra la corriente que absorbe el vehículo cuando este se encuentra en standby y con todas las luces e indicadores encendidos. El canal 1 muestra la corriente consumida. El canal 2 muestra el voltaje que entrega el banco de baterías en ese instante.

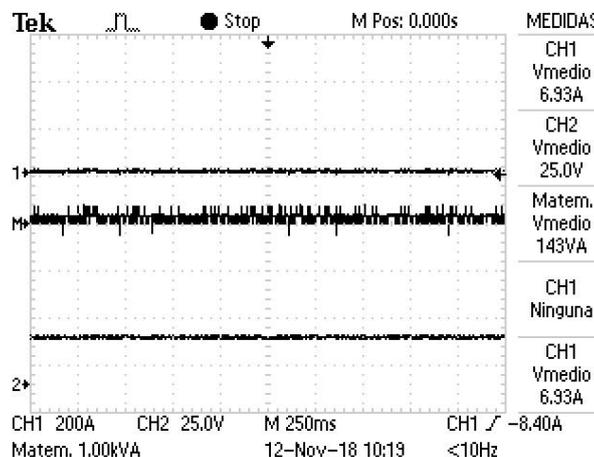


Figura 3. 12 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, estando activo todos los indicadores (focos e iluminación)

La Figura 3. 13 describe la corriente que absorbe el vehículo cuando este se encuentra con la carga aproximada de 1 Ton., pero con todas las luces e indicadores encendidos más el vehículo en movimiento. El canal 2 muestra el voltaje que entrega el banco de baterías en ese instante.

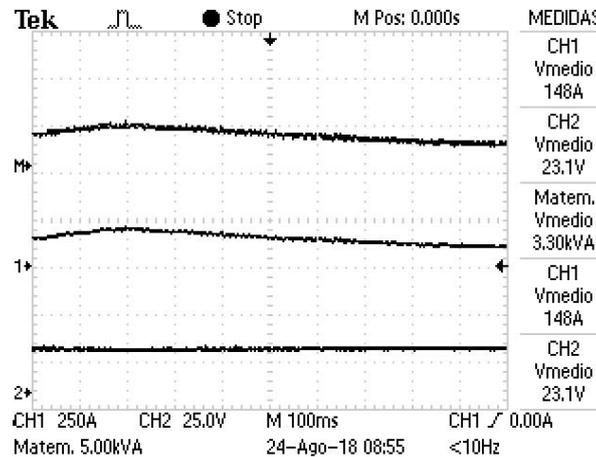


Figura 3. 13 Voltaje, corriente y potencia del banco de baterías, estando activos todos los indicadores con carro en movimiento

A continuación, en la Tabla 3. 2 presentamos un resumen de cada una de las mediciones realizadas de acuerdo a cada movimiento.

Toma de mediciones del sistema de almacenamiento								
Mediciones con carga aproximadamente 1 tonelada								
	Estado						Indicadores e iluminación activos, vehículo en standby	Indicadores e iluminación activos + vehículo en movimiento (2.8 km/h)
	Standby	MOV 1		MOV 2	MOV 3			
		Lento (0,07 m/s)	Rápido (0,34 m/s)					
Voltaje (V)	24.6	23.7	21.3	22.9	22.7	25.0	23.1	
Corriente (A)	2.36	37.4	443	244	254	6.93	148	
Potencia (kW)	0.0417	0.734	9.36	5.47	5.68	0.143	3.30	

Tabla 3. 2 Mediciones del sistema de almacenamiento con carga de 1 tonelada

3.1.4 Caracterización de la Resistencia Interna del Sistema de Almacenamiento

Se realizó la medición de cada una de las resistencias internas del sistema de almacenamiento utilizando el equipo Fluke BT521, Analizador y Probador de Baterías

Avanzado. A continuación, en la Tabla 3. 3 se presenta las mediciones de la resistencia interna y el voltaje interno de cada una de las celdas del sistema de almacenamiento, para lo cual se observó el indicador de batería del vehículo eléctrico y se realizó las mediciones tanto con carga agotada, es decir 1 barra menor al 10% de la capacidad de la batería. Media carga 5 barras, es decir 50% de la capacidad de la batería y con carga completa. En la Figura 3. 14 y Figura 3. 15 se puede observar de una manera gráfica las variaciones de resistencia interna y de voltaje en cada caso.

Caracterización Resistencia Interna del Sistema de Almacenamiento						
N. Celda	Descargada (1 barra intermitente)		Media Carga (5 Barras)		Carga Completa	
	Voltaje	Resistencia mΩ	Voltaje	Resistencia mΩ	Voltaje	Resistencia mΩ
1	2,009	0,81	2,054	0,81	2,136	0,69
2	2,014	0,76	2,059	0,72	2,138	0,68
3	2,015	0,77	2,059	0,7	2,138	0,66
4	2,016	0,86	2,06	0,83	2,139	0,76
5	2,015	0,67	2,059	0,72	2,139	0,63
6	2,007	0,69	2,051	0,7	2,136	0,68
7	2,013	0,73	2,057	0,65	2,137	0,67
8	2,011	0,74	2,054	0,68	2,138	0,64
9	2,016	0,78	2,058	0,65	2,138	0,63
10	2,015	0,77	2,058	0,66	2,139	0,66
11	2,007	0,82	2,05	0,75	2,135	0,65
12	2,014	0,89	2,06	0,85	2,144	0,73

Tabla 3. 3 Caracterización resistencia interna y voltaje del sistema de almacenamiento

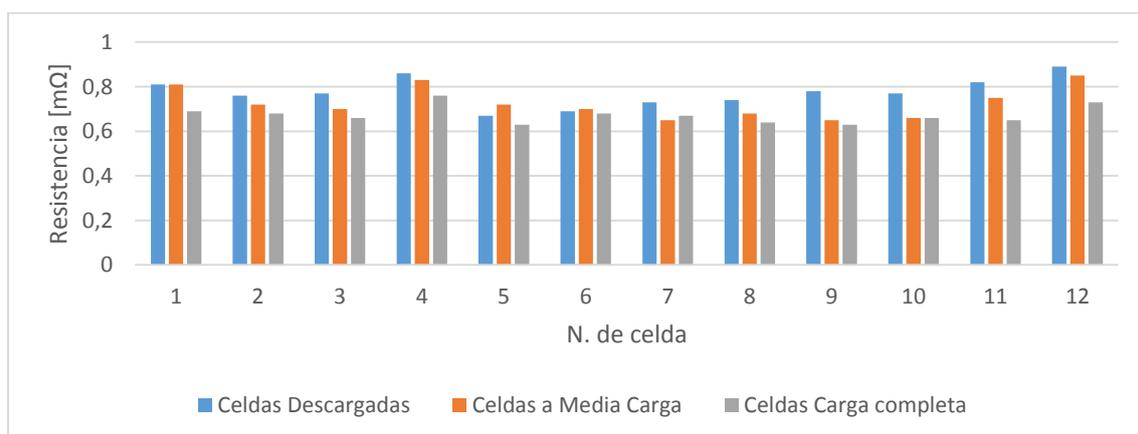


Figura 3. 14 Resistencia interna de las celdas de la batería

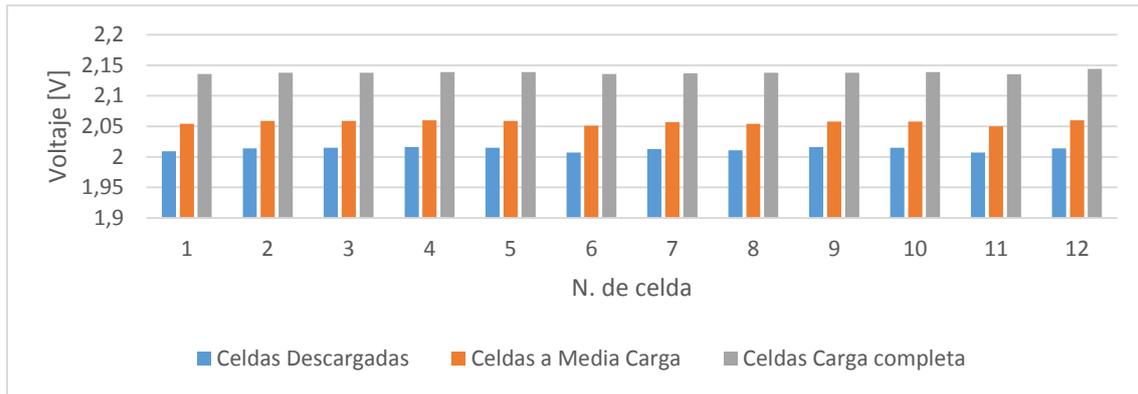


Figura 3. 15 Voltaje de las celdas de la batería

Con lo que se puede comprobar que la resistencia interna de la batería varía según la carga que posea el sistema de almacenamiento. Así, mientras mayor este cargada la batería el voltaje de la celda aumenta y su resistencia disminuye. Esto es importante para la modelación de la batería. Modelos que simulan el funcionamiento dinámico de la batería deben tener en cuenta la variación de la resistencia interna según la corriente que entre la batería en su ciclo de descarga.

3.2 Análisis de carga y descarga, rendimiento del sistema de almacenamiento

3.2.1 Mediciones del cargador del montacargas y eficiencia

Para la realización de esto se utilizó la configuración que se muestra en el siguiente esquema Figura 3. 16, donde indicamos el orden de los equipos utilizados para la medición tanto para corriente continua como para la corriente alterna, dando como resultado la energía desarrollada por el montacargas :

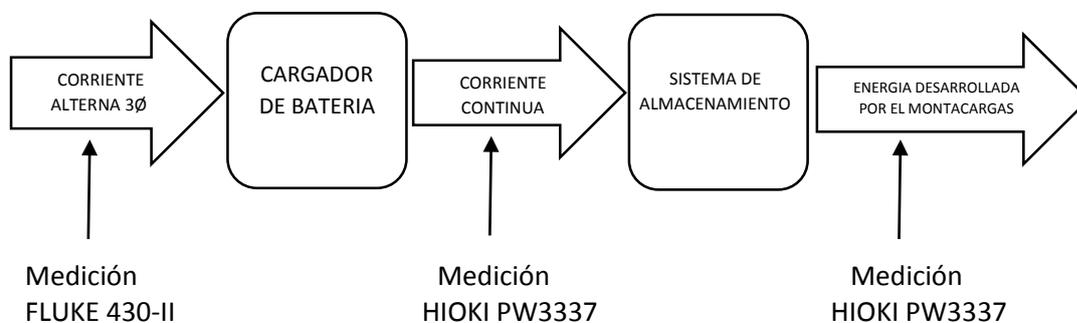


Figura 3. 16 Esquema para la medición del cargador del montacargas

La medición de la corriente trifásica de la red se realiza utilizando el equipo FLUKE y la medición de la corriente continua que se manda al sistema de almacenamiento se realiza utilizando el equipo HIOKI simultáneamente en un ciclo de carga completo.

3.2.2 Medición del Cargador de Batería utilizando el equipo: Analizador de Energía FLUKE 430-II

Para analizar la corriente, potencia y su factor de potencia, así como la energía que consume la batería totalmente descargada hasta su carga completa se procedió a utilizar el equipo FLUKE 430-II conectándolo de tal forma que pueda medir las corrientes y voltajes que posee la red trifásica que alimenta el cargador de batería. Para esto se configuro el equipo para que tome mediciones cada 500ms de esta manera nos permite analizar todos estos datos dándonos así las siguientes mediciones a lo largo de 190 minutos de carga.

En la Figura 3. 17 y Figura 3. 18 se muestra las corrientes y potencias respectivamente de cada una de las fases entregadas al cargador en un ciclo de carga.

Corriente:

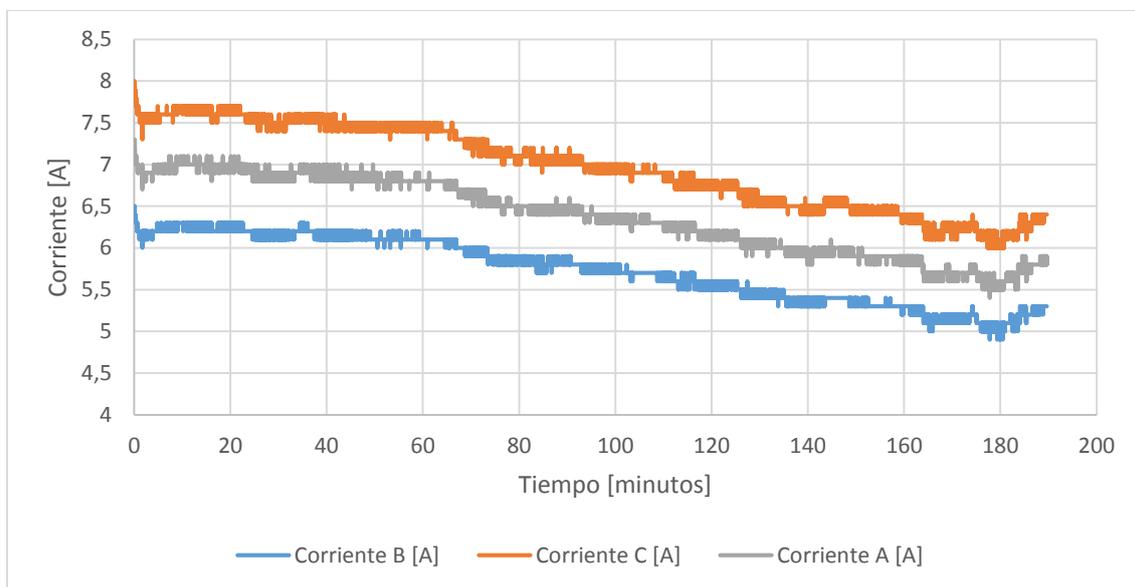


Figura 3. 17 Corrientes y Fases en la medición del cargador

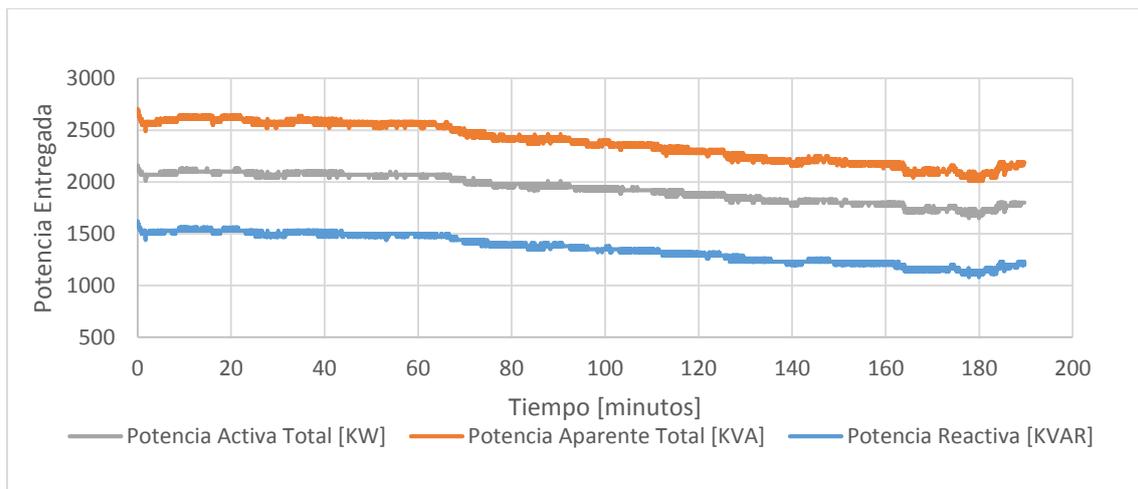
Potencia:

Figura 3. 18 Potencias de fase consumida en un ciclo de carga por el cargador

Mientras que en la Figura 3. 19 podemos observar la energía activa, reactiva y aparente total en un ciclo de carga.

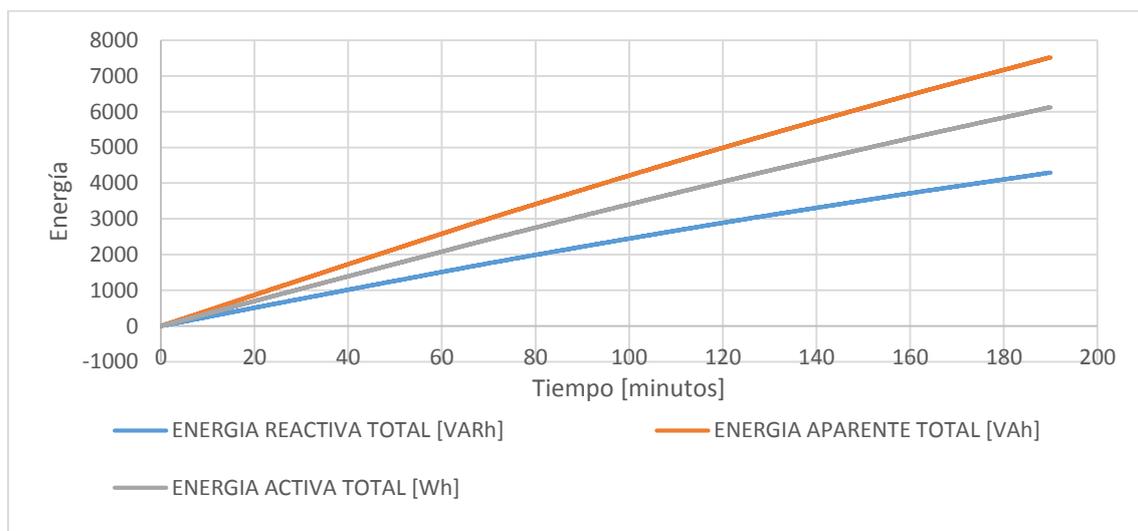
Energía:

Figura 3. 19 Energía trifásica total activa, reactiva y aparente consumida en un ciclo de carga por el cargador

En la Tabla 3.4 y

Tabla 3.5 se realiza un resumen de los datos más importantes de la medición realizada con el Fluke:

	Inicial	Final (190 minutos)
Potencia Activa [W]	2160	1800
Potencia Reactiva [VAR]	1620	1200
Potencia Aparente [VA]	2700	2190
Corriente A [A]	7,2	5,8
Corriente B [A]	6,5	5,3
Corriente C [A]	7,9	6,4

Tabla 3.4 Datos de la medición a la entrada del cargador del vehículo eléctrico en el proceso de carga

Energía Consumida en 190 minutos de Carga:

Energía Activa [KWh]	6,12
Energía Reactiva [KVARh]	4,29
Energía Aparente [KVAh]	7,51

Tabla 3.5 Energía consumida por el cargador del vehículo eléctrico en el proceso de carga

3.2.3 Medición de Carga utilizando el equipo: Medidor de Energía HIOKI PW3337

Para la parte de la medición en corriente continua se utilizó este equipo para medir el voltaje, corriente y energía que el cargador de batería envía al sistema de almacenamiento del montacargas. Para esto se configuró el equipo que tome mediciones cada 500ms al igual que el FLUKE 430-II dando los siguientes resultados:

En la Figura 3.20 se puede observar el voltaje de las baterías cuyo valor tiende a aumentar durante la carga lo que es normal.

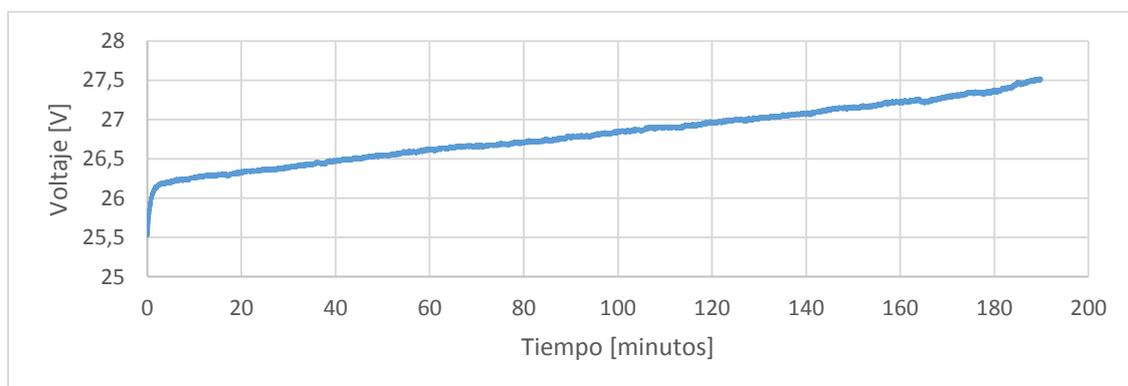


Figura 3.20 Voltaje del sistema de almacenamiento

En la Figura 3. 21 se puede observar la corriente de salida del cargador de batería, mientras que en la Figura 3. 22 podemos observar el oscilograma captado en un instante de tiempo. En este oscilograma se observa que la corriente que se entrega en un instante es aproximado a los 69 A.

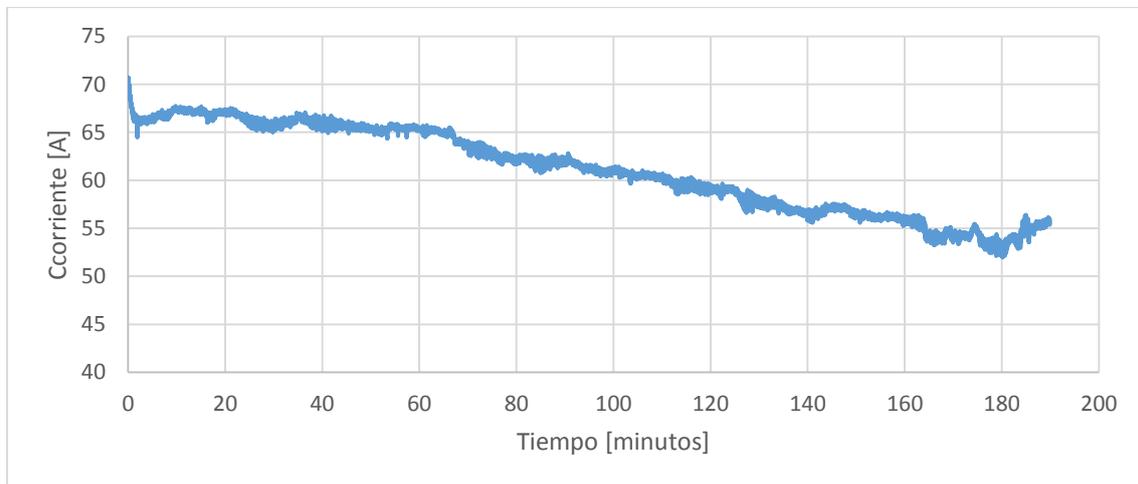


Figura 3. 21 Corriente de salida del cargador de batería

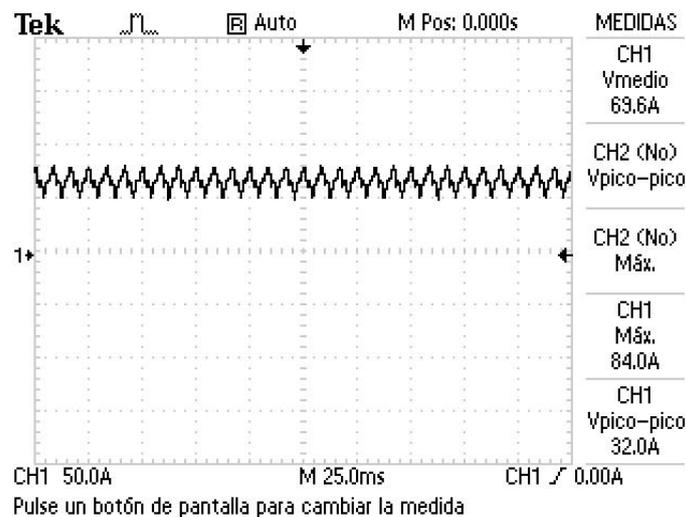


Figura 3. 22 Oscilograma, corriente que fluye hacia el sistema de almacenamiento en un instante dado.

