

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



UCSC

**Sistema Emulador de Descarga para Baterías de Litio Mediante
Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico Dos Niveles.**

Claudio Andrés Mella Ceballos

Informe de Habilitación Profesional para optar al Título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:

Dr. Ricardo A. Lizana F.

Profesores Guía:

Dr. Eduardo E. Espinosa N.

M.Sc. Ricardo I. León. C.

Concepción, julio de 2022

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Sistema Emulador de Descarga para Baterías de Litio Mediante Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico Dos Niveles.

Claudio Andrés Mella Ceballos

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Julio de 2022

Resumen

Actualmente la ingeniería eléctrica va a la vanguardia con el auge en el desarrollo de procesos industriales y cotidianos para el progreso de la humanidad.

El presente documento fundamenta el desarrollo de un Sistema Emulador de Descarga para Baterías de Litio, que está constituido por un convertidor de electrónica de potencia basado en tecnología fuente de voltaje con topología de dos niveles y un modelo para baterías de litio. En este trabajo se utiliza el modelo Thevenin-Shepherd para caracterizar la dinámica de descarga de una batería real, este se sustenta de un circuito eléctrico basado en Thevenin y la ecuación de voltaje en circuito abierto de Shepherd. La estimación del estado de carga se consigue mediante el contador de Coulomb midiendo el flujo de corriente en la dinámica de descarga. Se usa de referencia el modelo de baterías del software Matlab/Simulink, que es similar al modelo propuesto en este informe. El Modelo de Baterías Litio-Ion es idóneo para representar el comportamiento dinámico de descarga de tensión al conectar una carga a los terminales de la batería. Se simulan tres tipos de celdas utilizadas para bancos destinados al almacenamiento en sistemas eléctricos domiciliarios y para electromovilidad.

El desarrollo del Sistema Emulador de Baterías consigue replicar distintos escenarios en la dinámica de voltaje durante el proceso de descarga en los respectivos bancos de pruebas constituidos por las celdas de litio simuladas por el Modelo de Baterías, el control utilizado para gobernar el convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles es realizado por controladores PI en conexión cascada, con un lazo interno de corriente en eje directo y externo de tensión continua.

El diseño de control para el convertidor del Sistema Emulador para Baterías de Litio, entrega la respuesta dinámica transiente y estacionaria en descarga de voltaje para tres bancos de baterías con arquitecturas de, 100 V, 400 V y 800 V, donde se analiza los perfiles de tensión al variar la carga que se conectan a los terminales de la batería. Para validar la configuración de potencia propuesta, el Sistema Emulador al operar alcanza un error de 0 % en estado estacionario en la ejecución de estos bancos de batería junto con la señal de referencia en descarga de voltaje conseguida mediante Matlab.

Es por esto que el desarrollo del Sistema Emulador impulsa a conocer el comportamiento dinámico en la descarga en cualquier sistema eléctrico donde las baterías sean capaces de suplir demandas de energía, y conocer cual ofrece las prestaciones apropiadas para la correcta operación del sistema eléctrico.

*Dedicado a mi Lelita y mis abuelos,
a mis padres, y mi yo del pasado por mi perseverancia y esfuerzo.*

«Hay cualidades que conducen al éxito. Coraje, la capacidad de soñar y perseverar.»
— Soichiro Honda

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis ídolos, mis padres Rina y Claudio, por brindarme su amor incondicional, ser el pilar fundamental en mi desarrollo como persona y apoyarme para lograr este trabajo. Ninguno de mis pequeños logros en mi vida estaría completo sin ustedes. Gracias por todo.

Agradezco cada una de las vivencias universitarias, que aportaron en mi desarrollo como profesional, agradecer a mis compañeros de carrera y amigos, por los gratos momentos y apoyo que me brindaron durante este largo proceso. En especial a Hugo, Sebastián y Diego, por las interminables jornadas de estudios, y nuestra inalcanzable voluntad para cumplir con los objetivos.

Agradecer de las emocionantes conversaciones, partidos que compartimos y buenos momentos de fútbol junto a Nicolás, Cristian, Carlos y Benito. Agradecer al deporte rey, pasión de multitudes.

Además, agradecer a mis colegas eléctricos por la enseñanza en mi estadía durante mi práctica profesional en la planta Horcones Línea 2.