De igual manera, en la Figura 3. 23, Figura 3. 24 y Figura 3. 25 se presenta la potencia en W (Vatios) y la energ: en Ah (Amperios hora) y Wh (Vatios hora) respectivamente que entrega el cargador de bater: al sistema de almacenamiento en un ciclo de carga.

Potencia Entregada al Sistema de Almacenamiento en W:

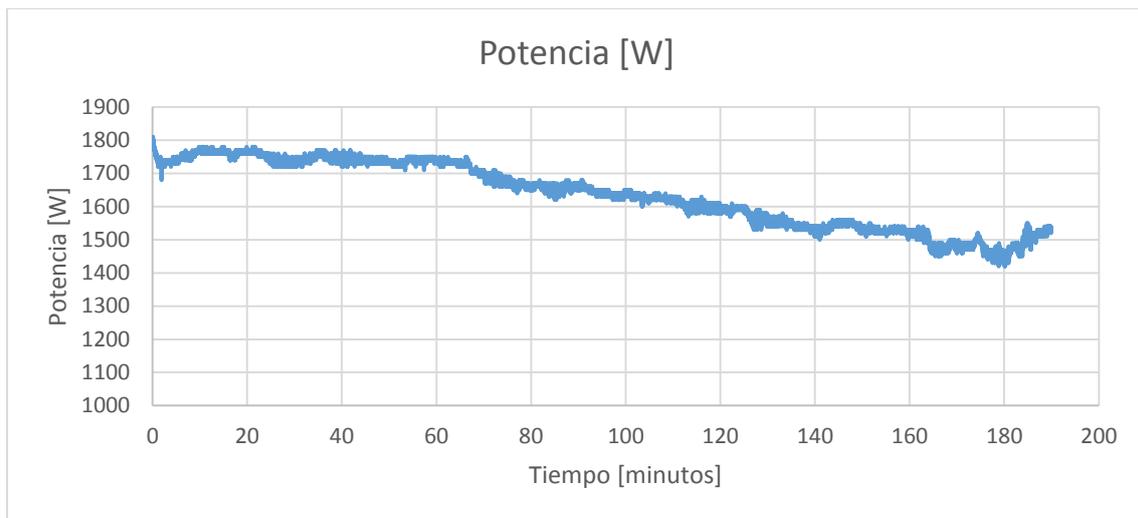


Figura 3. 23 Potencia [W] entregada por el cargador de batería al sistema de almacenamiento en un ciclo de carga

Energía Entregada al Sistema de Almacenamiento en Ah:

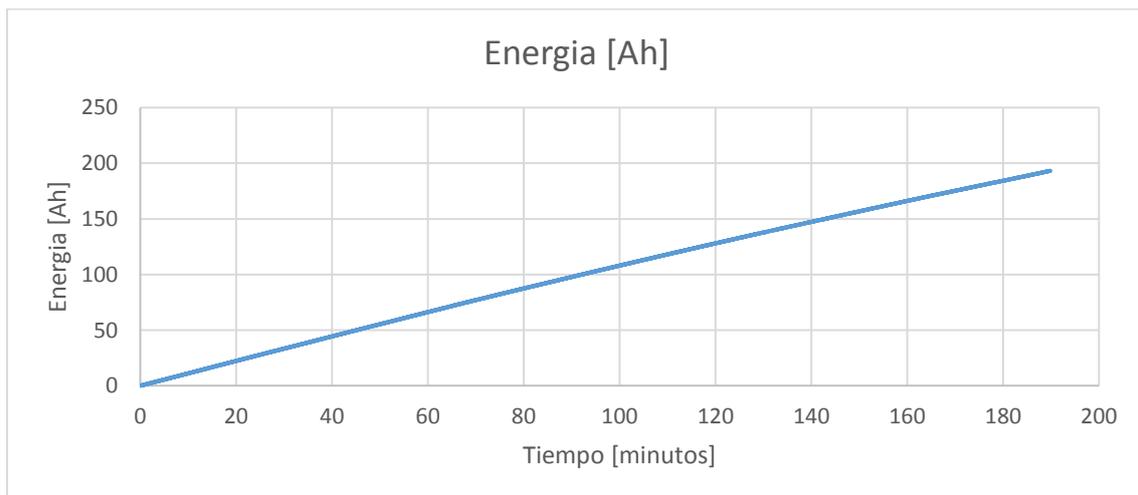


Figura 3. 24 Energía [Ah] entregada por el cargador de batería al sistema de almacenamiento en un ciclo de carga

Energía Entregada al Sistema de Almacenamiento en Wh:

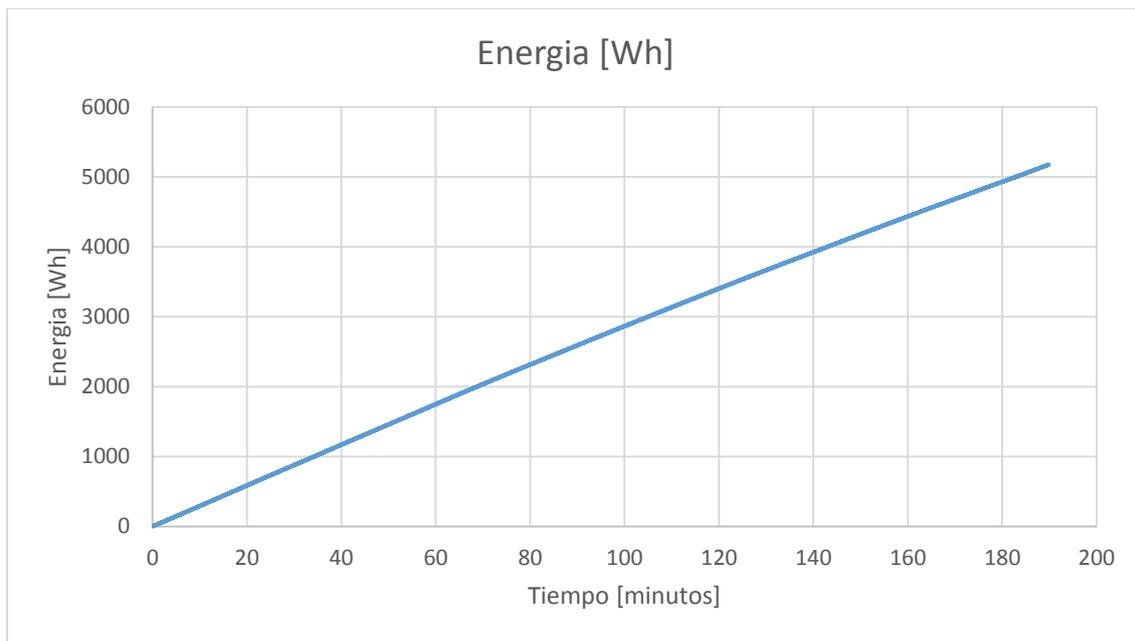


Figura 3. 25 Energía [Wh] entregada por el cargador de batería al sistema de almacenamiento en un ciclo de carga

En la Tabla 3. 6 y Tabla 3. 7 se muestra el resumen con los datos más importantes de la medición con el equipo HIOKI.

	Inicial	Final (190 minutos)
Voltaje [V]	25,52	27,51
Corriente [A]	70,72	55,64
Potencia [W]	1800	1530

Tabla 3. 6 Voltaje, corriente y potencia consumida por el sistema de almacenamiento en un ciclo de carga

Energía Entregada al Sistema de Almacenamiento (190 minutos)	193,28	Ah
	5177,1	Wh

Tabla 3. 7 Energía consumida por el sistema de almacenamiento en un ciclo de carga

3.2.4 Medición de Descarga utilizando el equipo: Medidor de Energía HIOKI PW3337

En esta parte se debe verificar la energía que puede entregar el banco de baterías en un ciclo de descarga completo utilizando el montacargas. En este apartado, se utilizó el montacargas en un recorrido aleatorio en las instalaciones del Laboratorio de micro red de la Universidad de Cuenca con la finalidad de determinar la autonomía del mismo. Para

esto se utilizó el equipo HIOKI PW3337 configurándolo que tome mediciones cada 500ms del voltaje, corriente, potencia y energía que brinda el banco de baterías al utilizar el montacargas dándonos los siguientes resultados.

En la Figura 3. 26, Figura 3. 27, y Figura 3. 28 podemos observar el voltaje, corriente y potencia respectivamente del sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga:

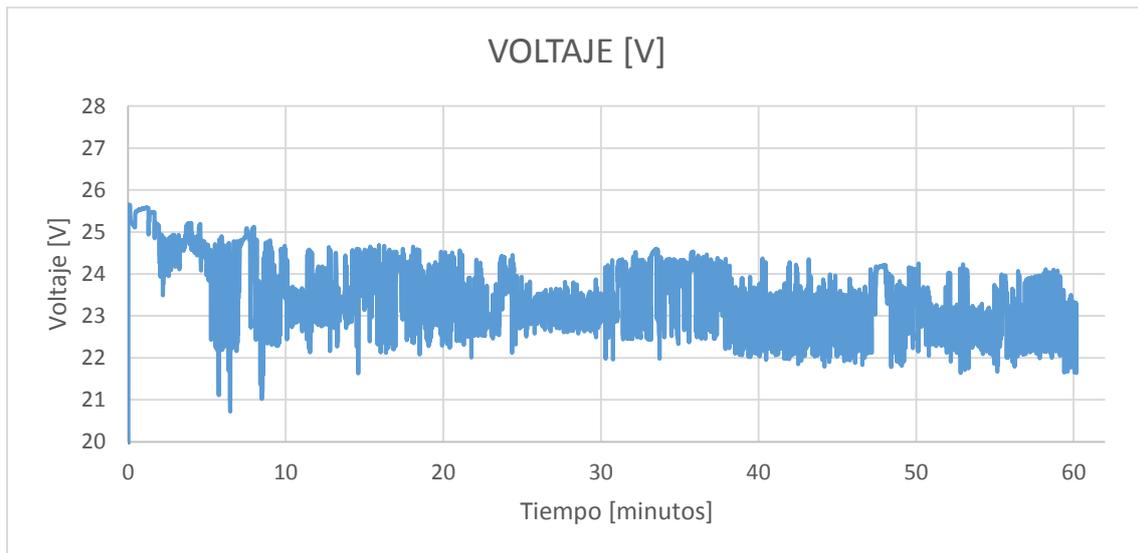


Figura 3. 26 Voltaje instantáneo del sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga

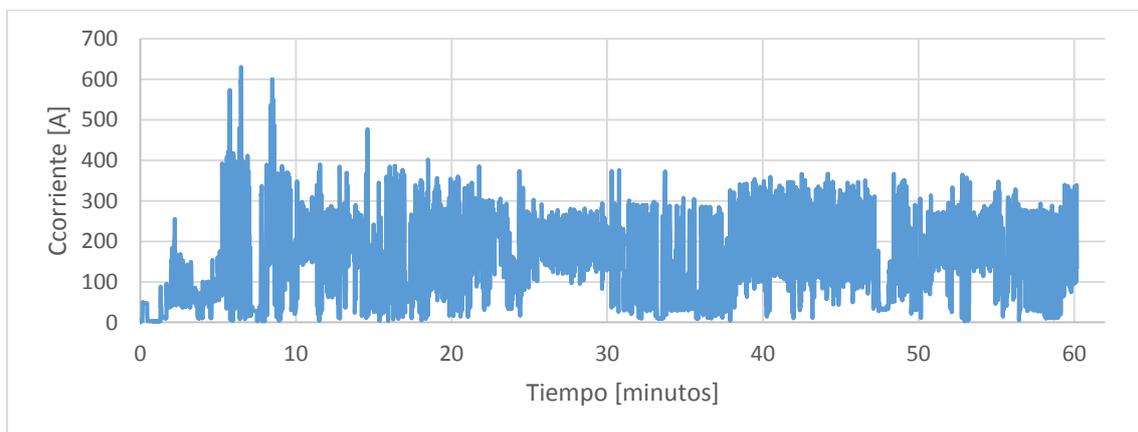


Figura 3. 27 Corriente instantánea del sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga

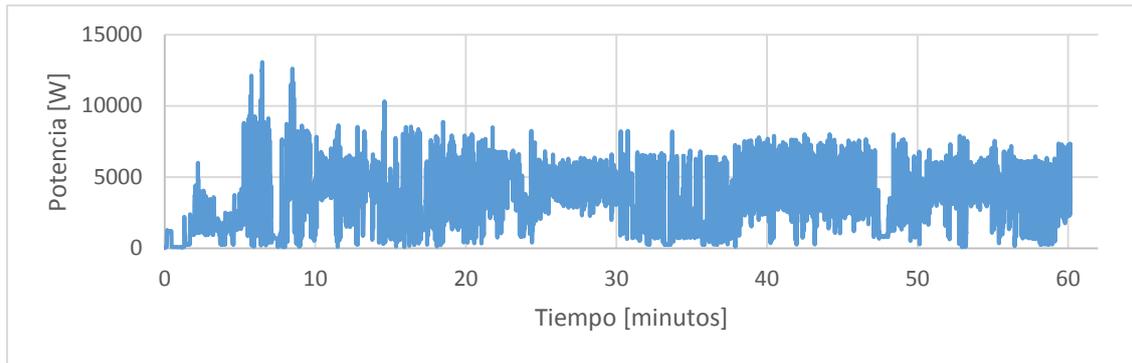


Figura 3. 28 Potencia instantánea [W] en un ciclo de descarga

En la Figura 3. 29 y Figura 3. 30 se presenta la energía desarrollada por el sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga:

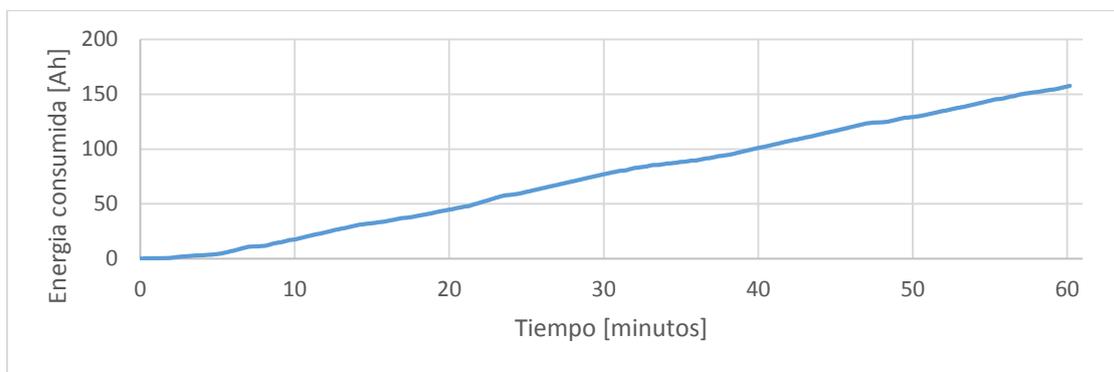


Figura 3. 29 Energía entregada por el sistema de almacenamiento [Ah] en un ciclo de descarga

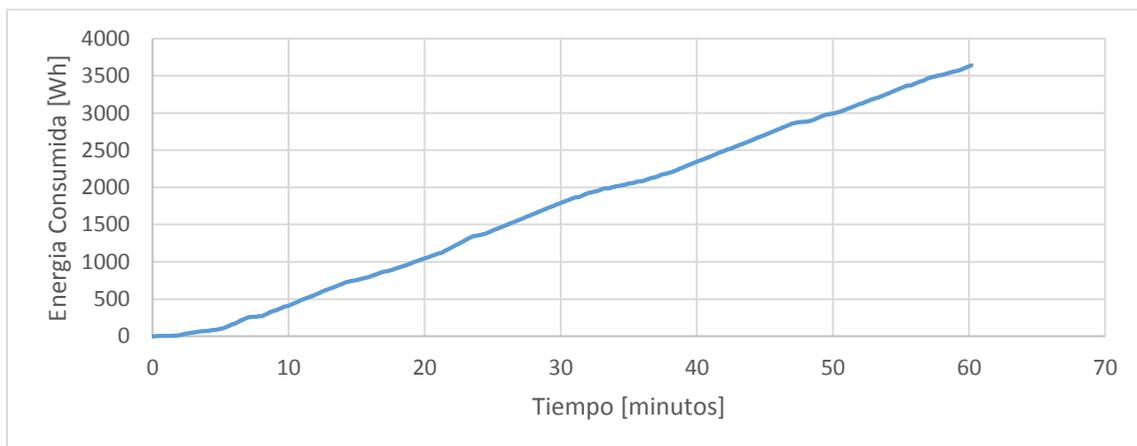


Figura 3. 30 Energía entregada por el sistema de almacenamiento [Wh] en un ciclo de descarga

En la Tabla 3. 8 se muestran el resumen de las mediciones realizadas de voltaje, corriente y potencia medida por el HIOKI que puede desarrollar el sistema de almacenamiento y en la Tabla 3. 9 se muestra la energía que en un ciclo de descarga la batería brindó.

	Máxima	Mínima
Voltaje [V]	25,65	20,72
Corriente [A]	630,54	2,54
Potencia [W]	13070	60

Tabla 3. 8 Voltaje, corriente y potencia medida en el sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga

Energía Desarrollada por el montacargas en un ciclo de descarga (61 minutos)	158,44	Ah
	3640,4	Wh

Tabla 3. 9 Energía desarrollada por el sistema de almacenamiento en un ciclo de descarga

De esta manera conociendo la energía que se consume o brinda cada proceso de carga se puede verificar la eficiencia del cargador de batería, así como la cantidad de carga que puede brindar la batería, su eficiencia.

Con el siguiente esquema mostrado en la Figura 3. 31 podemos verificar los datos obtenidos en el proceso:

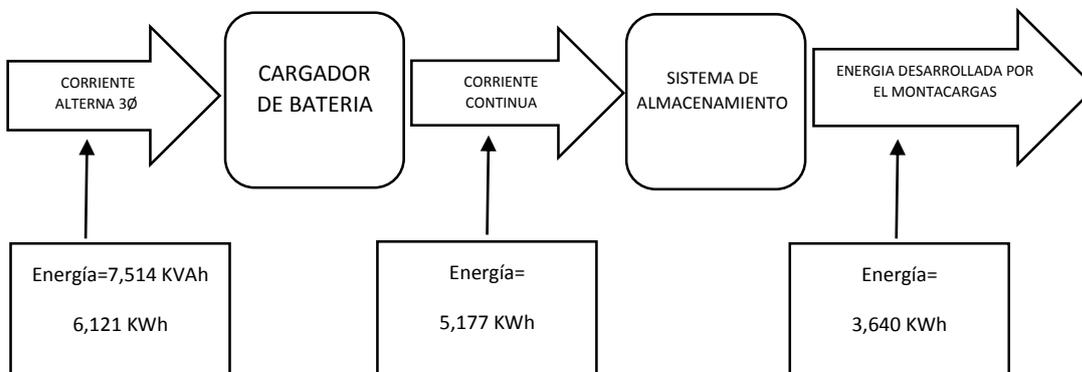


Figura 3. 31 Esquema para la medición de energía del cargador del montacargas

Rendimiento del Cargador de Batería:

$$\eta = \frac{Energía_{salida}}{Energía_{Entrada}} * 100\% = \frac{5,177}{6,121} = 84,577\%$$

Eficiencia energética de la batería:

$$Eficiencia = \frac{Energía_{salida}}{Energía_{Entrada}} * 100\% = \frac{3,640}{5,177} = 70,31\%$$

3.3 Toma de mediciones del sistema eléctrico, inversor motor de bombeo hidráulico

3.3.1 Descripción de los movimientos realizados para la toma de mediciones

De igual manera que se realizó en el apartado 3.1.1 a continuación se describirá los movimientos de las partes del montacargas a los que se referirán en los apartados siguientes. De esta manera tenemos:

Movimiento 1 (mov 1): movimiento cuchilla en forma vertical (arriba-abajo).

Movimiento 2 (mov 2): movimiento mástil adelante – atrás.

Movimiento 3 (mov 3): movimiento cuchilla en forma horizontal (izquierda –derecha).

3.3.2 Mediciones sin carga

Se realizó la toma de oscilogramas a la salida del inversor del motor hidráulico con el montacargas en vacío, es decir sin peso alguno. Para todos los siguientes oscilogramas el canal 1 muestra la corriente de salida, mientras que en el canal 2 se muestra el voltaje que entrega el inversor al motor de bombeo.

La Figura 3. 32 describe la forma de onda tanto de voltaje como de corriente a la salida del inversor que utiliza el motor de bombeo.

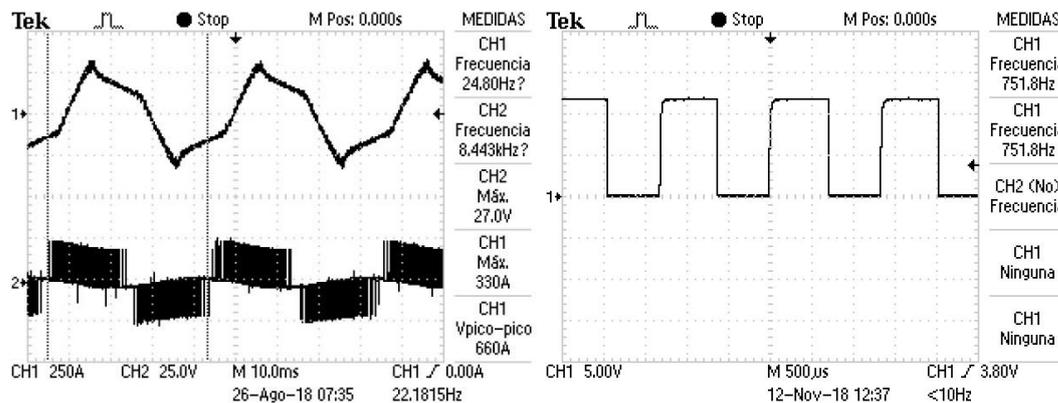


Figura 3. 32 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, Standby

En la parte derecha de la Figura 3. 32 se puede apreciar el oscilograma que corresponde a los pulsos del encoder que posee el motor acoplado a su eje para que el inversor pueda controlar la velocidad.