Por último, agradecer a todas las personas que me brindaron su apoyo, comprensión y creyeron en mi para la realización de este trabajo.

A todos, infinitas gracias.

Tabla de Contenidos

RESUMEN III

TABLA DE CONTENIDOS.....	VI
LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
NOMENCLATURA.....	XIII
ABREVIACIONES	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	15
1.2. TRABAJOS PREVIOS.....	18
1.2.1 <i>Batería de Litio y Modelamiento</i>	19
1.2.2 <i>Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico Dos Niveles</i>	22
1.2.3 <i>Discusión</i>	25
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	26
1.4. OBJETIVOS	26
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	26
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	27
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	27
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	27
CAPÍTULO 2. SISTEMA EMULADOR DE DESCARGA PARA BATERÍAS	29
2.1. INTRODUCCIÓN	29
2.2. BATERÍA DE LITIO.....	29
2.2.1 <i>Fundamentos Básicos de las Baterías de Litio</i>	29
2.2.2 <i>Composición de la Celda</i>	31
2.2.3 <i>Principio de Funcionamiento</i>	32
2.2.4 <i>Seguridad de las CLI</i>	33
2.3. CONVERTIDORES FUENTE DE VOLTAJE	35
2.4. SISTEMA EMULADOR DE BATERÍAS	36
2.4.1 <i>Ventajas del Sistema Emulador</i>	38
CAPÍTULO 3. MODELAMIENTO DE LA BATERÍA DE LITIO	39
3.1. INTRODUCCIÓN	39
3.2. TIPOS DE MODELOS.....	39
3.3. MODELOS ELÉCTRICOS	40
3.3.1 <i>Thevenin Lineal</i>	40
3.3.2 <i>Thevenin Capa Simple</i>	40
3.3.3 <i>Thevenin Doble Capa</i>	42
3.3.4 <i>Thevenin Runtime</i>	44
3.3.5 <i>Thevenin-Shepherd</i>	44
3.4. ESTADO DE CARGA DE LA BATERÍA	48
3.5. CAPACIDAD DE CORRIENTE	50
3.6. VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO DE LA BATERÍA	51
3.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	53

CAPÍTULO 4. MODELO DE BATERÍA LITIO-ION, SIMULACIONES Y RESULTADOS.....	54
4.1. INTRODUCCIÓN	54
4.2. MODELO DE BATERÍA LITIO-ION	54
4.3. EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK	55
4.4. SIMULACIÓN CLI PANASONIC NCR18650PF	57
4.4.1 Prueba Carga Nominal	57
4.4.2 Prueba Impacto de Carga	59
4.4.3 Prueba Disminución de Carga.....	60
4.5. SIMULACIÓN CLI LG CHEM E66A	62
4.5.1 Prueba Carga Nominal	62
4.5.2 Prueba Impacto de Carga	64
4.5.3 Prueba Disminución de Carga.....	65
4.6. SIMULACIÓN CLI PANASONIC NCR20700A.....	67
4.6.1 Prueba Carga Nominal	67
4.6.2 Prueba Impacto de Carga	69
4.6.3 Prueba Disminución de Carga.....	70
4.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE BATERÍAS LITIO-ION	72
CAPÍTULO 5. CONVERTIDOR FUENTE DE VOLTAJE TRIFÁSICO DOS NIVELES	74
5.1. INTRODUCCIÓN	74
5.2. CARACTERÍSTICAS DEL CONVERTIDOR TRIFÁSICO DOS NIVELES	74
5.2.1 Interruptor de Potencia.....	76
5.2.2 Modelo Matemático del Convertidor	76
5.2.3 Limitaciones del Convertidor.....	81
5.3. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO DE RED TRIFÁSICO	82
5.3.1 Transformación $\alpha\beta$	84
5.3.2 Transformación dq	86
5.4. MODULACIÓN PWM	89
5.5. PHASE LOCKED LOOP (PLL).....	91
5.6. ANÁLISIS PLANTA DEL SISTEMA.....	92
5.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	96
CAPÍTULO 6. CONTROL DEL CONVERTIDOR	97
6.1. CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL	97
6.2. CONTROL CONEXIÓN EN CASCADA VOLTAJE-CORRIENTE	99
6.3. ANÁLISIS DE CONTROL DEL CONVERTIDOR	101
6.4. DISEÑO DE CONTROLADORES	102
6.4.1 Control Interno de Corriente Batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V.....	102
6.4.2 Control Externo de Voltaje Batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V	103
6.4.3 Control Interno de Corriente Batería Tesla Model S 400 V	104
6.4.4 Control Externo de Voltaje Batería Tesla Model S 400 V	105
6.4.5 Control Interno de Corriente Batería Porsche Taycan 800 V	106
6.4.6 Control Externo de Voltaje Batería Porsche Taycan 800 V	106
6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
CAPÍTULO 7. SIMULACIONES Y RESULTADOS DEL SISTEMA.....	108
7.1. INTRODUCCIÓN	108
7.2. BATERÍA DE LITIO POWERWALL 2 AC TESLA 100 V	108
7.2.1 Prueba Carga Nominal Batería 100 V.....	111
7.2.2 Prueba Impacto de Carga Batería 100 V.....	113
7.2.3 Prueba Máximo Impacto de Carga Batería 100 V.....	115
7.3. BATERÍA DE LITIO TESLA MODEL S 400 V	120