La Figura 3. 33, Figura 3. 34 y Figura 3. 35 proporcionan la forma de onda tanto de voltaje como de corriente, a la salida del inversor que utiliza el motor de bombeo para

distintas velocidades del movimiento 1. El canal uno muestra la corriente absorbida a la salida del inversor, podemos observar que dicha corriente cambia dependiendo de la velocidad a la cual se produce el movimiento. El canal 2 nos muestra el voltaje que entrega el banco de baterías en el instante de funcionamiento. De igual manera posee a la derecha el oscilograma de los pulsos que marca el encoder.

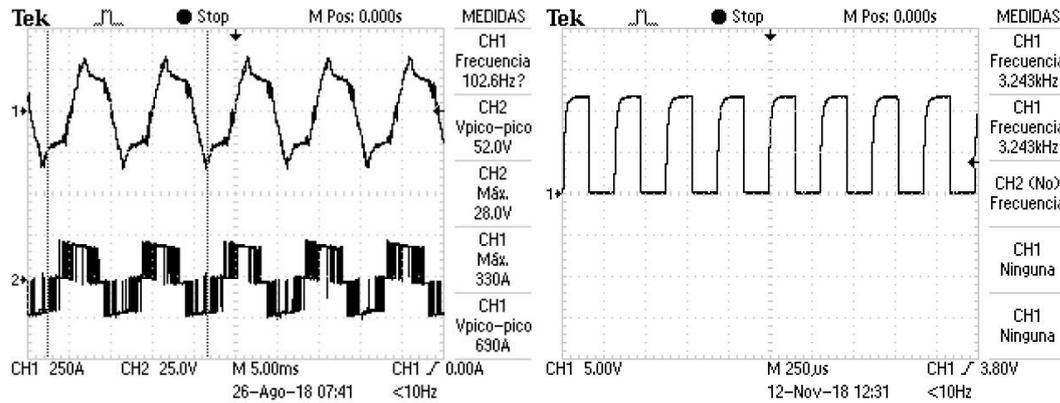


Figura 3. 33 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 velocidad máxima

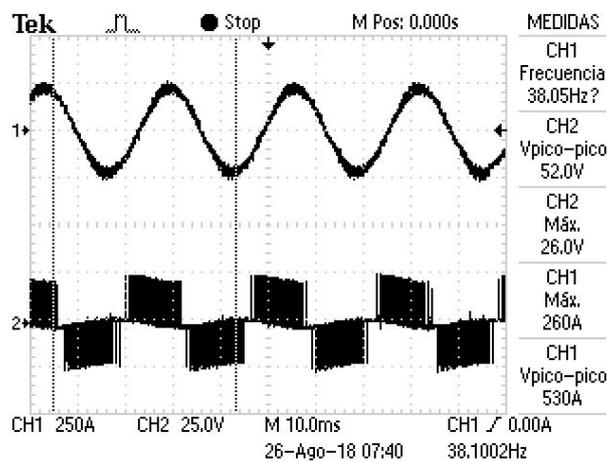


Figura 3. 34 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 velocidad media

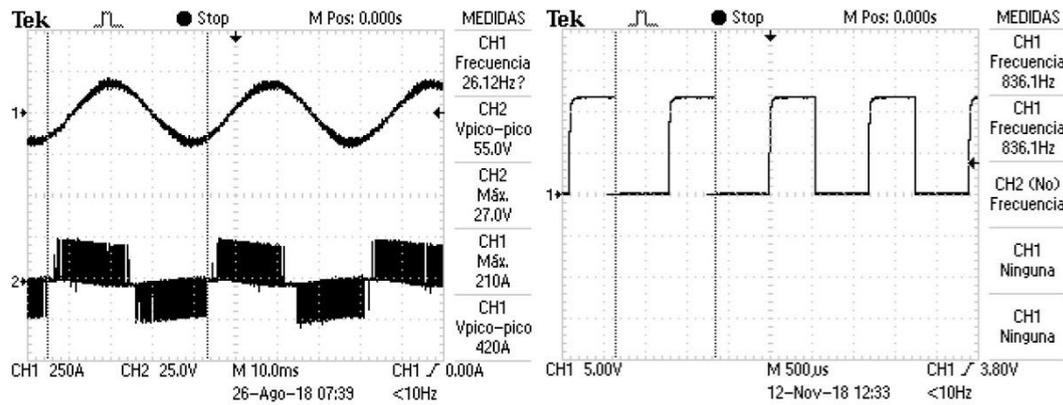


Figura 3. 35 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 lento

La Figura 3. 36 y Figura 3. 37 proporcionan la forma de a la salida del inversor que utiliza el motor de bombeo para el movimiento 2 y 3 respectivamente. En el canal uno podemos observar que la corriente se mantiene constante para los dos movimientos. El canal 2 nos muestra el voltaje que entrega el banco de baterías en el instante de funcionamiento, con una variación de 2 voltios dependiendo del movimiento.

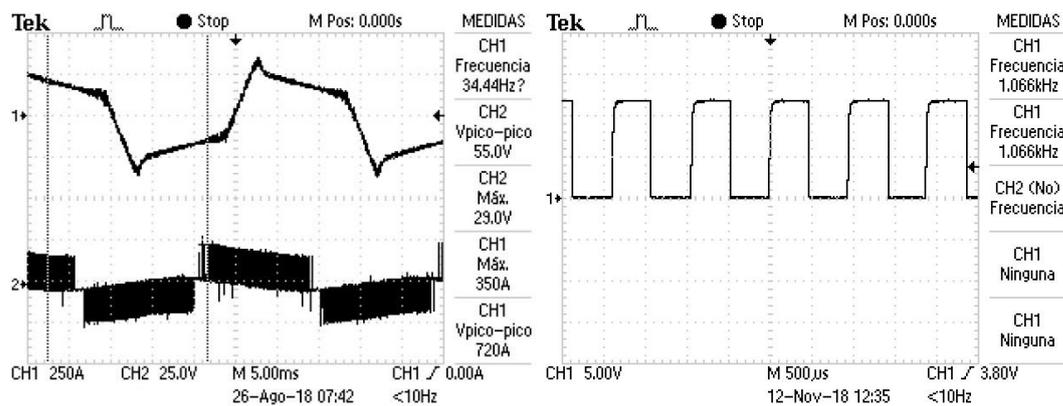


Figura 3. 36 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 2

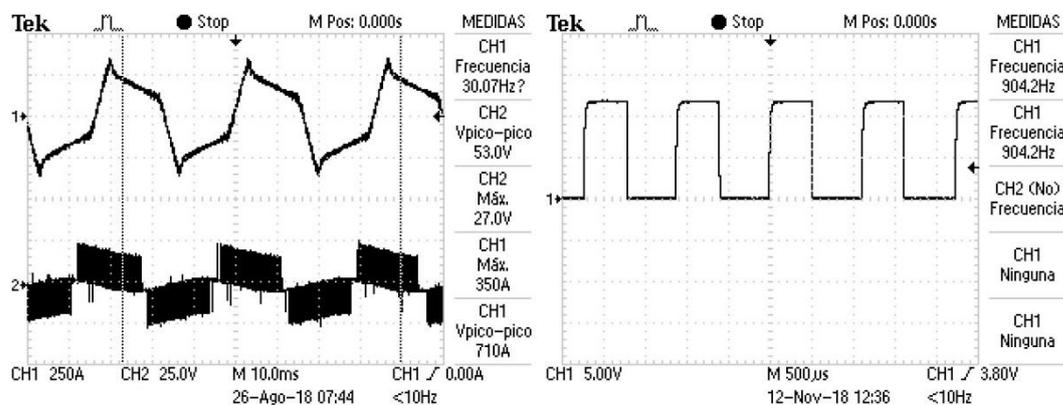


Figura 3. 37 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 3

A continuación, en la Tabla 3. 10 presentamos un resumen de cada una de las mediciones realizadas de acuerdo a cada movimiento:



Toma de mediciones del sistema inversor motor de bombeo hidráulico						
Mediciones en Vacío						
Estado						
	Standby	MOV 1			MOV 2	MOV 3
		Velocidad Máxima (0,42 m/s)	Velocidad media (0,17 m/s)	Lento (0,07 m/s)		
Voltaje (V)	27	28	26	27	29	27
Corriente (A)	330	330	260	210	350	350
Frecuencia (Hz)	24.80	102.6	38.05	26.12	34.44	30.07

Tabla 3. 10 Mediciones del sistema inversor motor de bombeo hidráulico

A continuación, se presenta en la Tabla 3. 11 la comparación de la frecuencia que posee la corriente y los pulsos medidos en el encoder.

MEDIDOS	TEORICA	TEORICA	MEDIDOS	CALCULADA	Error
Oscilogramas Corriente Inversor (Hz)	Frecuencia teórica encoder (64 pulsos) [KHz]	r.p.m.	Oscilogramas Encoder (kHz)	r.p.m.	r.p.m. (suponiendo encoder de 64 pulsos)
29,24	0,89	839,77	0,92	866,06	26,28
33,56	1,02	963,84	1,04	979,68	15,84
40,76	1,24	1170,62	1,29	1213,12	42,49
60,79	1,86	1745,88	1,94	1824,37	78,48
64,24	1,96	1844,97	1,92	1800	44,97
68,26	2,091	1960,42	2,07	1941,56	18,86
68,89	2,11	1978,52	2,18	2046,56	68,04
69,01	2,11	1981,96	2,16	2025	43,03
71,68	2,19	2058,64	2,31	2166,56	107,91
72,99	2,23	2096,27	2,33	2188,12	91,85
83,57	2,56	2400,13	2,50	2348,43	51,69
102,5	3,14	2943,8	3,20	3000,93	57,13
103,1	3,15	2961,03	3,24	3040,31	79,28

Tabla 3. 11 Comparación de la frecuencia que posee la corriente y los pulsos medidos en el encoder.

3.3.3 Mediciones con carga aproximadamente 1 Ton.

Se realizó la toma de oscilogramas a la salida del inversor del motor hidráulico con una carga aproximada de 1 Ton. Al igual que en los apartados anteriores, el canal 1 muestra la corriente absorbida cuando el vehículo está en standby, el canal 2 el voltaje a la salida del inversor.

La Figura 3. 38 describe la forma de onda tanto de voltaje como de corriente, a la salida del inversor que utiliza el motor de bombeo.

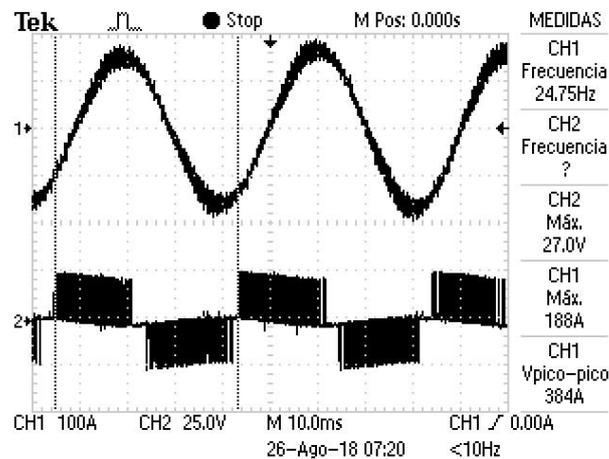


Figura 3. 38 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, Standby

La Figura 3. 39, Figura 3. 40 y Figura 3. 41 proporcionan la forma de onda tanto de voltaje como de corriente, a la salida del inversor que utiliza el motor de bombeo para distintas velocidades del movimiento 1 y con una carga aproximada de 1 ton.

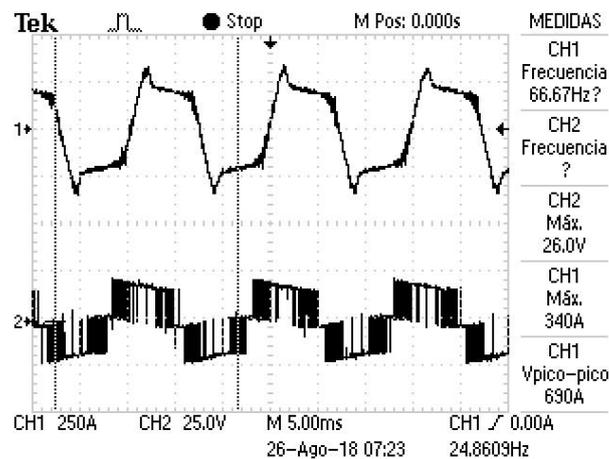


Figura 3. 39 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, Movimiento 1 velocidad máxima

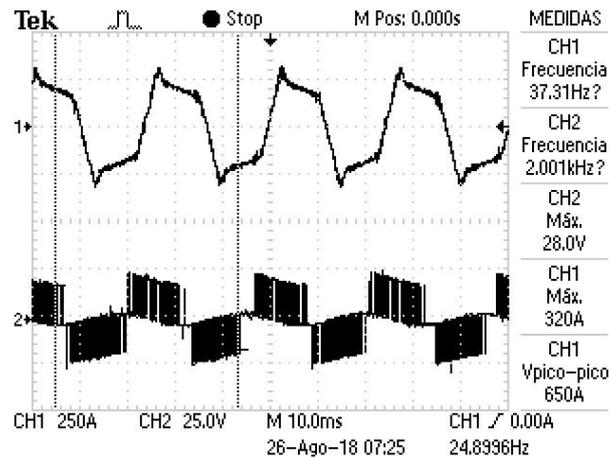


Figura 3. 40 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, velocidad media

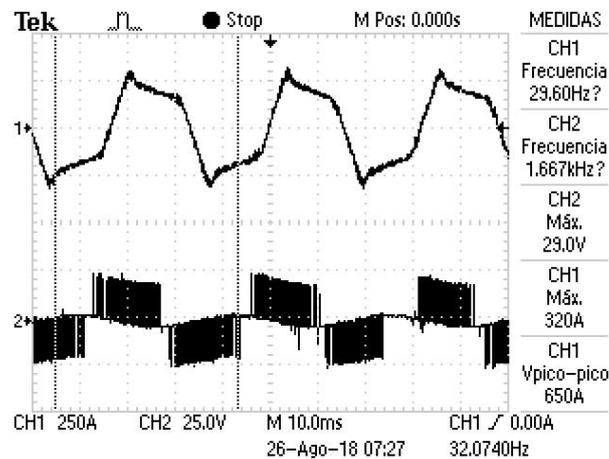


Figura 3. 41 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 1 lento

La Figura 3. 42 y Figura 3. 43 proporcionan la forma de onda tanto de voltaje como de corriente, a la salida del inversor que utiliza el motor de bombeo para el movimiento 2 y 3 respectivamente con una carga aproximada de 1 ton.

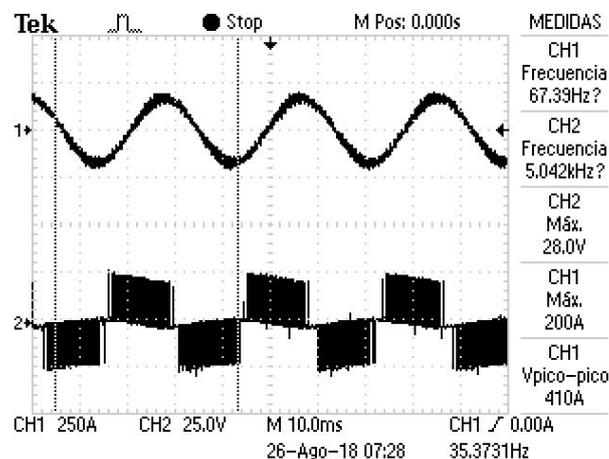


Figura 3. 42 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 2

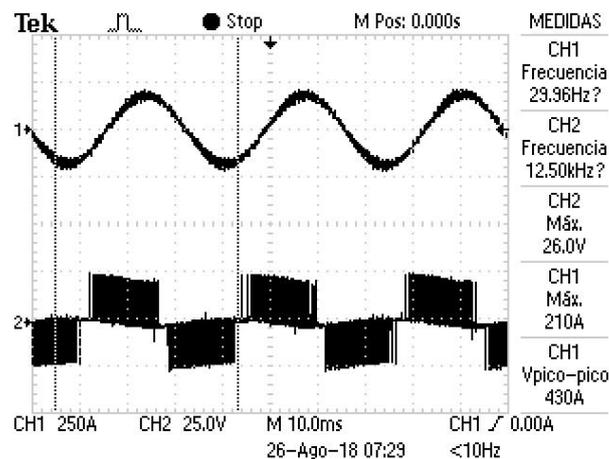


Figura 3. 43 Corriente y voltaje del inversor del motor hidráulico, movimiento 3

En la Tabla 3. 12 se presenta un resumen de las mediciones a la salida del inversor para el motor hidráulico con los distintos movimientos que posee el vehículo.

Toma de mediciones del sistema inversor motor de bombeo hidráulico						
Mediciones con carga aproximadamente 1 Ton.						
Estado						
	Standby	MOV 1			MOV 2	MOV 3
		Velocidad máxima (0,28m/s)	Velocidad media (0,15m/s)	Lento (0,12m/s)		
Voltaje (V)	27	26	28	29	28	26
Corriente (A)	188	340	320	320	200	210
Frecuencia (Hz)	24.75	66.67	37.31	29.60	67.39	29.96

Tabla 3. 12 Mediciones del sistema inversor motor de bombeo hidráulico

3.4 Toma de mediciones del sistema eléctrico, inversor motor de tracción

3.4.1 Toma de mediciones encoder, inversor motor de tracción

3.4.2 Mediciones sin carga

Se realizó la toma de oscilogramas a la salida del inversor del motor de tracción con el montacargas en vacío, es decir sin peso alguno. Con lo cual se consiguió los siguientes resultados que se muestran a continuación.

La Figura 3. 44, Figura 3. 45, Figura 3. 46 y Figura 3. 47 muestran los oscilogramas de la salida del inversor de tracción, para los movimientos y velocidades del vehículo; así como también, del encoder incremental de 64 pulsos acoplado al eje del motor para el control de velocidad. En cada una de las gráficas al lado izquierdo se encuentran los pulsos del encoder el cual se puede observar que varía su frecuencia dependiendo la velocidad del motor.

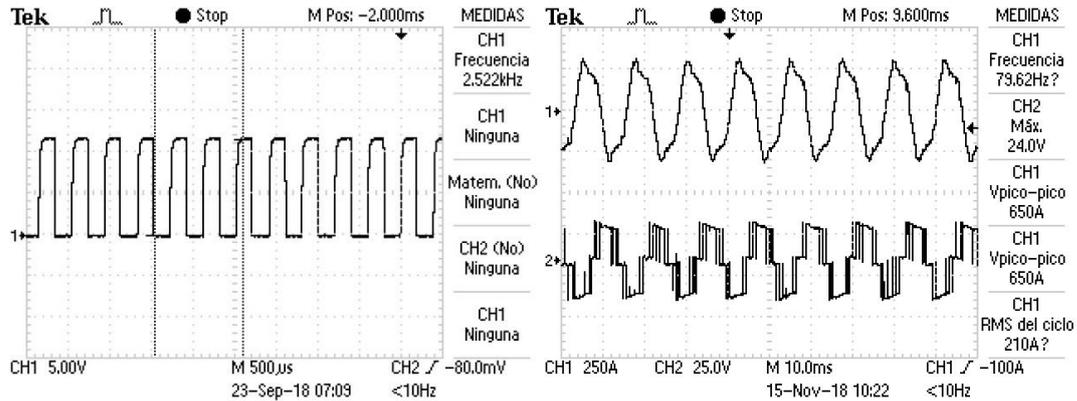


Figura 3. 44 Desplazamiento hacia adelante rápido, 8.7 km/h

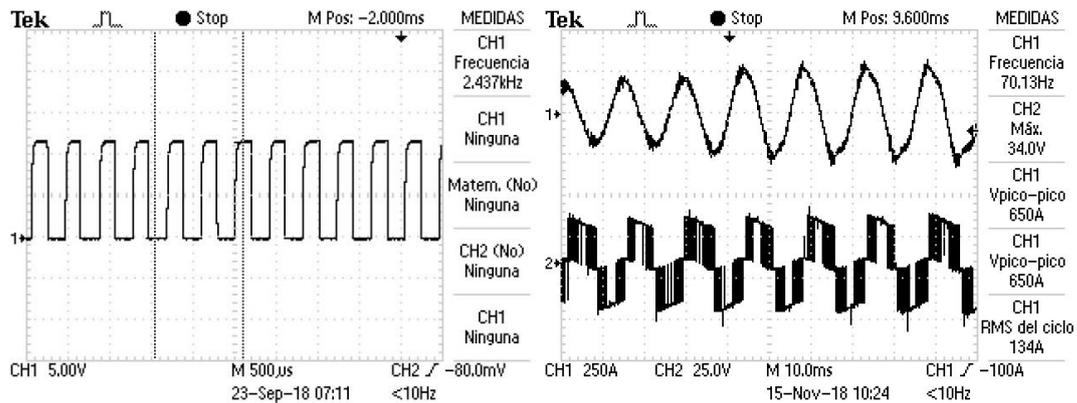


Figura 3. 45 Desplazamiento hacia atrás, 8.4 km/h

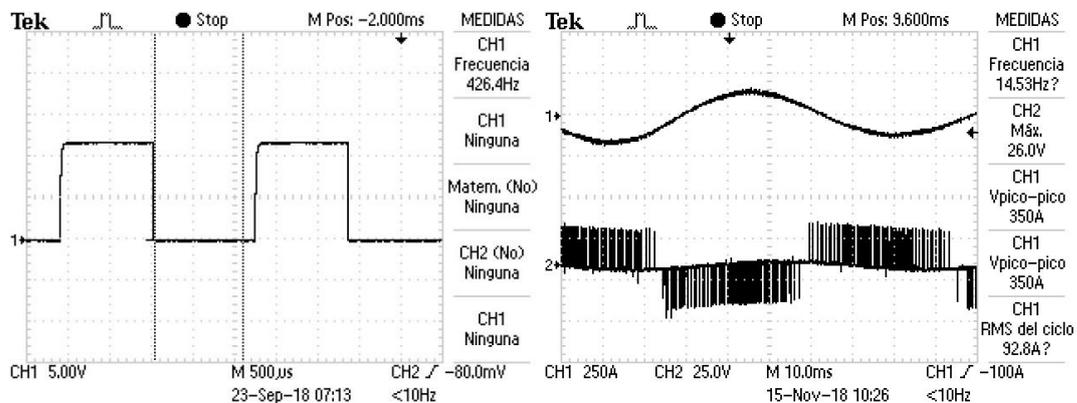


Figura 3. 46 Desplazamiento hacia adelante, 1.4 km/h

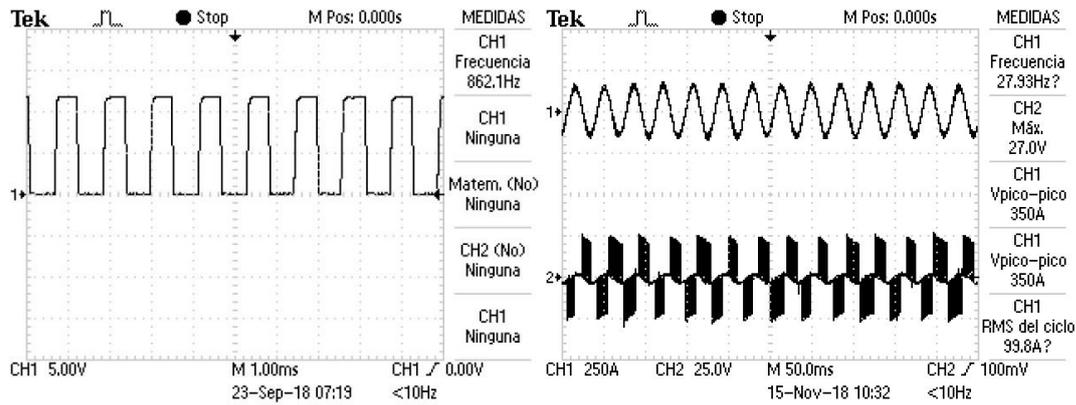


Figura 3. 47 Desplazamiento hacia adelante, 3.1 km/h

A continuación en la Tabla 3. 13, presentamos un resumen de cada una de las mediciones realizadas de acuerdo a cada movimiento o desplazamiento:

Movimiento	VACIO			Velocidad teórica tomando en cuenta frecuencia de la corriente [rpm]	Velocidad 64 pulsos/rev la frecuencia medida en el encoder [rpm]	ERROR (rpm)
	CORRIENTE		Encoder			
	VALOR pico [A]	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [KHz]			
Adelante= 8,7 Km/h	325	79,62	2,52	2285,70	2364,34	78,67
Adelante=3,1 Km/h	175	27,93	0,87	801,81	808,22	6,41
Adelante =1,4 Km/h	170	14,53	0,42	417,12	399,75	17,38
Atrás= 8,4 Km/h	325	70,1	2,43	2012,41	2284,69	272,28

Tabla 3. 13 Toma de mediciones encoder, inversor motor de tracción en vacío

3.4.3 Mediciones con carga aproximadamente 1 Ton.

Se realizó la toma de oscilogramas a la salida del inversor del motor de tracción con una carga aproximada de 1 Ton. Para las gráficas siguientes el Canal 1 se refiere a la corriente y el Canal 2 al voltaje.

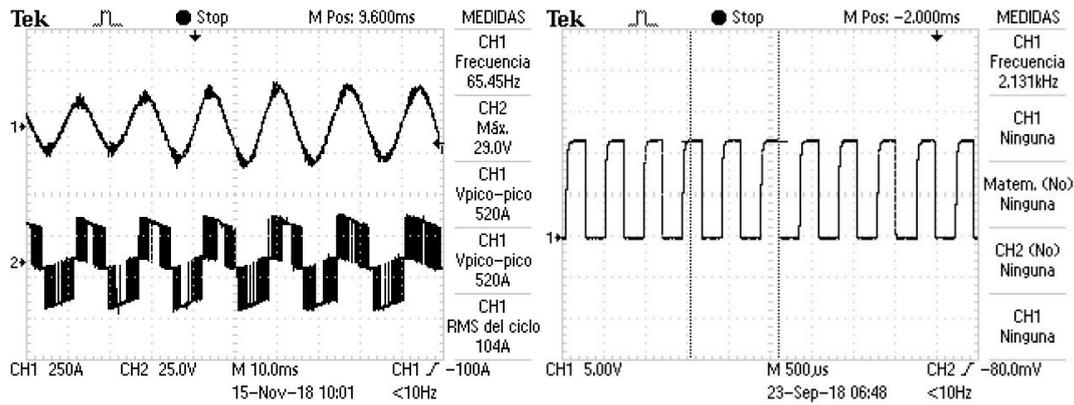


Figura 3. 48 Desplazamiento hacia adelante, rápido, 8 km/h

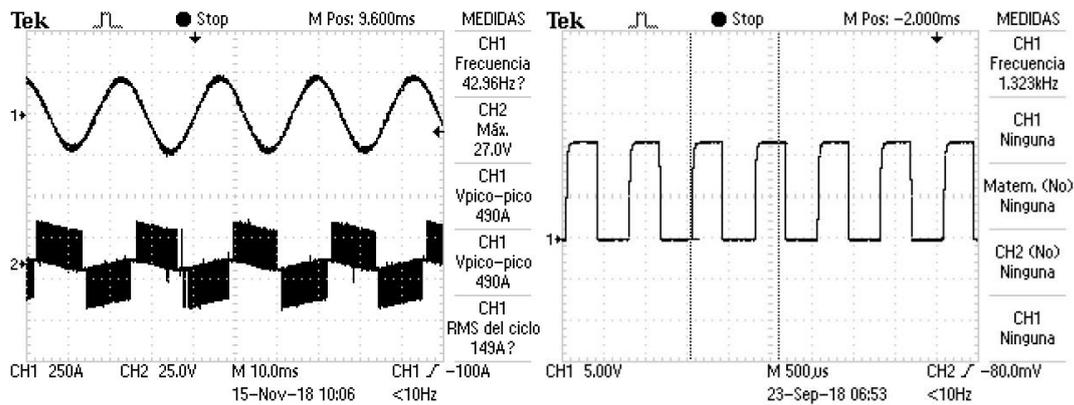


Figura 3. 49 Desplazamiento hacia adelante, 4.7 km/h

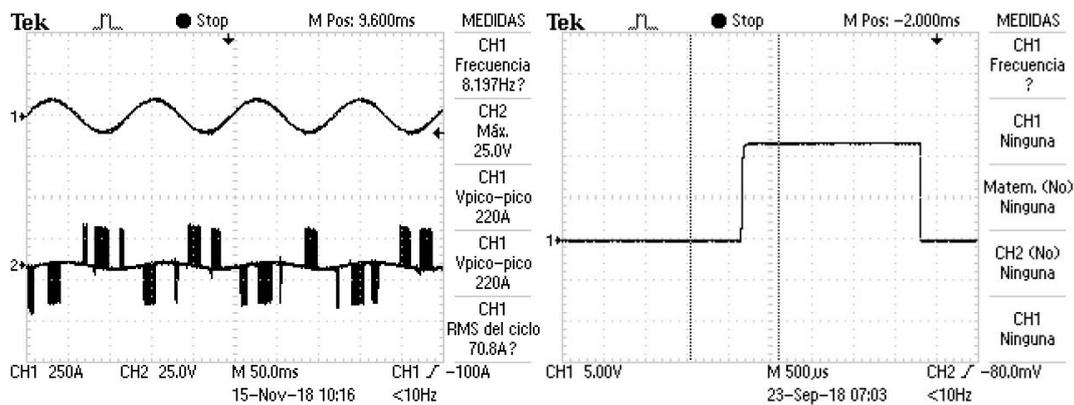


Figura 3. 50 Desplazamiento hacia adelante, 0.8 km/h

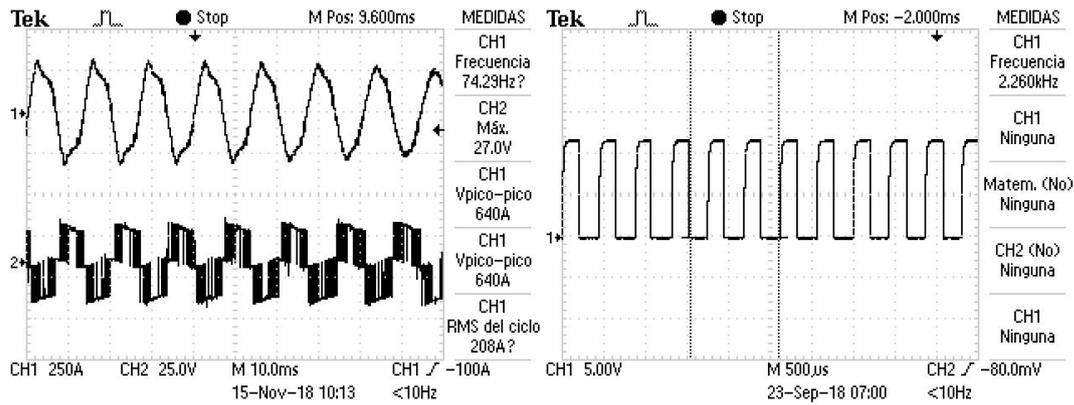


Figura 3. 51 Desplazamiento hacia adelante, 0.8 km/h

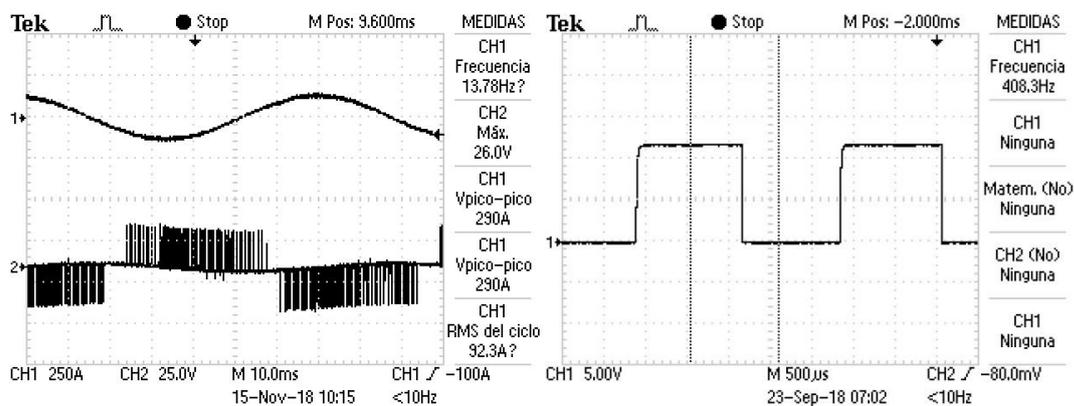


Figura 3. 52 Desplazamiento hacia atrás, 1.4 km/h

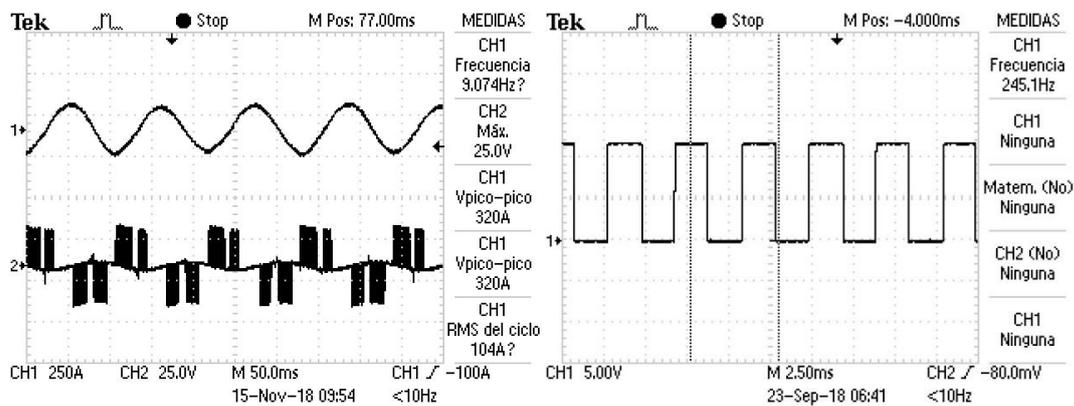


Figura 3. 53 Desplazamiento hacia atrás, velocidad lenta, 0.8 km/h

A continuación en la Tabla 3. 14, presentamos un resumen de cada una de las mediciones realizadas de acuerdo a cada movimiento o desplazamiento:

Movimiento	CON CARGA = 1TON			Velocidad teórica tomando en cuenta frecuencia de la corriente [rpm]	Velocidad suponiendo 64 pulsos/rev la frecuencia medida en el encoder [rpm]	ERROR (rpm)
	CORRIENTE		Encoder			
	VALOR Pico [A]	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [KHz]			
Atrás = 0,8 Km/h	160	9,07	0,24	260,5	229,79	30,71
Atrás=1,4 Km/h	145	13,78	0,4	395,6	382,79	12,81
Atrás= 4 Km/h	355	36,5	1,02	1047,83	960	87,83
Atrás=8 Km/h	320	74,29	2,26	2132,7	2118,75	13,95
Adelante = 3,1 Km/h	205	27,12	0,83	778,6	780,19	1,63
Adelante = 4,7 Km/h	245	42,96	1,32	1233,29	1240,31	7,03
Adelante = 8 Km/h	260	65,45	2,13	1878,92	1997,81	118,9
Adelante=8,1 Km/h	320	78,37	2,3	2249,82	2150,62	99,2

Tabla 3. 14 Toma de mediciones encoder, inversor motor de tracción, con carga

3.5 Proceso de Ecuación de la batería del montacargas

Se sabe que el proceso de ecualización de una batería de plomo ácido ayuda a mejorar el tiempo de vida y la capacidad de carga de la batería. Así, se procedió a realizar el proceso de ecualización en el cual la batería al ser de 24 voltios debe darse un sobre voltaje cercano a 30 voltios, controlando la corriente y la temperatura del sistema de almacenamiento, lo cual se cargó la batería aproximadamente durante 7 horas. A continuación, en la Figura 3. 54, Figura 3. 55 y Figura 3. 56 se muestran los resultados de la medición del voltaje, corriente y potencia respectivamente en una carga a lo largo de 7 horas.

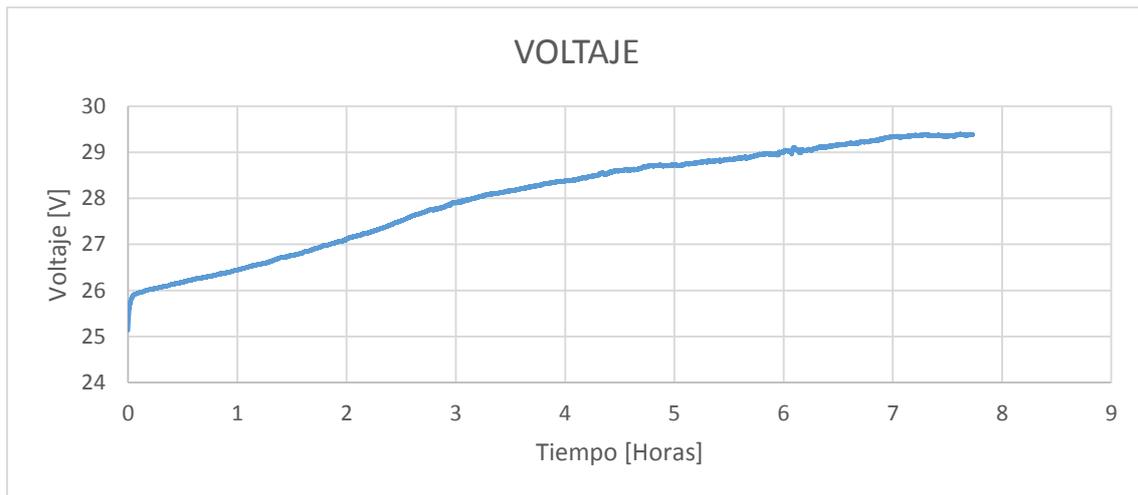


Figura 3. 54 Voltaje en el proceso de ecualización

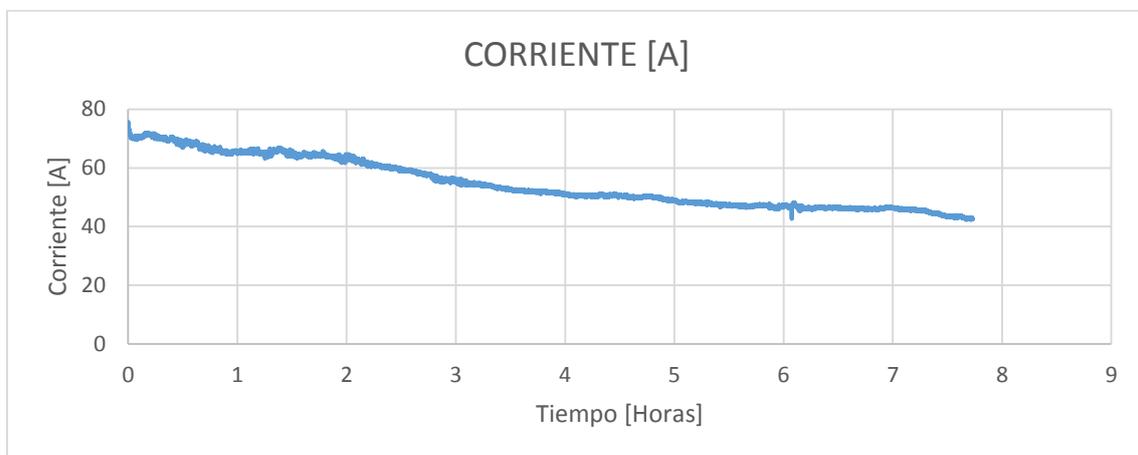


Figura 3. 55 Corriente en el proceso de ecualización

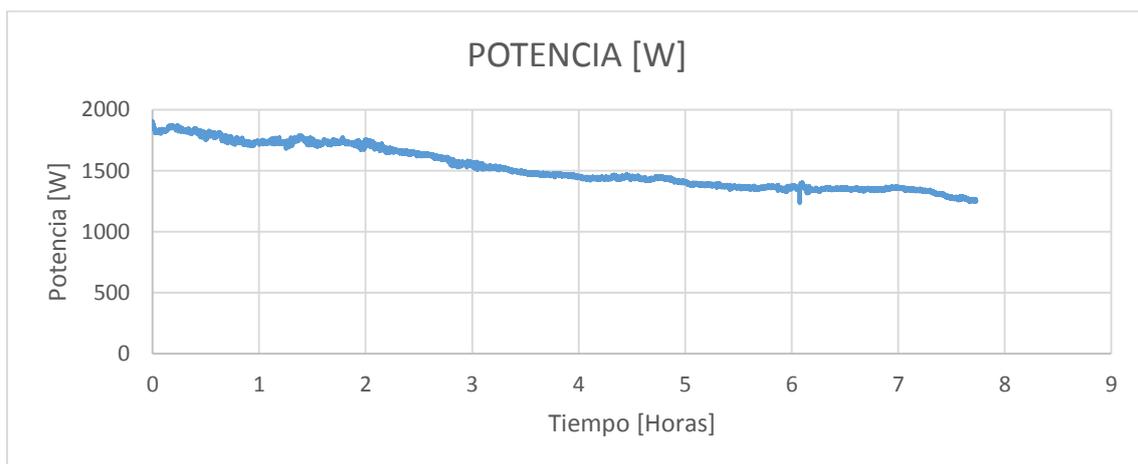


Figura 3. 56 Potencia [W] en el proceso de ecualización

En la Figura 3. 57 y Figura 3. 58 se muestra la energía absorbida tanto en Ah (Amperios hora) y Wh (Vatios hora) respectivamente por el sistema de almacenamiento en el proceso de ecualización.

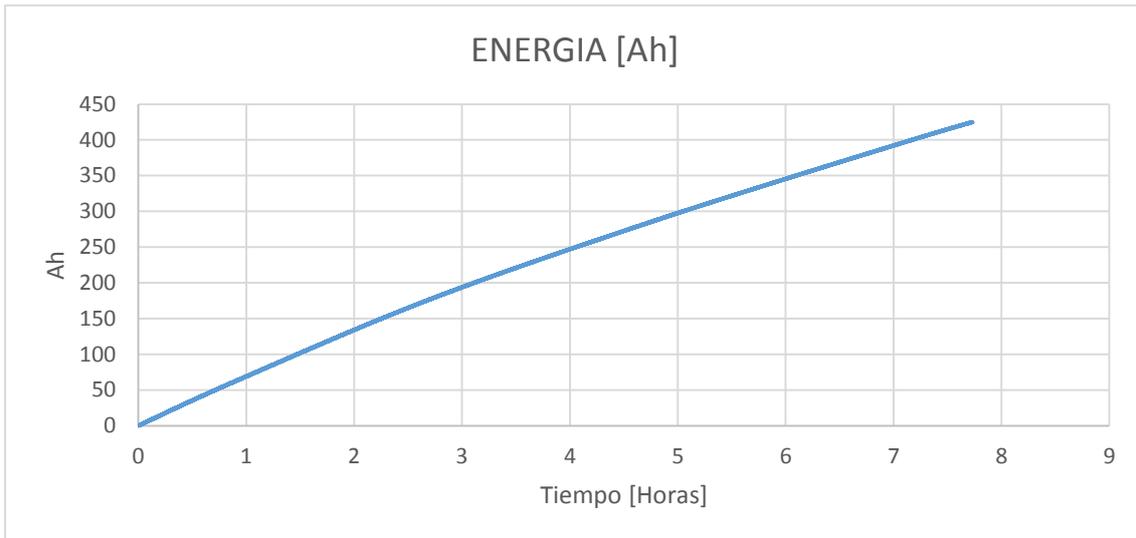


Figura 3. 57 Energía entregada [Wh] en el proceso de ecualización



Figura 3. 58 Energía entregada [Wh] en el proceso de ecualización

La Tabla 3. 15 muestra un resumen de las mediciones tomadas por el equipo HIOKI en el proceso de ecualización:

	Inicial	Final
Voltaje [V]	25,13	29,38
Corriente [A]	75,59	42,79
Potencia [W]	1900	1257
Energía Entregada al Sistema de Almacenamiento	424,94	Ah
	11771	Wh

Tabla 3. 15 Datos de medida en el proceso de ecualización

Además, se midió el voltaje de flotación, el cual luego de desconectar el cargador nos da el valor del auto descarga dándonos el siguiente resultado mostrado en la Figura 3. 59:

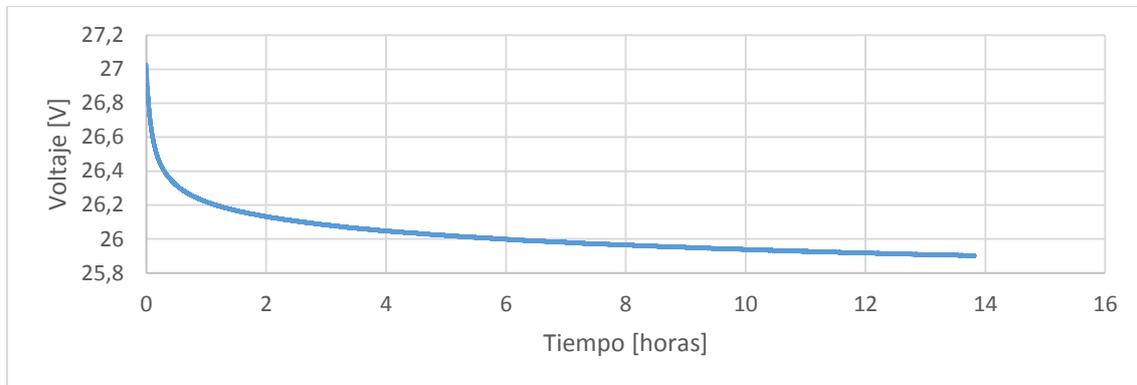


Figura 3. 59 Voltaje de Flotación

Mientras que en la Tabla 3. 16 se muestran los valores del voltaje pico y el valor del voltaje luego del auto descarga.