7.3.1	<i>Prueba Carga Nominal Batería 400 V.....</i>	<i>122</i>
7.3.2	<i>Prueba Impacto de Carga Batería 400 V.....</i>	<i>124</i>
7.3.3	<i>Prueba Impacto de Carga Máximo Batería 400 V.....</i>	<i>126</i>
7.4.	BATERÍA DE LITIO PORSCHE TAYCAN 800 V.....	131
7.4.1	<i>Prueba Carga Nominal Batería de 800 V.....</i>	<i>133</i>
7.4.2	<i>Prueba Impacto de Carga Batería de 800 V.....</i>	<i>135</i>
7.4.3	<i>Prueba Impacto de Carga Máximo Batería 800 V.....</i>	<i>137</i>
7.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	142
	CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	144
8.1.	SUMARIO	144
8.2.	CONCLUSIONES	145
8.3.	TRABAJO FUTURO	146
	BIBLIOGRAFÍA.....	147
	ANEXO A. CÁLCULO DE PARÁMETROS BANCO DE BATERÍAS	152
	ANEXO B. DATOS TÉCNICOS	153
B.1.	CLI PANASONIC NCR20700A	153
B.2.	CLI PANASONIC NCR18650PF.....	154
B.3.	CLI LG CHEM E66A.....	155

Lista de Tablas

TABLA 3.1 CELDA LI-ION LG CHEM E66A	49
TABLA 4.1 CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR18650PF	57
TABLA 4.2 CELDA LITIO-ION LG CHEM E66A	62
TABLA 4.3 CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR20700A.....	67
TABLA 4.4 RESULTADOS CARGA NOMINAL	72
TABLA 4.5 RESULTADOS IMPACTO DE CARGA	72
TABLA 4.6 RESULTADOS DISMINUCIÓN DE CARGA.....	72
TABLA 4.7 ANÁLISIS DE COMPARACIÓN ENTRE LAS CLI.....	73
TABLA 7.1. PARÁMETROS DEL SISTEMA PARA BANCO DE 100 V	108
TABLA 7.2. PARÁMETROS DEL BANCO DE BATERÍA POWERWALL 2 AC TESLA.	109
TABLA 7.3. PARÁMETROS DE CONTROL EN CASCADA DEL SISTEMA PARA BANCO DE BATERÍA POWERWALL 2 AC TESLA.	109
TABLA 7.4. PARÁMETROS DEL SISTEMA, IMPACTO DE CARGA MÁXIMO BANCO DE BATERÍA POWERWALL 2 AC TESLA 100 V	115
TABLA 7.5. PARÁMETROS DEL SISTEMA PARA BANCO DE 400 V	120
TABLA 7.6. PARÁMETROS DEL BANCO DE BATERÍA TESLA MODEL S 400 V	120
TABLA 7.7. PARÁMETROS DE CONTROL EN CASCADA DEL SISTEMA PARA BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S.....	121
TABLA 7.8. PARÁMETROS DEL SISTEMA, IMPACTO DE CARGA MÁXIMO BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V	126
TABLA 7.9. PARÁMETROS DEL SISTEMA PARA BANCO DE 800 V	131
TABLA 7.10. PARÁMETROS DEL BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V	131
TABLA 7.11. PARÁMETROS DE CONTROL EN CASCADA DEL SISTEMA PARA BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN.	132
TABLA 7.12. PARÁMETROS DEL SISTEMA, IMPACTO DE CARGA MÁXIMO BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V	137
TABLA 7.13. PRUEBA NOMINAL	142
TABLA 7.14. PRUEBA IMPACTO DE CARGA.....	142
TABLA 7.15. PRUEBA MÁXIMO IMPACTO DE CARGA.....	142
TABLA B.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CLI LG CHEM E66A	155