	Inicial	Final
Voltaje [V]	27,02	25,90

Tabla 3. 16 Voltaje de inicio y final en el proceso de ecualización

3.6 Degradación de las baterías de plomo ácido

Predecir la vida útil de las baterías de plomo-ácido en sistemas de energía o sistemas de alimentación autónomos son muy difíciles, debido a que el régimen de ciclos es muy irregular, con cargas completas. La carga y la descarga se interponen entre sí con frecuencia, y una amplia gama de corrientes de carga y descarga ocurren durante el proceso. Una batería ha llegado al final de su vida útil si el rendimiento de los Ah es equivalente a los Ah del rendimiento alcanzable con el ciclo regular (ciclo de vida). [24]

El sulfato de plomo ($PbSO_4$) se crea durante la descarga en ambos electrodos el positivo y el negativo. Durante la carga los cristales se vuelven a convertir en el material activo respectivo. Los cristales que no pueden eliminarse durante la carga estándar no pueden contribuir más a la capacidad de la batería. Este efecto se llama sulfatación. [24]

3.6.1 Impacto del estado de carga

La degradación aumenta al disminuir el estado de carga de la batería (SoC). Cuanto menor sea el SoC o se dé la más baja, desde la última carga completa y cuanto más tiempo permanezca la batería en un SoC bajo, mayor será el impacto en la vida útil de la batería.



Existe una pérdida de capacidad que, por un lado, surge del estrés mecánico en las masas activas debido a la profundidad de descarga (DoD) y, por otro lado, del aumento en el tamaño de los cristales de sulfato. [24]



CAPÍTULO 4

MODELAMIENTO DEL VEHÍCULO INDUSTRIAL

En el presente capítulo se analiza los resultados encontrados con las tomas de mediciones experimentales del montacargas. De esta forma se procede a realizar el modelamiento de los principales elementos que posee el vehículo como son el sistema de almacenamiento de energía, así como también de los inversores y motores de tracción e hidráulicos del montacargas, el estado que se encuentran y las características de funcionamiento. Para la modelación del sistema eléctrico de potencia se recurre al programa Simulink y PSIM.

4.1 Sistema de Almacenamiento

4.1.1 Ley de Peukert

La ley de Peukert consiste en una relación entre el estado de carga de una batería y su ratio de descarga: a mayor ratio de descarga, menor capacidad de la batería. [25] La ecuación de Peukert es la siguiente:

$$Cp = I^k \cdot t \quad (4.1)$$

Siendo:

- Cp: Capacidad de la batería descargándola a 1 amperio (h)
- I: Corriente de descarga real (A).
- t: Tiempo de descarga real (h).
- k: Constante de Peukert (adimensional)

En el caso de la batería del montacargas en una descarga normal la corriente promedio es aproximada a los 155 A en un tiempo de 1 hora. De esta manera con la ecuación 4.1. nos da:

$$Cp = 155^{1,2} \cdot 1 = 425 Ah$$

La ecuación 4.1 se puede reformular considerando H el tiempo de descarga teórico de la batería:

$$t = H \left(\frac{C}{IH} \right)^k \quad (4.2)$$



Teóricamente si tenemos una batería con una capacidad de 750 Ah, si la descargamos a una intensidad de 150 A, tendremos una duración de 5h.

Sin embargo, si consideramos la Ley de Peukert el cálculo no es tan directo. Si suponemos que la batería tiene una constante de Peukert de 1,2 (una batería de plomo-ácido tiene una k entre 1,1 y 1,3) y la sometemos a una descarga de 600 A obtenemos:

$$t = 5 \left(\frac{750}{600 \cdot 5} \right)^{1,2} = 94,88 \text{ Ah}$$

Realizando el cálculo de la capacidad de la batería con la Ley de Peukert se puede observar que en la experimentación la batería del montacargas dura una hora aproximadamente. Esto se aparta gravemente de la capacidad teórica que nos provee el fabricante, por lo que la Ley de Peukert no se ajusta para la estimación de la capacidad teórica ni real para nuestra batería, algunas razones que pueden ser las causantes de la degradación de la batería se citan en el apartado 3.6 Degradación de las baterías de plomo ácido.

4.1.2 Modelo de Shepherd Mejorado

Para el modelamiento de la batería se utiliza el procedimiento que se describe en [26]. En el cual los autores desarrollan el modelo de una batería a partir del Modelo de Shepherd descrito en [25]. Shepherd desarrolló una ecuación para describir el comportamiento electroquímico de una batería directamente en términos de voltaje de terminal, voltaje de circuito abierto, resistencia interna, corriente de descarga y estado de carga. En el artículo desarrollado por Tremblay se utiliza un modelo similar pero no produce un bucle algebraico como en el de Shepherd.

De este modo la ecuación que describe la modelización de la batería es:

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} - R \cdot i + A \cdot e^{-B \cdot it}$$

Donde:

- E = Tensión sin carga (V)
- E0 = constante de voltaje de la batería (V)
- K = Voltaje de polarización (V)
- Q = Capacidad de la batería (Ah)
- i·t = Estado de carga instantáneo (Ah)



- A = Voltaje del inicio de la zona exponencial (V)
- B = Inverso de la constante de tiempo de la zona exponencial (Ah)⁻¹
- R = Resistencia interna (Ω)
- i = Intensidad instantánea (A)

Para calcular los parámetros del modelo se utiliza:

$$A = E_{max} - E_{exp}$$

Siendo E_{max} el voltaje cuando la batería está cargada al máximo y E_{exp} el voltaje del fin de la zona exponencial.

El valor del parámetro B ($3/Q$ equivale a la carga de la batería al final de la zona exponencial) se calcula mediante:

$$B = \frac{3}{Q_{exp}}$$

El voltaje de polarización K se deduce de la siguiente expresión:

$$K = \frac{(E_{max} - E_{nom} + A \cdot (e^{-B \cdot i \cdot Q_{nom}} - 1)) \cdot (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}}$$

La constante E_0 se deduce del voltaje cuando la batería está cargada al máximo, E_{max} .

$$E_0 = E_{max} + K + R \cdot i - A$$

Así, por los experimentos realizados en el laboratorio y utilizando las ecuaciones anteriores se tiene que los parámetros para una corriente de descarga $i = 61$ [A] son los mostrados en la Tabla 4. 1 :

Modelo de Shepherd Mejorado			
A	B	K	E0
0.50	0.012	0.055	27.60

Tabla 4. 1 Parámetros de Modelización de la Batería según el modelo de Shepherd Mejorado

A continuación, en la Figura 4. 1 se muestra el esquema utilizado como modelo y simulado en Simulink para el sistema de almacenamiento (Baterías):

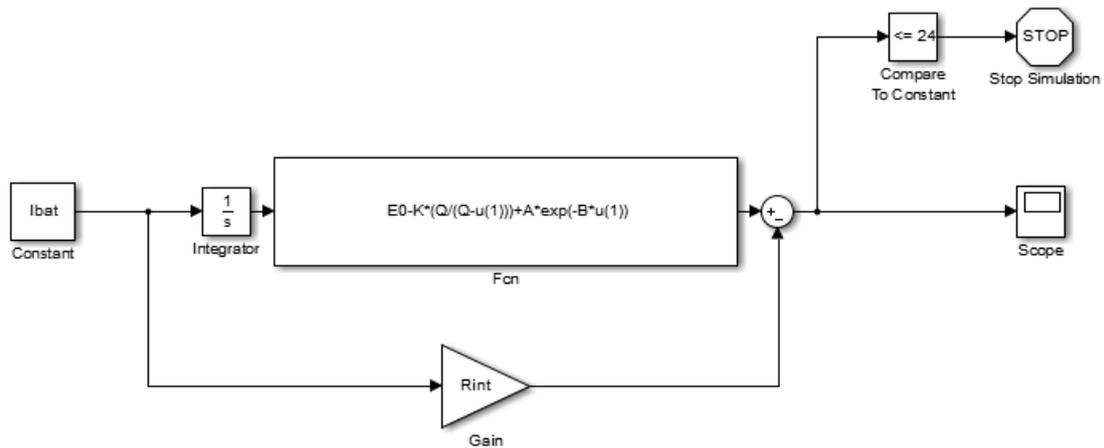


Figura 4. 1 Modelo de la Batería en Simulink

En la Figura 4. 2 se presenta el resultado de la simulación del modelo presentado en la Figura 4. 1.

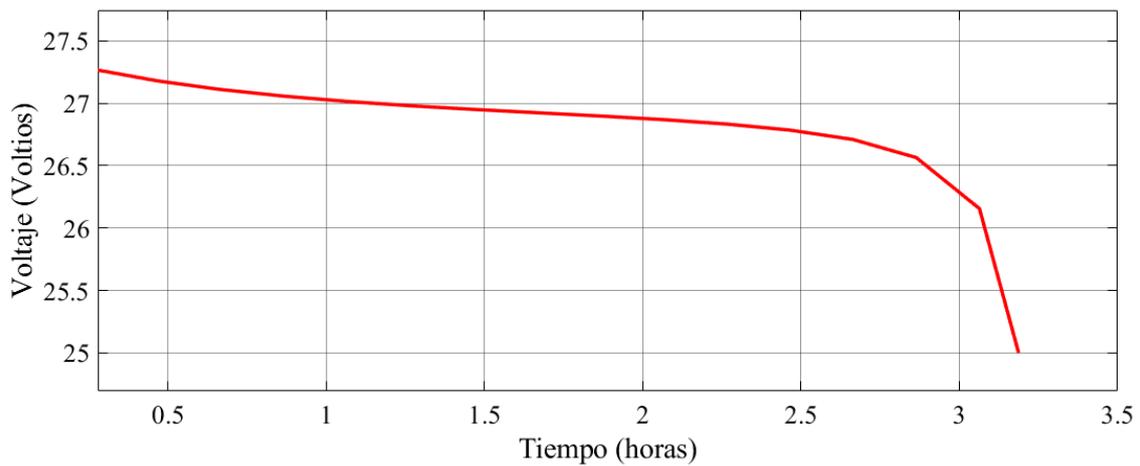


Figura 4. 2 Resultado del Modelo de Shepherd Mejorado en Simulink de la Batería del Vehículo Industrial

En la Figura 4. 3 podemos observar la gráfica en la cual se encuentra superpuesta los resultados de la curva real medida en el laboratorio y la curva como resultado del modelo de Shepherd mejorado.

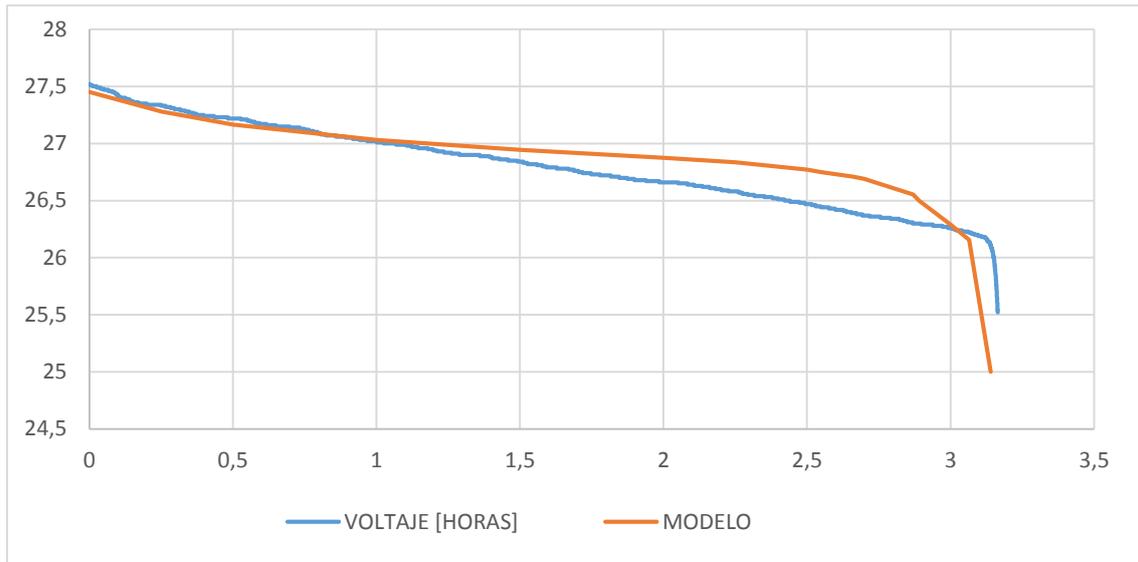


Figura 4. 3 Comparación Modelo - Curva Real de la Batería

De esta manera se puede decir que la capacidad de la batería se encuentra en mal estado ya que está muy por debajo de la capacidad teórica que nos indica el fabricante. En el apartado 3.6 se encuentran alguna de las razones por las cuales una batería de plomo ácido puede degradarse.

Los resultados de la simulación, puede considerarse como buena. Aunque la batería se encuentra con un estado de reducción de su capacidad nominal por envejecimiento, también los tiempos de descarga del modelo se ajustan de forma correcta a la descarga

real, aunque se aparte en una medida mayor de la descarga teórica que sería la duración de 5 horas. Además, se ha comprobado que al cambiar el valor de la intensidad de descarga en la simulación se responde satisfactoriamente. Cabe remarcar que en los extremos de la curva es donde más error se comete como norma general, lo que puede hacer el método poco válido para usar en el caso de que se necesite mucha precisión. Sin embargo, el hecho de tener un método que funcione de forma correcta para nuestro tipo de batería, como es el método de Shepherd mejorado, hace que sea mucho más interesante el considerar este método a la hora de estimar el estado de carga.

4.2 Sistema de Tracción

El programa utilizado para la modelación del sistema de tracción es Psim. El esquema del sistema de tracción se muestra en la Figura 4. 4:

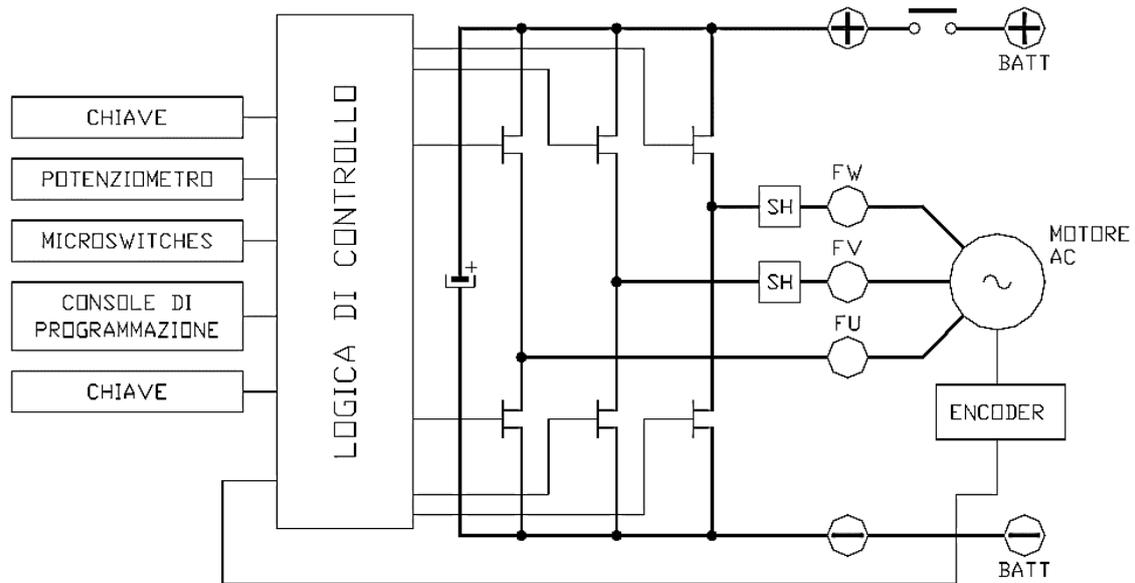


Figura 4. 4 Diagrama de bloques del inversor del vehículo industrial [17]

En el cual como se observa en la Tabla 4. 2 los elementos más importantes del sistema de tracción son:

Elemento	Característica
Batería	24 voltios 750 Ah/C ₅
Inversor ACE-2	4 - 9 KW f _s = 8 KHz
Motor de Inducción	3Ø Potencia Útil(mecánica - eje) = 4,3 KW f _p = 0.885 n = 1866 rpm I = 204 A VLL = 16 V f = 65Hz No. Polos P = 4
Encoder Incremental	64 pulsos/rev

Tabla 4. 2 Características de los elementos del Sistema de Tracción

En la Figura 4. 5 se muestra el esquema simulado en PSIM para la comprobación del modelo del motor asíncrono de tracción del montacargas y en la Figura 4. 6 se muestran los resultados de la simulación. Se puede observar que los datos son muy aproximados a los valores nominales de placa del motor, en el cual a valores nominales consume una potencia eléctrica cerca a los 4,7 KW teniendo una gran eficiencia ya que la potencia útil mecánica en el eje es de 4 KW según la placa del motor.

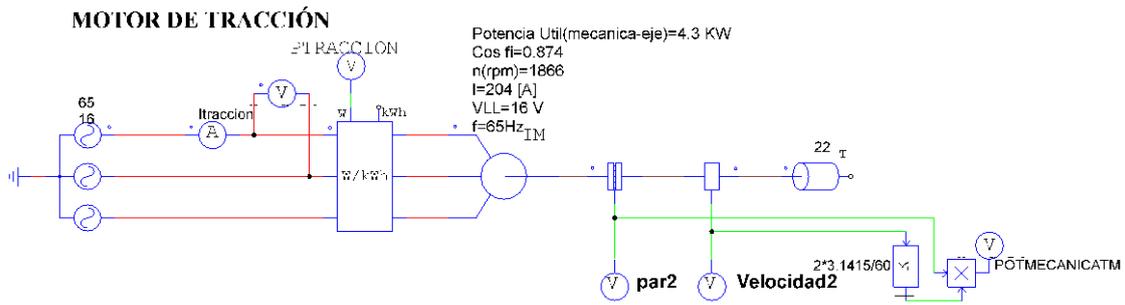


Figura 4. 5 Diagrama realizado en PSIM para la comprobación de valores nominales del motor de tracción

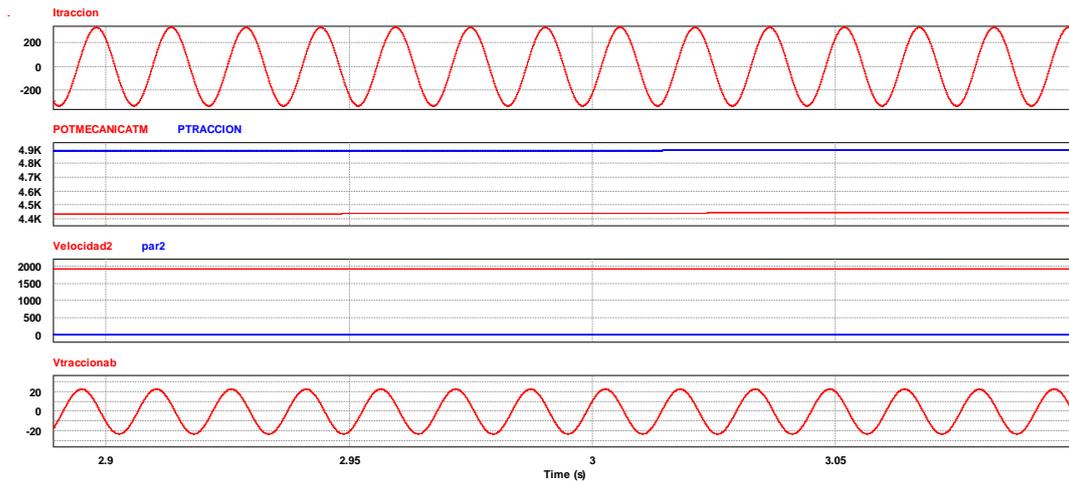


Figura 4. 6 Resultados del esquema en estado estacionario para la comprobación de los datos nominales del motor de tracción

A continuación, se muestra el esquema realizado en PSIM del sistema de tracción en el cual consta el inversor con sus seis transistores de potencia, el control de la velocidad y el par se realizar mediante el control V/F para motores de inducción. Para la parte de regulación de velocidad se consta de un encoder incremental de 64 pulsos por revolución, por lo cual el control del vehículo es a lazo cerrado. En la Figura 4. 7 se puede observar el sistema completo del sistema de tracción el cual consta de dos subcircuitos.

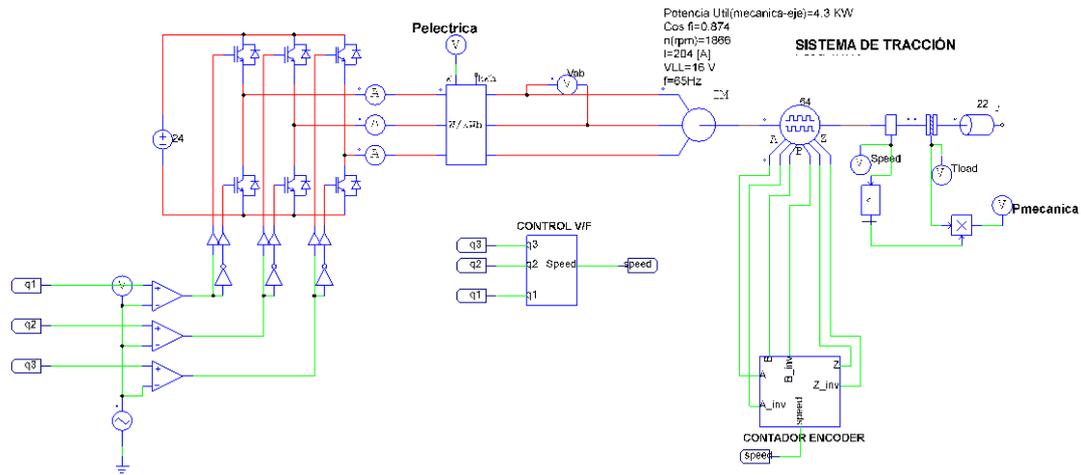


Figura 4. 7 Esquema simulado en PSIM del Sistema de Tracción Inversor a lazo cerrado

El primer subcircuito que se puede observar en la Figura 4. 8, es el subcircuito que se refiere al control del lazo de velocidad del motor, el control v/f . Aquí, la simulación de bucle cerrado del motor de inducción de constante v/f se realiza con el software Psim. Para esta simulación, la velocidad del motor de inducción se compara con la velocidad de referencia; el error y el limitador PI se asignan, y el deslizamiento se agrega a la frecuencia y la señal de frecuencia se multiplica por v/f y se convierte en voltaje. Este voltaje se asigna al bloque DQO-ABC y la onda senoidal de tres fases se compara mediante una onda triangular. La señal de frecuencia también se convierte en un ángulo θ y θ se asigna al bloque DQO-ABC. La señal SPWM se usa para operar el inversor. [19]

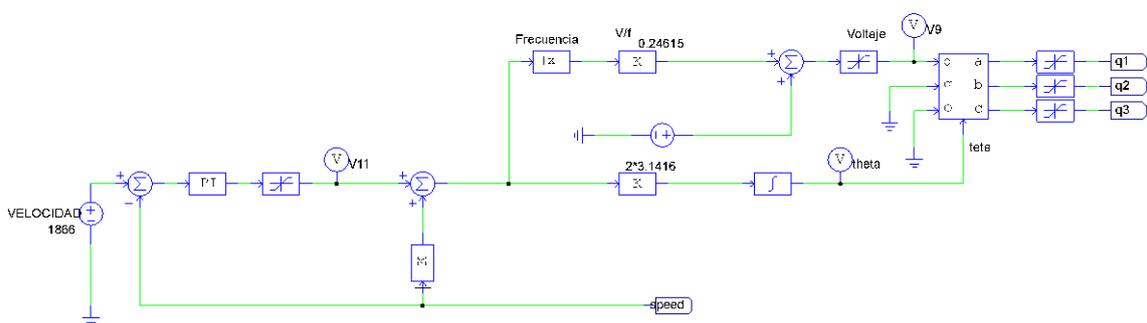


Figura 4. 8 Lazo de control V/F de velocidad del motor de tracción

El segundo subcircuito, que se muestra en la Figura 4. 9 es un circuito que nos permite calcular la velocidad del motor a partir del encoder incremental de 64 pulsos que esta acoplado al eje del motor.

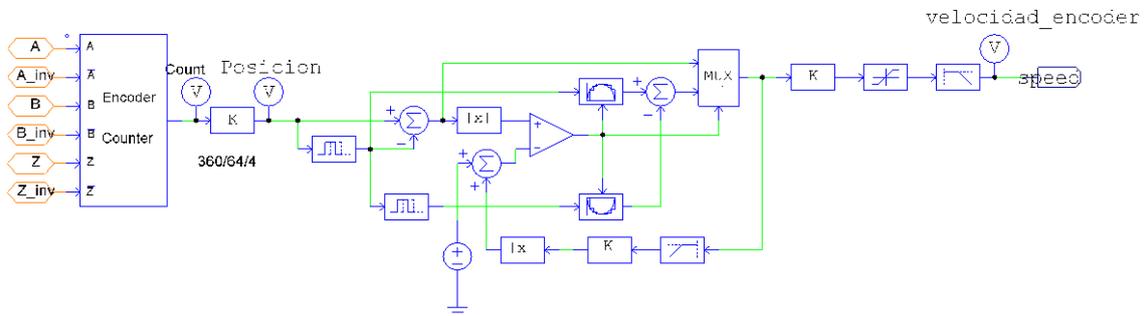


Figura 4. 9 Subcircuito para la medición de la velocidad del motor de tracción a partir del encoder incremental de 64 pulsos

En la Figura 4. 10 podemos observar los resultados de la simulación en Psim. Se observa que el sistema es estable y la velocidad es controlada a su valor de referencia por lo tanto el control PI funciona de manera correcta.

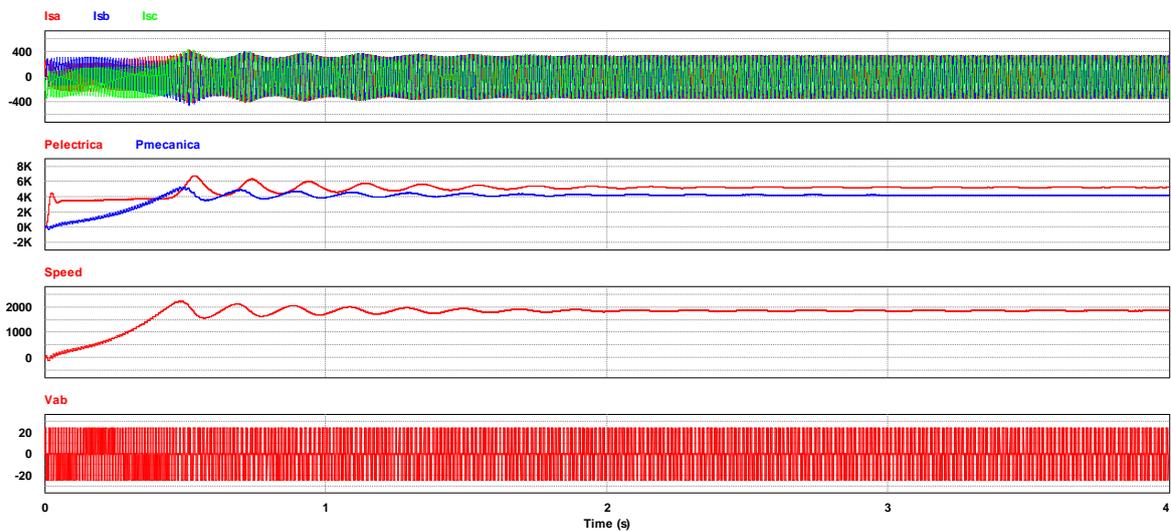


Figura 4. 10 Resultados de la simulación del esquema de tracción en estado estacionario

Para simular el cambio de velocidad se realizó el cambio de referencia en el control como se puede observar en la Tabla 4. 3:

Velocidad referencia [rpm]	1866	1600	1350
Tiempo [s]	0-4	4-7	7-10

Tabla 4. 3 Simulación del cambio de velocidad del motor de tracción en Psim

Los resultados de la simulación variando la velocidad de referencia se muestran en la Figura 4. 11. Se logra probar que el sistema es estable al variar la velocidad de referencia que en nuestro caso sería al presionar más o menos el pedal del acelerador del vehículo el cual es un potenciómetro de precisión.

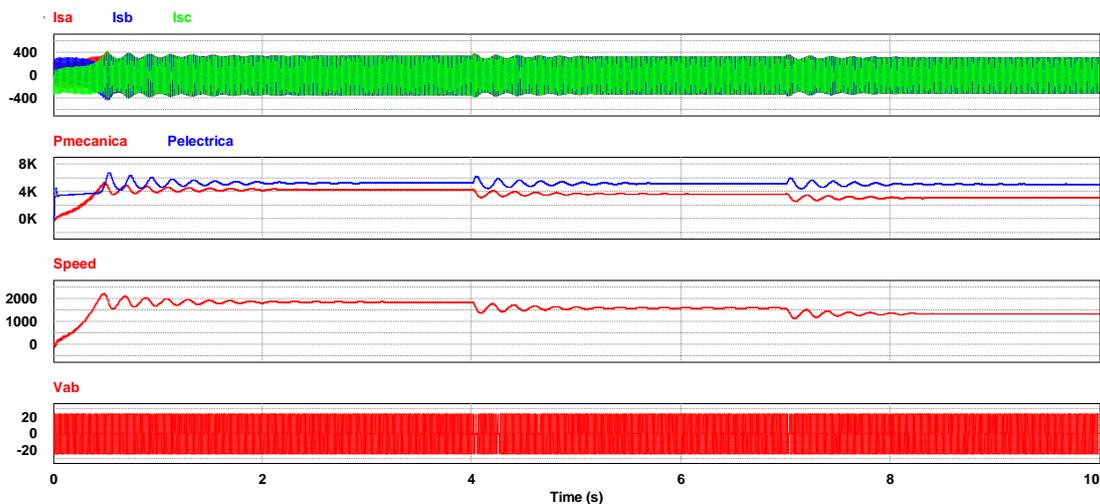


Figura 4. 11 Simulación de la respuesta del sistema de tracción cambiando la referencia de velocidad del control en Psim

4.3 Sistema Hidráulico

El inversor que utiliza el sistema hidráulico y el sistema de tracción para el comando de los motores es el mismo y por lo tanto el diagrama de la Figura 4. 4 es válido en este caso. A continuación, en la Tabla 4. 4 se muestran los principales elementos y características del sistema de bombeo.

Elemento	Característica
Batería	24 voltios 750 Ah/C ₅
Inversor ACE-2	4 - 9 KW f _s = 8 KHz
Motor de Inducción	3Ø Potencia Útil(mecánica - eje) = 9 KW f _p = 0.885 n(rpm) = 2154 I = 453 A VLL = 15 V f = 75 Hz No. Polos P = 4
Encoder Incremental	64 pulsos/rev

Tabla 4. 4 Características de los elementos del Sistema Hidráulico

De igual manera que para el modelado del sistema de tracción para la comprobación de los valores del modelo del motor asíncrono se realizó el siguiente circuito en PSIM mostrado en la Figura 4. 12 dándonos los siguientes datos mostrados en la Figura 4. 13:

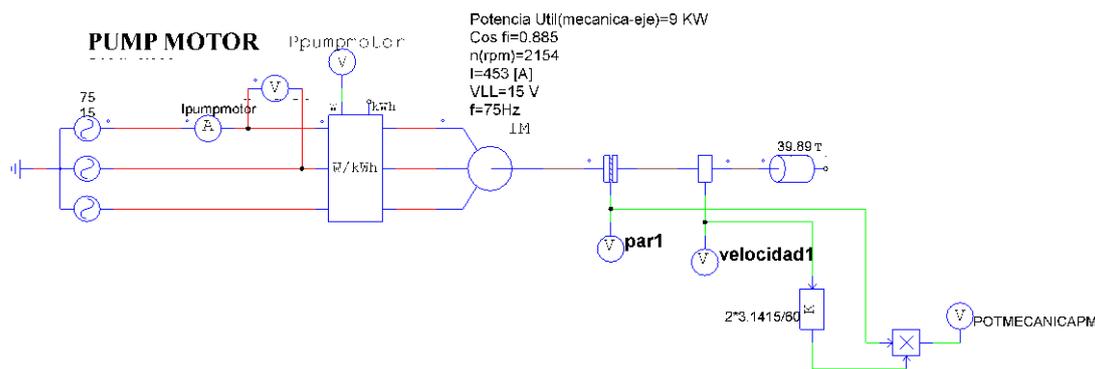


Figura 4. 12 Diagrama realizado en PSIM para la comprobación de valores nominales del motor de bombeo

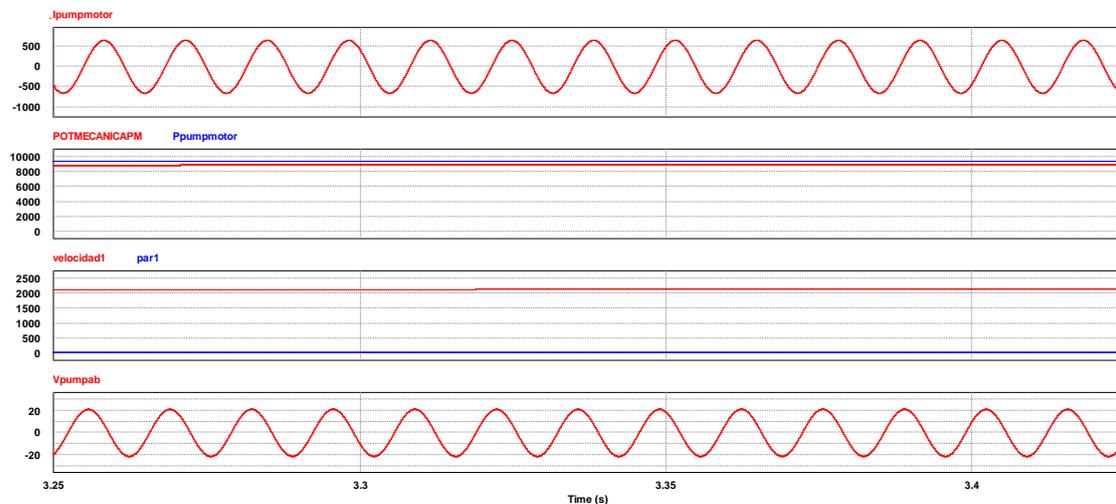


Figura 4. 13 Resultados del esquema en estado estacionario para la comprobación de los datos nominales del motor de bombeo

De igual manera que en el Sistema de Tracción al poseer el mismo inversor el esquema de PSIM es similar con la diferencia de que el control PI a lazo cerrado es diferente por la modelación del motor. En la Figura 4. 14 se observa el esquema completo del sistema de bombeo hidráulico el cual consta de dos subcircuitos. El primero que se puede observar en la Figura 4. 15 es el control V/F que nos permite controlar la velocidad del motor a lazo cerrado. El segundo, Figura 4. 16 es el subcircuito que nos permite conocer la velocidad del motor en rpm a partir del encoder incremental de 64 pulsos.

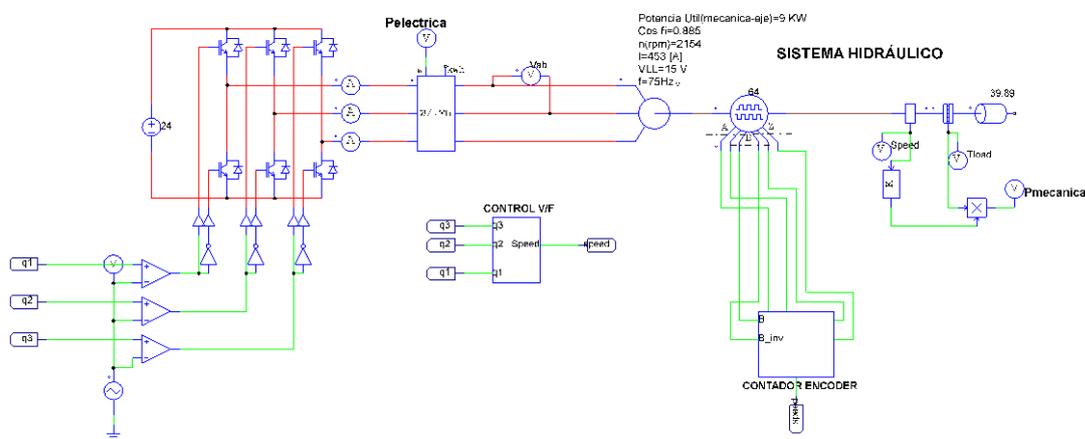


Figura 4. 14 Esquema simulado en PSIM del Sistema Hidráulico Inversor a lazo cerrado

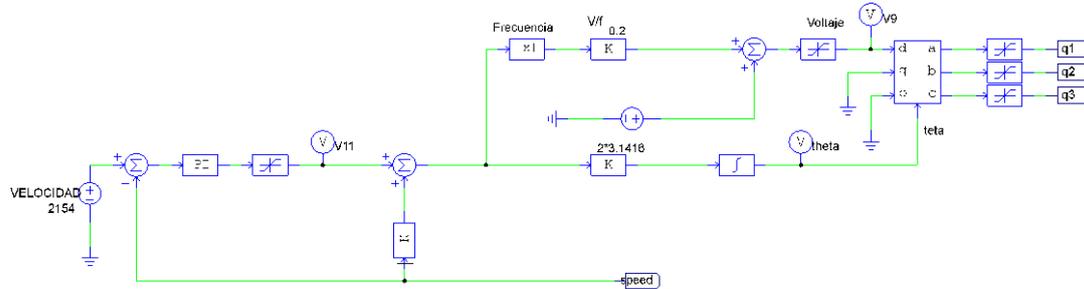


Figura 4. 15 Esquema simulado en PSIM del Sistema Hidráulico Inversor a lazo cerrado

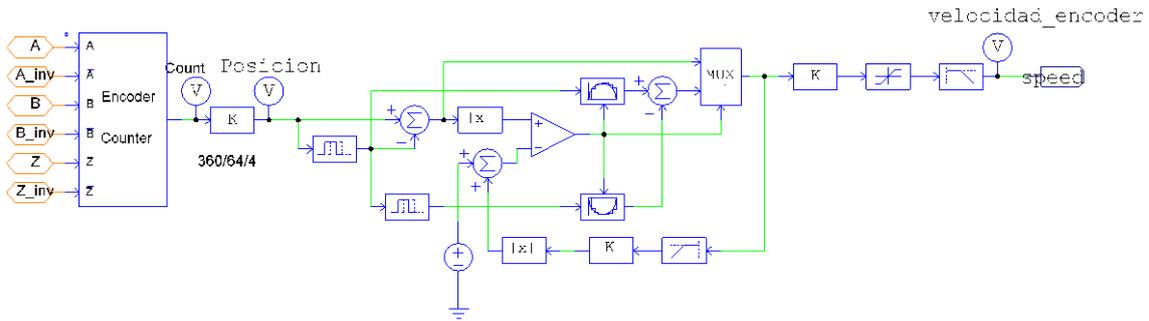


Figura 4. 16 Subcircuito para la medición de la velocidad del motor hidráulico a partir del encoder incremental de 64 pulsos

En la Figura 4. 17 se observa los resultados de esquema simulado en Psim en estado estacionario, cumpliendo de una manera adecuada los parámetros nominales del motor hidráulico de bombeo, descritos en su placa.

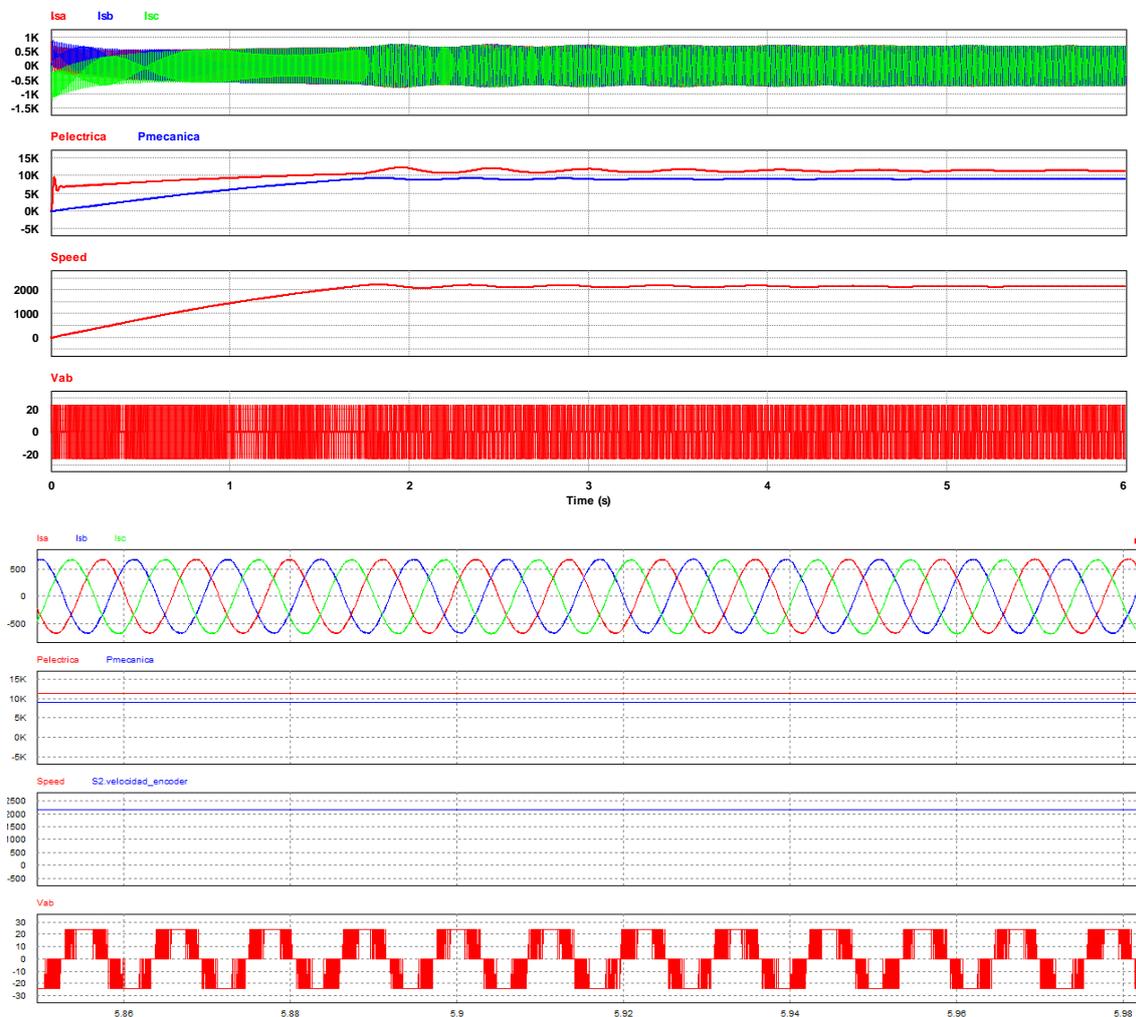


Figura 4. 17 Resultados de la simulación del esquema de bombeo en estado estacionario

Para simular el cambio de velocidad se realizó el cambio de referencia en el control como se puede observar en la Tabla 4. 5:

Velocidad referencia [rpm]	2154	1700	1400
Tiempo [s]	0-4	4-7	7-10

Tabla 4. 5 Simulación del cambio de velocidad del motor hidráulico de bombeo en Psim

En la Figura 4. 18 se muestran los resultados de la simulación. Los resultados obtenidos son favorables ya que se logra el control de la velocidad al cambiar su referencia. De igual manera el sistema sigue siendo estable y cumpliendo los requerimientos de funcionamiento.

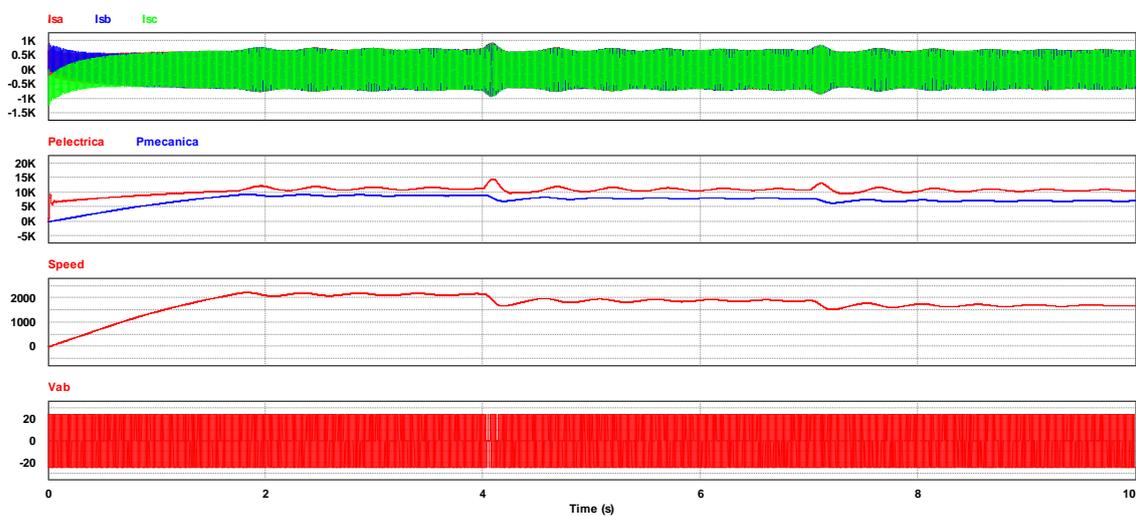


Figura 4. 18 Simulación de la respuesta del sistema hidráulico cambiando la referencia de velocidad del control en Psim

En este caso el cambio de referencia es al variar la inclinación de las respectivas palancas del montacargas para el movimiento de la cuchilla como del mástil. Se necesita un lazo de control para que se controle la velocidad de estos dos elementos cuando el montacargas este con y sin carga sin afectar el funcionamiento del vehículo industrial.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA ALIMENTACION ENERGETICA A PARTIR DE CELDAS DE HIDROGENO

En el presente capítulo se describirá un breve análisis técnico que permitirá verificar si es factible la alimentación del vehículo industrial a partir de una celda de hidrogeno de 5 KW.

Los recientes desarrollos en la tecnología de celdas de combustible asociados al aumento dramático de los precios del petróleo crudo hacen que los generadores de energía de celdas de combustible integrados sean un tema cada vez más interesante y prometedor para la industria automotriz. [27]

Se debe tener en cuenta que en el momento de utilizar el vehículo eléctrico existen momentos en que la potencia alcanza picos muy por encima de la potencia promedio que utiliza el montacargas normalmente. Esto se puede observar en la Figura 5. 9.

Una solución a este problema es utilizar supercapacitores. Ya que, además, sus respuestas eléctricas, térmicas y dinámicas son mejores que las de las baterías. También son atractivos por su alta densidad de potencia, su larga vida útil, así como por su alta ciclabilidad. En consecuencia, los supercapacitores se colocan de manera ideal para ser utilizados para carga máxima en combinación con una pila de combustible o una batería. [28] [29] [30] [31] [32]

Para realizar el análisis de factibilidad técnica se deberá tener en cuenta la utilización normal del montacargas, es decir su consumo de corriente y potencia promedio y sus valores extremos. A continuación, se muestra en la Tabla 5. 1 estos valores:

	Mínima	Máxima	Promedio
Corriente [A]	2,54	630,54	157
Voltaje [V]	20,72	25,65	23,5
Potencia [W]	10	13070	3608

Tabla 5. 1 Valores de Corriente [A], Voltaje [V] y Potencia [W] extremos y promedios de la descarga del montacargas

5.1 Estudio de factibilidad técnica a partir de una celda de hidrogeno de 5KW

5.1.1 Configuración General del Sistema

De esta manera, para suplir la potencia pico que el montacargas requiere es de aproximadamente 13KW, pero como se puede observar esta potencia es mucho mayor al promedio aproximadamente 4 veces mayor. Para esto una solución como se explica en [27] es el uso de una Unidad de Potencia Auxiliar APU (Auxiliar Power Unit) para lo cual se utiliza supercapacitores. A continuación, en la Figura 5. 1 se muestra el esquema que se utilizara para esto:

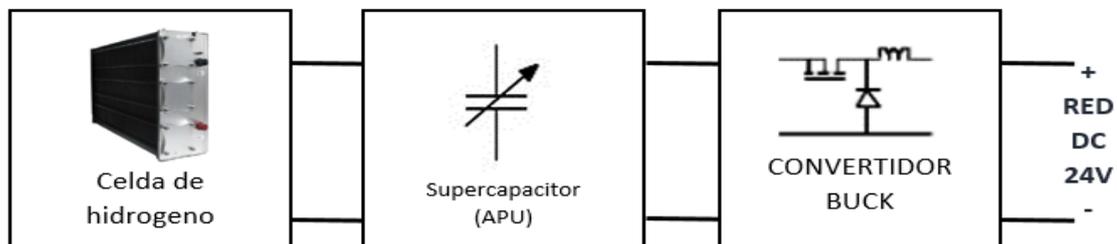


Figura 5. 1 Esquema general de FC / Supercapacitores Serie APU.

5.1.2 Celda de Hidrogeno y Supercapacitores utilizados en el estudio

La celda de hidrogeno que se ha escogido para la verificación de factibilidad es de 5 KW cuyo fabricante es **Horizon** modelo **FCS-C5000** [33]. A continuación, en la Tabla 5. 2 se muestra los datos técnicos de la celda de hidrogeno.

Tipo de pila de combustible	PEM
Número de celdas	120
Potencia nominal	5000W
Actuación	72V @ 70A
Tensión de la válvula de alimentación H2	12V
Voltaje de la válvula de purga	12V
Voltaje del soplador	24V
Reactivos	Hidrogeno y aire
Temperatura exterior	5 to 30 °C
Temperatura máxima de la pila	65 °C
Presión H2	0.45-0.55bar
Pureza del hidrógeno \geq	99.995 % dry H2
Humidificación	auto-humidificado
Enfriamiento	Aire (ventilador de enfriamiento integrado)
Peso (con ventilador y carcasa)	30kg ($\pm 200g$)
Controlador	2.5kg ($\pm 100g$)

Dimensión	65cm x 35cm x 21.2cm
Caudal a la salida máxima	65 L/min
Tiempo de inicio	≤30s a temperatura ambiente
Eficiencia de pila 40% @ 72V	40% @ 72V
Baja tensión apagada	60V
Sobre corriente apaga	90A
Sobre temperatura apagar	65°C
Fuente de alimentación externa	24V(±1V), 8A-12A

Tabla 5. 2 Datos Técnicos de la Celda de Hidrogeno PEM

Los supercapacitores que se utilizan para el estudio son de marca Maxwell modelo Boostmod ultracapacitor BMOD0130, cuyos datos técnicos se presentan en la Tabla 5. 3

Datos técnicos de los capacitores:

ELECTRICAL	BMOD005 2	BMOD006 5	BMOD008 7	BMOD013 0
Capacitancia Nominal [F]	52	65	87	130
Capacitancia mínima, inicial [F]	52	65	87	130
Máxima ESR DC, initial1 [mΩ]	15	12	9,4	8,1
Voltaje Nominal [V]	56	56	56	56
Voltaje Máximo Absoluto [V]	65	65	65	65
Corriente continua máxima (ΔT=15°C) ARMS	58	65	73	79
Corriente continua máxima (ΔT=40°C)	94	110	120	130
Corriente Pico máxima, 1 second	800	1000	1300	1800
Corriente de fuga, máximo (B02 Suffix – VMS 2.0)	N/A	N/A	N/A	N/A
Corriente de fuga, máximo (B02 Suffix - Passive Balancing) [mA]	75	120	120	120
Voltaje en serie máximo [V]	750	750	750	750

Tabla 5. 3 Datos Técnicos de los supercapacitores

5.1.3 Espacio Físico Requerido por el Sistema

Otro punto importante es el comprobar las dimensiones de la celda de hidrogeno, del supercapacitor y de los tanques de hidrógeno de manera de verificar que, al reemplazar el sistema de batería por esta nueva alternativa energética, se adecúe al espacio requerido.

Como se describió en el capítulo 2 el sistema de almacenamiento actual posee unas dimensiones de 827mm de longitud, 486mm de ancho y 627mm de altura.

En el catálogo de la celda de hidrogeno se puede verificar que las dimensiones son de 650 mm x 350 mm x 212 mm. Por lo que sí cabe en el espacio que nos da la batería.

Además, se debe tener en cuenta las dimensiones del supercapacitor el cual es un Maxwell Boostmod ultracapacitor BMOD0130 cuyas dimensiones son 665 mm ancho 176 mm y alto 173 mm. Se deberá utilizar 3 en paralelo. En la Tabla 5. 4 se realiza un resumen de las dimensiones requeridas para nuestro sistema.

Dimensiones	Celda de Hidrogeno	Supercapacitores	Espacio Disponible (Baterías)
Longitud mm.	350	665	827
Anchura mm.	212	176	446
Altura mm.	650	173 x3 = 530	627

Tabla 5. 4 Dimensiones Disponible y Requerida para la Celda de Hidrogeno y Supercapacitores

A continuación, se puede observar en la Figura 5. 2 como quedaría el espacio necesario y el espacio utilizado actual por las baterías.

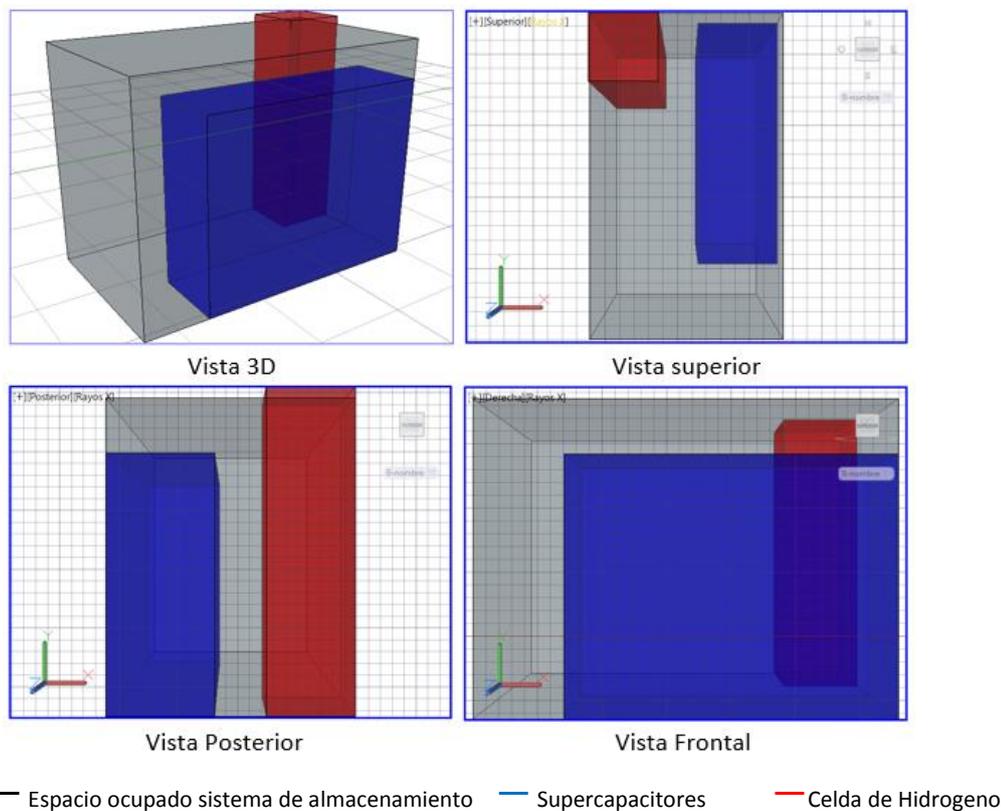


Figura 5. 2 Espacio Requerido en comparación con espacio disponible

Se puede concluir que en la parte de espacio dentro del montacargas al sustituirlo con la batería cabe en el espacio con algunas modificaciones menores, ya que en la altura se debería acoplar por lo que la celda de hidrogeno posee una altura de 3 cm mayor al del disponible actualmente con las baterías.

5.1.4 Modelación del Sistema en Psim

El fabricante nos brinda la gráfica característica de la celda de hidrogeno en la cual utilizamos para la modelación Voltaje vs. Corriente. De esta manera podemos hallar una función de voltaje cuya variable independiente sea la corriente V(A).

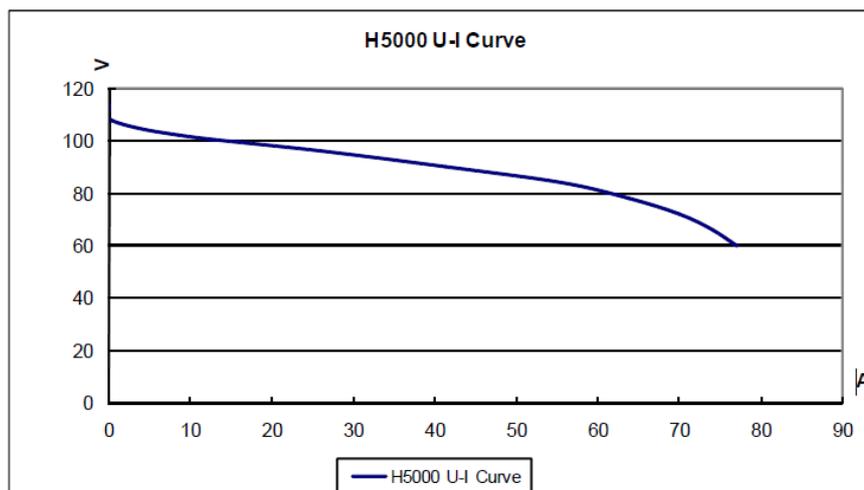


Figura 5. 3 Comportamiento Voltaje vs Corriente de la Celda de Hidrógeno Horizon

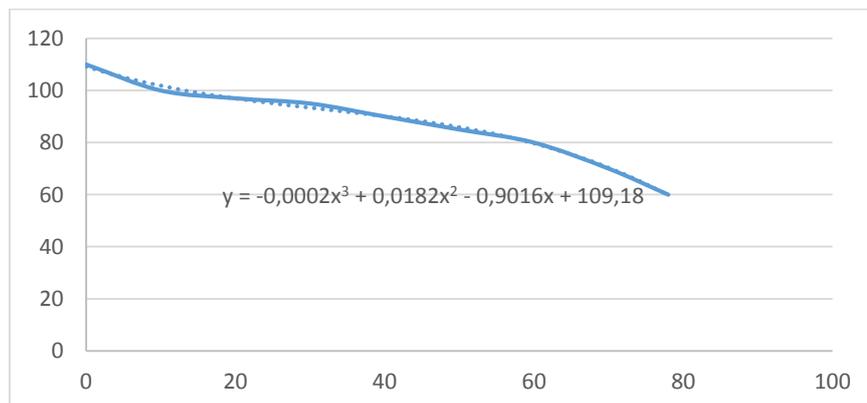


Figura 5. 4 Interpolación polinómica de la gráfica Voltaje vs Corriente de la celda de hidrogeno Horizon

Luego de modelar la función matemática que nos aproxime al funcionamiento de la celda de hidrogeno, podemos simular esto en Psim. En la Figura 5. 5 podemos observar la parte de la modelación de la celda de hidrogeno PEM.

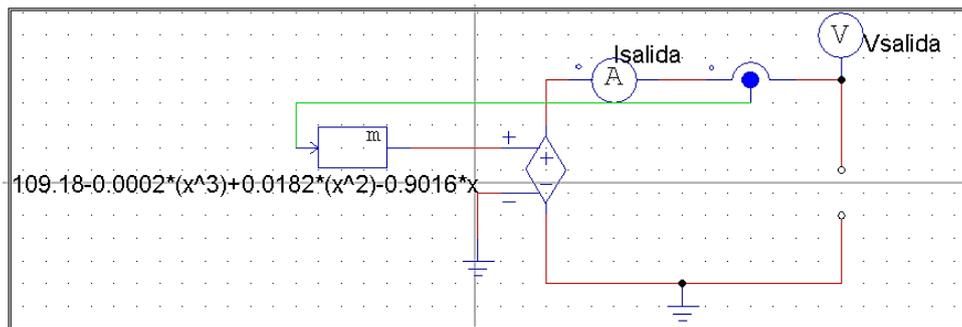


Figura 5. 5 Modelado de la celda hidrogeno en PSIM

Para esto utilizamos una fuente de voltaje controlada por voltaje, un sensor de corriente y la función matemática $V(A)$ calculada anteriormente.

Es así que en PSIM se simula todo el esquema completo, la fuente, el supercapacitor con su resistencia interna, el convertidor buck y la carga. A continuación, en la Figura 5. 6 se presenta el esquema del circuito completo en PSIM.

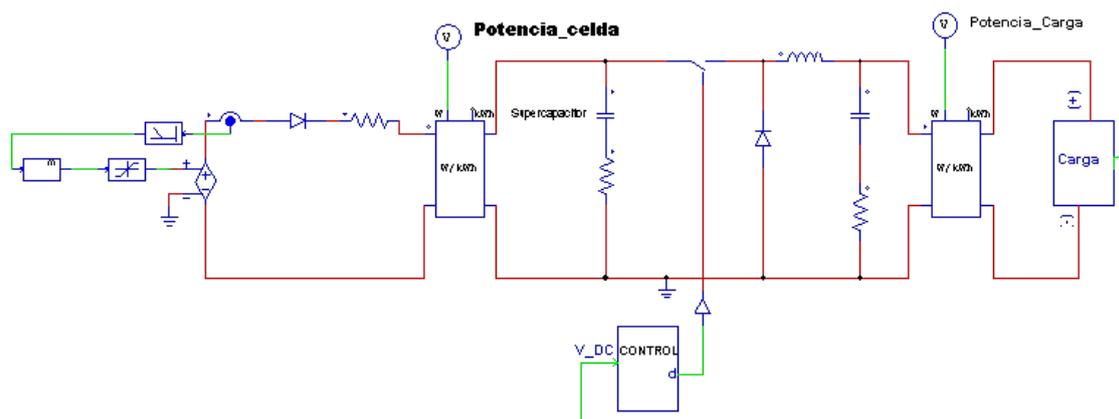


Figura 5. 6 Modelado del Sistema completo en PSIM, celda de hidrogeno, supercapacitor convertidor buck y carga

Se puede observar que el esquema de la Figura 5. 6 posee dos subcircuitos. El primer subcircuito es el lazo de control del voltaje de salida a 24 V, el cual se muestra a continuación en la Figura 5. 7. Este consta de un controlador PI y un control anti-windup.

24

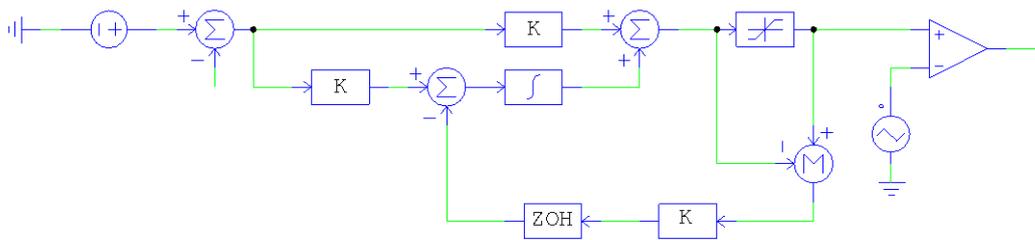


Figura 5. 7 Subcircuito de control simulado en PSIM
Cuyas constantes del control PI se muestran en la

Tabla 5. 5

P=	0.89e-3
I =	0.0133

Tabla 5. 5 Constantes del controlador PI

Para la parte de la carga se realizó la simulación de distintos valores en diferentes tiempos. De esta manera se logra simular cómo se comporta la celda de hidrógeno frente a las distintas potencias que requiere el montacargas durante su operación. Simulando de esta manera una carga mínima, promedio y pico. Verificando el comportamiento de cómo el supercapacitor ayuda a suplir la potencia requerida.

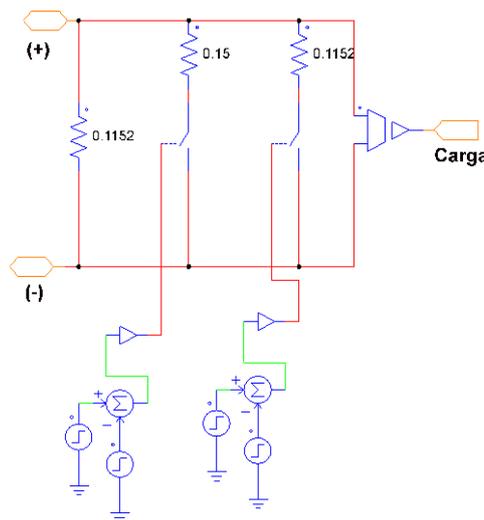


Figura 5. 8 Subcircuito de carga simulado en PSIM

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones. Para esto se ha propuesto distintos niveles de cargas en los cuales se requiere suplir distintas potencias

desde la mínima hasta la máxima con distintos tiempos. Como se muestra en la Tabla 5.

6:

Tiempo [s]	0 - 2	2 - 8	8 - 12	12- 14	14 - 15
Potencia [W]		8	13,7	10	5

Tabla 5. 6 Simulación de tiempo y potencia de la carga en PSIM

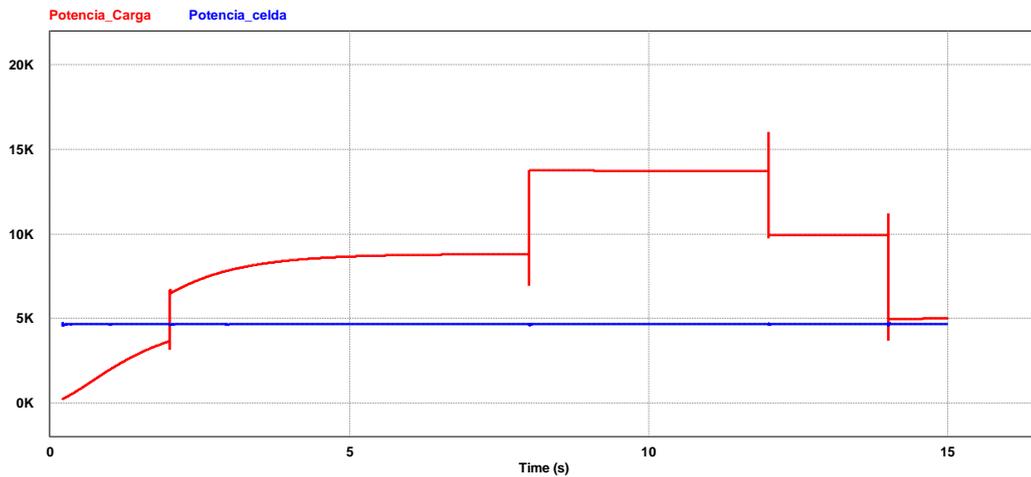


Figura 5. 9 Comportamiento de la celda de hidrogeno al variar la carga necesaria del sistema en PSIM

Se puede observar en la Figura 5. 9 que el inversor funciona a su máxima capacidad 5 KW manteniendo su funcionamiento estable y en los regímenes de mayor demanda es suplida la potencia por los supercapacitores.

A continuación, en la Figura 5. 10 se muestra la señal de voltaje de salida igual a 24 voltios. Manteniéndose controlado el voltaje sin importar la carga que posea el sistema.

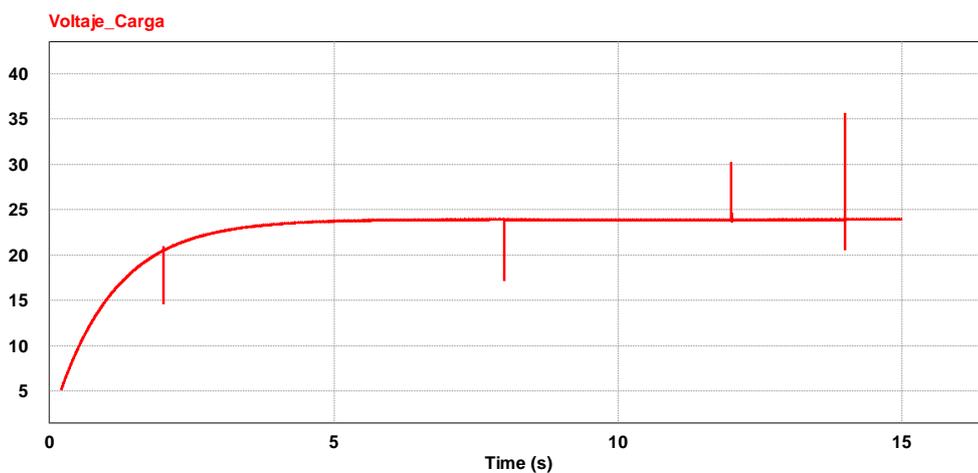


Figura 5. 10 Voltaje DC simulado en PSIM



De esta manera se puede decir que es factible el uso de estas tecnologías como alternativa energética para la alimentación del vehículo industrial. Ya que cumple con los parámetros técnicos sufriendo la potencia sin sobrepasar los límites de funcionamiento que nos brinda el fabricante.

5.1.5 Dimensionamiento Tanques de Hidrogeno

Como se puede observar en la Tabla 5. 2 cuando la celda de hidrogeno genera una potencia de 5KW consume el hidrogeno a un caudal igual a 65 Lt/min y para una autonomía de 2 horas aplicando la ley de cambios triples que es parte de la combinación de las leyes de los gases de Boyle y de Charles y además suponiendo una temperatura constante tenemos.

$$Q = 65 \frac{Lt}{min} \times 120 min = 7800 Lt = V_1$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

En laboratorio se trabaja a una presión de 200 a 700 bares y atm=1,01325 bares entonces:

$$1,01325 bar \times 7800 Lt = 200bar \times V_2$$

$$V_2 = 39,5 Lt$$

Lo que podría recomendarse un tanque de 50 Litros, algo que se podría adecuar en la parte superior del montacargas.

5.1.6 Resultados

El estudio de factibilidad técnico se puede concluir que luego de combinar una celda de hidrogeno de 5KW junto con un Sistema de Potencia Auxiliar como en este caso son los supercapacitores es factible para la utilización del montacargas ya que cumple los requerimientos técnicos de potencia requerida al igual que de espacio. En todas las simulaciones se cumple con el funcionamiento de la celda dentro de los límites de operación que el fabricante nos brinda.



CONCLUSIONES

- Con el estudio y modelado del funcionamiento del vehículo industrial se han alcanzado los objetivos del trabajo. Dentro del objetivo principal se propuso verificar si la fuente de energía resultase eficiente sin importar las condiciones de uso que se le dé al vehículo, dando resultados totalmente favorables, con lo cual podemos decir que la fuente de energía utilizada por el vehículo es eficiente y cumple la potencia que el vehículo demanda en todos los casos.
- Otro de los objetivos principales de este trabajo era determinar si la fuente de energía (banco de baterías) era capaz de cumplir constantemente con la demanda de la carga por un tiempo largo, se ha comprobado que esta característica depende básicamente del trato que se le dé a la misma, con lo que se puede alargar la vida útil del banco o lo contrario reducirla. Cabe recalcar, que se pudo comprobar que la capacidad con la que cuenta el montacargas se encuentra muy por debajo de lo que nos indica el fabricante, hasta 4 veces menos (750Ah a 160 Ah) de la capacidad nominal lo que se puede decir que la batería se encuentra degradada. Cargar el banco de baterías inmediatamente después de que esta se haya agotado ayuda significativamente a alargar la vida útil. Cuando esta está completamente cargada y se deja un periodo largo sin uso, esta no debe disminuir del 50% de carga, al suceder esto el banco debe ser puesto de inmediato en estado de carga.
- En algunas de las mediciones realizadas existe un pico en la medición de potencia, utilizada por el montacargas hasta alcanzar 13 KW lo que equivale hasta más de 4 veces la potencia promedio, esto se debe a que el vehículo está en movimiento y al mismo tiempo realizamos el movimiento 1 (levantamiento de la cuchilla); es decir, el motor de tracción y el motor hidráulico están funcionando al mismo tiempo con lo que se llega a la potencia máxima. Entonces esto no cumple los regímenes técnicos ni de seguridad del montacargas.
- Se comprobó que la potencia que requiere suplir el sistema de baterías cuando el montacargas esta con y sin carga es diferente. Esto es por el control de velocidad y torque (V/F), tanto para el sistema de tracción como para el sistema hidráulico. Así, el movimiento de las cuchillas estando con carga puede alcanzar un pico aproximado de 9 KW, mientras que sin carga el pico de potencia es aproximado a 6,5 KW.



- Al realizar las distintas mediciones se pudo comprobar que la eficiencia del cargador de baterías es mayor al 84%, mientras que la energía que puede entregar la batería, su eficiencia energética, en un ciclo de descarga es igual al 70%. Además, se debe recalcar que al estar la capacidad de la batería muy por debajo del valor teórico que nos brinda el fabricante el equipo solo resiste un poco más de 1 hora al estar en funcionamiento normal debido a su envejecimiento natural de las baterías de plomo ácido.
- Mediante la implementación de software para el modelamiento del vehículo, nos ha sido de gran ayuda para verificar aún más el modo de funcionamiento del mismo, con lo que podría permitirnos desarrollar en un futuro, un vehículo de similares características, utilizando fuentes de energía limpia.
- El uso de tecnologías como las celdas de hidrogeno con tecnología PEM junto con el uso combinado de sistemas auxiliares de potencia como es el caso de supercapacitores se demostró la factibilidad de energizar con otras fuentes de energía al vehículo eléctrico industrial estudiado. Ya que cumple con todos los requerimientos técnicos y físicos que requiere el montacargas para su correcto funcionamiento.



RECOMENDACIONES

El banco de baterías del vehículo eléctrico industrial al comprobarse que está en una capacidad muy por debajo de la teórica se debería proceder al reemplazo. Y se deberá tener en cuenta los principales componentes que intervienen en la degradación de las baterías para evitar esto y alargar la vida útil de la misma.

Se debe considerar para trabajos futuros el estudio de factibilidad económica al utilizar la tecnología en la cual se trata en el capítulo 5, la celda de hidrógeno junto a los supercapacitores vs las tecnologías actuales.

Además, se debe realizar el estudio del centro de gravedad y equilibrio ya que se debe tener en cuenta que el peso de la batería brinda estabilidad al vehículo cuando requiere levantar carga, por lo que al no ser los mismos pesos entre estas tecnologías se deberá analizar este importante aspecto.



Bibliografía

- [1] H. Fernández, V. Guzmán A., A. Martínez I. y M. I. Giménez , «Modelaje y simulación de una batería de plomo acido mediante fuentes dependientes de voltaje-corrientes y bloques de funciones aritméticas.,» 2005.
- [2] J. L. James Larminie, J. Wiley, Ed., *Electric Vehicle Technology Explained*, 2003.
- [3] J. A. Vargas Fabre, *Conversión a auto eléctrico basada en un accionamiento trifásico: diseño, modelación e implemectación.*, Santiago de Chile, 2012.
- [4] O. A. Aguirre Guevara, "*CELDAS DE HIDROGENO Y SU POTENCIAL DE APLICACIÓN*", 2013.
- [5] J. L. James Larminie, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2003.
- [6] J. G. Zabaleta , I. San Martin Biurrun y J. M. Pascual Miquelei, «Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental».
- [7] M. García Plaza, J. E. García Carrasco y J. A. Martinez de las Morenas, «Estudio y modelado de la respuesta dinamica de baterias electroquimicas».
- [8] Blackbull, «Baterías de Tracción PB Abierto-Gel PZS/PZB. Blackbull».
- [9] Blackbull, «Elementos y Baterías de Tracción».
- [10] I. Automation, «TECHNICAL DATA TRACTION CHARGERS.».
- [11] L. A. Carballo Rojas, «"Plan de mantenimiento preventivo para montacargas eléctricos" "Diseño de sistemas de riego para zona verde",» Cartago, 2004.
- [12] BOSCH, «ELECTRIC MOTORS. D.C. MOTORS WITH AND WITHOUT TRANSMISSIONS, BLOWERS, PUMPS AND VALVES».
- [13] I. u. d. valencia, *Curso 0607 tema 3*.
- [14] R. Solorzano, «Principios Ingenieriles Básicos,» 05 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.hydraulicspneumatics.com/blog/principios-ingenieriles-b-sicos-bombas-hidr-ulicas>.
- [15] L. E. URRUTIA PARRA, «SISTEMA MOTOR-INVERSOR "SENSORLESS" PARA EL ARRANQUE DE VEHÍCULO HÍBRIDO "PLUG-IN".,» Santiago de Chile, 2011.
- [16] F. Miyara, «RECTIFICACIÓN,» 2002.
- [17] Z. S.p.A., «ELECTRONIC, OLEODYNAMIC, INDUSTRIAL, EQUIPMENTS CONSTRUCTION. User manual. ACE2 350-450 INVERTER».
- [18] I. L. Hurtado J. y Y. M. Soria B., *El hidrógeno y la energía*, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI., 2007.



- [19] J. R. Patel y S. R. Vyas, *Simulation and analysis of Constant V/F Induction Motor Drive*, vol. 2, Issue, 2014.
- [20] H. H. Industries, «Electric Counterbalance Trucks. 10/13/15BTR-9.Hyundai Forklift».
- [21] J. Vargas, *"Conversión a Auto Eléctrico Basada en un Accionamiento Trifásico: Diseño, Modelación e Implementación"*, Chile: Universidad de Chile, 2012.
- [22] «OKdiario,» 14 10 2016. [En línea]. Available: <https://okdiario.com/curiosidades/2016/10/14/hidrogeno-caracteristicas-h2o-450494>.
- [23] M. Tolón y I. Tamara, *Operación y gestión de microrredes energeticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energetica y ambiental*, Barcelona, 2013.
- [24] J. Schiffera, D. Uwe Sauera, H. Bindnerb, T. Croninh, P. Lundsagerb y R. Kaiser C., *Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems.*, 2006.
- [25] C. M. Shepherd, *"Design og Primary and Secondary Cells-Part 2. An equation describing battery discharge"*, vol. 112, journal aof Electrochemical Society, 1965.
- [26] O. Tremblay y L. A. Dessaint , *"A Generic Battery Model For The Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles"*, TEXAS, 2007.
- [27] S. Bontour, D. Hissel, H. Gualous, F. Harel y J. M. Kauffmann, «Design of a parallel fuel cell-supercapacitor auxiliary power unit,» de *International Conference on Electrical Machines Systems*, 2005.
- [28] E. J. Dowgiallo y A. F. Burke, «"Ultracapacitors for Electric and 1-brid Vehicles",» de *Electric Vehicle Conference*, 1993.
- [29] T. Dietrich, «"Ultra Caps-A new energy Storage Device dr Peak Power Aplications",» de *The 186 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, Berlin, 2001.
- [30] D. Kok, E. Spijker, A. Seibertz y S. Buller, «"42V Energy Storage Systems For Stop-Start Application in Hybrid Vehicles",» de *The 18t International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, Berlin, 2001.
- [31] J. Jeong , H. D. Lee, C. S. Kim, H. S. Choi y B. H. Cho, «"A Development of an Energy Storage system for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitor",» de *The 19th International Battery, I-lybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 2002.
- [32] J. N. Marie FRan, H. Gualous y A. Berthon, «"42V Hybrid Power Source for Automotive Application",» de *1 International Conference EPE-PEMC'2004*, Riga, 2004.
- [33] «<https://www.fuelcellstore.com/manuals/horizon-pem-fuel-cell-h-5000-manual.pdf>,» [En línea]. Available: <https://www.fuelcellstore.com/manuals/horizon-pem-fuel-cell-h-5000-manual.pdf>.
- [34] I. Pellejero, G. García, S. Casado, R. Garde y M. Aguado, «Modelado y caracterización de una batería ión-litio en una microred.».



- [35] A. J. Ramón Soliz y R. E. Pineda Erreyes, «"ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO EXISTENTE EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA"».
- [36] R. Iglesias, A. Lago, A. Nogueiras , C. Martínez Peñalver, J. Marcos, C. Quintans , M. J. Moure y M. D. Valdés, «Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda.» Vigo.
- [37] J. García , *"Acumuladores Electroquímicos, Fundamentos, Nuevos Desarrollos y Aplicaciones"*, Madrid, 1994.
- [38] J. García, F. López, J. Zabala y M. Iriarte, *"El Vehículo Eléctrico, Tecnología, Desarrollo y Perspectiva de Futuro"*, Madrid: Mc Graw Hill, 1997.
- [39] J. L. Espinoza, L. G. González y R. Sempértegui, *"Micro grid Laboratory as Tool for the Investigation of Non-Conventional Energy Sources in Ecuador, 2017."*
- [40] «<https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors>,» [En línea]. Available: <https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors>.

ANEXOS

1. Instrumentación y equipos utilizados en el trabajo

1.1 ANALIZADOR DE ENERGÍA FLUKE 430-II

Este equipo Figura A. 1, fue utilizado para realizar distintas mediciones desde rendimiento del banco de baterías, energía consumida en un periodo de tiempo, medición del cargador del banco de baterías etc. A partir de corriente alterna trifásica de la red. Ver Figura A. 1



Figura A. 1 Analizador de Energía FLUKE 430-II

1.2 HIOKI PW3337

Este equipo Figura A. 2, fue utilizado para la medición de descarga para verificar la energía que puede entregar el banco de baterías en un ciclo de descarga completo utilizando el montacargas. Por lo que nos ayudó a censar la parte de corriente continua.



Figura A. 2 HIOKI PW3337

1.3 Fluke BT521 Analizador y Probador de Baterías Avanzado.

Equipo utilizado para la medición de cada una de las resistencias internas del sistema de almacenamiento, ver Figura A. 3



Figura A. 3 Fluke BT521

1.4 Fluke BTL-A. Zonda de Corriente

Equipo utilizado para medir la corriente suministrada por el banco de baterías hacia la carga. Ver Figura A. 4



Figura A. 4 Zonda de Corriente Fluke BTL-A.

1.5 Osciloscopio de dos canales Tektronix

El osciloscopio Figura A. 5 fue utilizado para medir las formas de onda tanto de voltaje, corriente y potencia del sistema de almacenamiento y los motores al ser estos sometidos a varias pruebas de rendimiento.

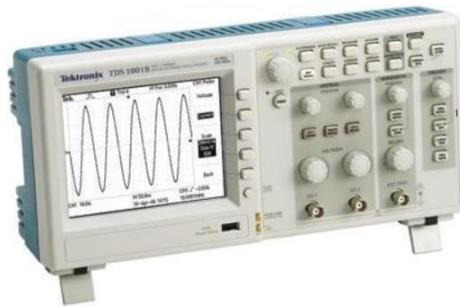


Figura A. 5 Osciloscopio 2 canales

2. Toma de mediciones mediante oscilogramas

En la Figura A. 6 que se muestra a continuación, observamos las mediciones realizadas mediante oscilogramas, tanto del sistema de almacenamiento como de los motores de tracción y desplazamiento.

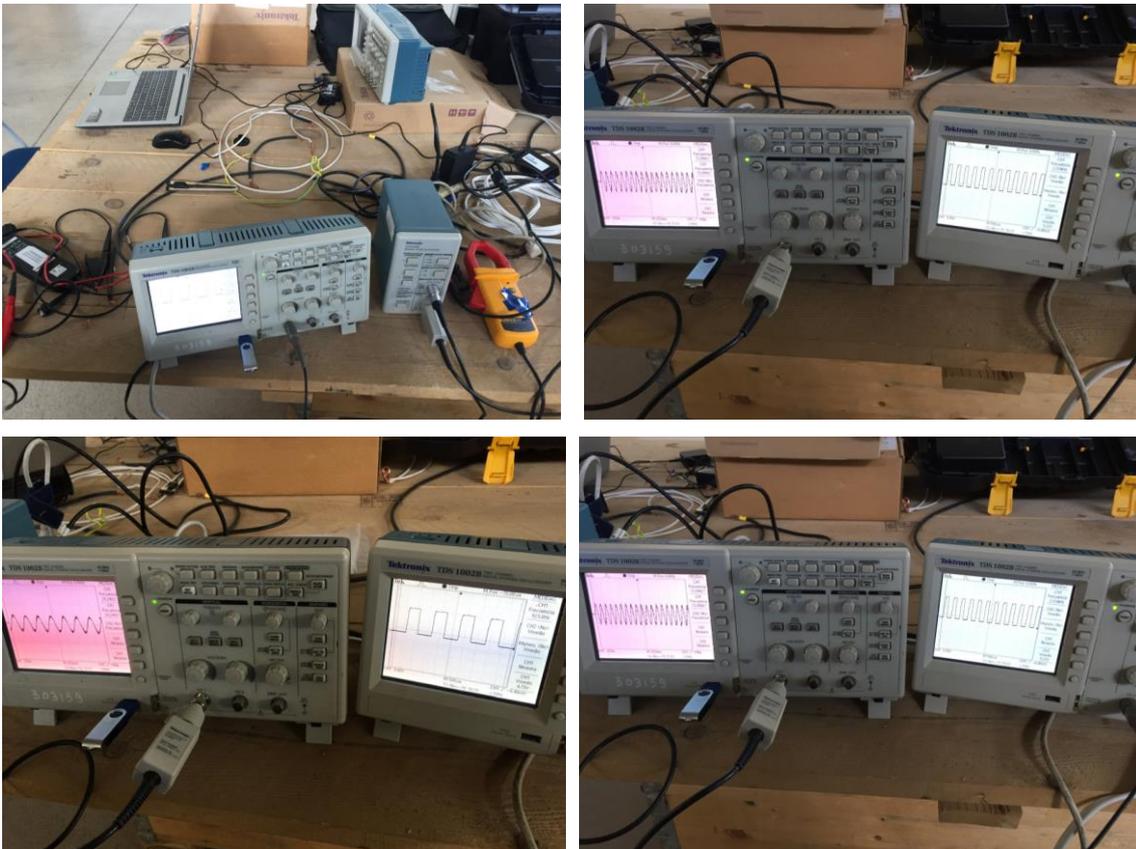


Figura A. 6 Toma de Mediciones mediante oscilogramas

3. Calibración de censado para la medición de corriente de salida y de la energía de descarga

Este proceso se realizó para calibrar y verificar las sondas de corriente continua para conocer la energía que se va a consumir durante un periodo de trabajo que va a ser determinado. Como se puede ver en la Figura A. 9, se está comparando la salida de tensión de la sonda roja con la sonda negra que tiene una corriente máxima de 150 amperios (A) de corriente continua nominal, y como podemos ver en el osciloscopio la sonda negra se satura un poco por encima de su corriente nominal llegando a un valor un poco mayor a 200 A, mientras que la sonda roja no se satura, con lo cual nos permite hacer una medida bastante confiable para un rango mayor a 150 A de corriente. Ver figura Figura A. 7 y Figura A. 8

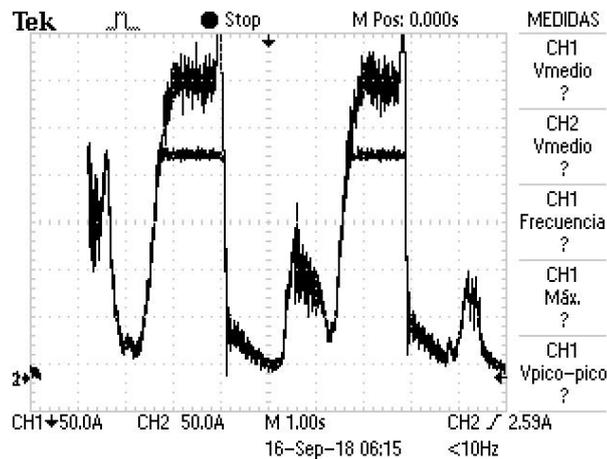


Figura A. 7 Ondas de corriente que muestran el nivel máximo al que puede llegar cada sonda

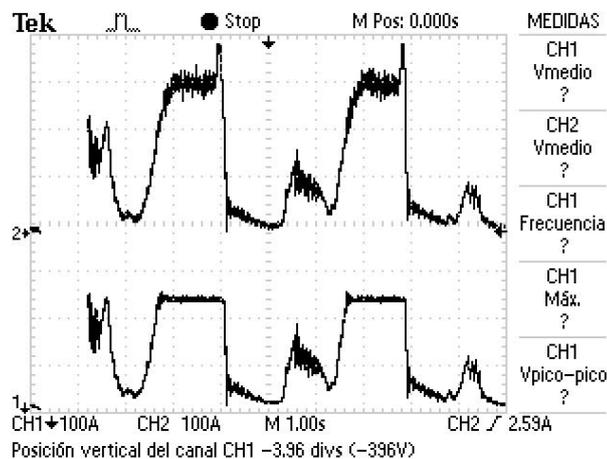


Figura A. 8 Nivel de corriente de saturación



Figura A. 9 Calibración de censado para la medición de corriente de salida y de la energía de descarga

4. Proceso de Ecuilibración de las Baterías

En la Figura A. 10 que se presenta a continuación observamos el momento en el que se procedió a realizar el llamado Proceso de Ecuilibración de Baterías para mejorar el rendimiento, el tiempo de vida útil y la capacidad de carga de la batería.



Figura A. 10 Proceso de Ecuilibración del Banco de Baterías

5. Medición de Rendimiento del Banco de Baterías

En la Figura A. 11 mostramos el momento en el que se procedió con la medición del rendimiento del banco de baterías utilizando el equipo Analizador de Energía FLUKE 430-II.



Figura A. 11 Medición del Rendimiento del Banco de Baterías

6. Tanque utilizado como carga para las pruebas de rendimiento del vehículo aproximadamente 1 Tonelada

En la Figura A. 12 se muestra el tanque que se utilizó para realizar las pruebas en el vehículo, este tanque tiene un peso aproximado de 1 Tonelada.



Figura A. 12 Peso utilizado para realizar las pruebas de rendimiento aproximadamente 1 Tonelada.

7. Pruebas de Descarga del Banco de Baterías

En las imágenes que mostramos a continuación Figura A. 13 y Figura A. 14 podemos observar las pruebas de descarga del banco de baterías, utilizando el equipo HIOKI PW3337.



Figura A. 13 Pruebas de descarga del Banco de Baterías.



Figura A. 14 Pruebas de descarga del Banco de Baterías