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 COMPARACIÓN DE LAS ESCALAS DE POTENCIA Y TIEMPO DE DESCARGA DE VARIOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	16
FIGURA 2.1 GRÁFICO ENTRE DENSIDADES DE ENERGÍA ESPECÍFICA Y VOLUMÉTRICA DE DIFERENTES TIPOS DE BATERÍAS RECARGABLES	30
FIGURA 2.2 ESQUEMA DE UNA CELDA DE LITIO DURANTE LA CARGA Y DESCARGA	32
FIGURA 2.3 ESQUEMA DE FORMAS DE CELDAS CON CARACTERÍSTICAS DE SEGURIDAD	34
FIGURA 2.4 CONVERTIDOR FUENTE DE VOLTAJE.	35
FIGURA 2.5 CARACTERÍSTICAS DE SEMICONDUCTORES	35
FIGURA 2.6 SISTEMA EMULADOR PARA BATERÍAS DE LITIO.....	37
FIGURA 3.1 MODELO LINEAL	40
FIGURA 3.2 MODELO CAPA SIMPLE	41
FIGURA 3.3 MODELO VARIANTE CAPA SIMPLE	42
FIGURA 3.4 MODELO DOBLE CAPA	43
FIGURA 3.5 MODELO THEVENIN RUNTIME	44
FIGURA 3.6 MODELO THEVENIN-SHEPHERD	45
FIGURA 3.7 DIAGRAMA DE BLOQUES SOC.....	48
FIGURA 3.8 ESTADO DE CARGA	49
FIGURA 3.9 CURVA DE DESCARGA TÍPICA DE LA BATERÍA DE LITIO A CORRIENTE CONSTANTE	51
FIGURA 4.1 MODELO DE BATERÍA LITIO-ION	54
FIGURA 4.2 ESTADO DE CARGA DEL MODELO DE BATERÍA LITIO-ION	55
FIGURA 4.3 VOLTAJE DEL MODELO BATERÍA LITIO-ION.....	56
FIGURA 4.4 BLOQUE BATERÍA LITIO-ION MATLAB/SIMULINK	56
FIGURA 4.5 SIMULACIÓN CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR18650PF.....	57
FIGURA 4.6 VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE AMBAS RESPUESTAS PANASONIC NCR18650PF.....	58
FIGURA 4.7 CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR18650PF.....	58
FIGURA 4.8 SIMULACIÓN CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR18650PF, IMPACTO DE CARGA.....	59
FIGURA 4.9 SIMULACIÓN CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR18650PF, DISMINUCIÓN DE CARGA.....	60
FIGURA 4.10 SIMULACIÓN CELDA LITIO-ION LG CHEM E66A.....	62
FIGURA 4.12 CELDA LITIO-ION LG CHEM E66A.....	63
FIGURA 4.13 SIMULACIÓN CELDA DE LITIO-ION LG CHEM E66A, IMPACTO DE CARGA	64
FIGURA 4.14 SIMULACIÓN CELDA DE LITIO-ION LG CHEM E66A, DISMINUCIÓN DE CARGA.....	65
FIGURA 4.15 SIMULACIÓN CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR20700A	67
FIGURA 4.16 VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE AMBAS RESPUESTAS PANASONIC NCR20700A	68
FIGURA 4.17 CELDA LITIO-ION PANASONIC NCR20700A	68
FIGURA 4.18 SIMULACIÓN CELDA DE LITIO-ION PANASONIC NCR20700A, IMPACTO DE CARGA	69
FIGURA 4.19 SIMULACIÓN CELDA DE LITIO-ION PANASONIC NCR20700A, DISMINUCIÓN DE CARGA ...	70

FIGURA 5.1 CONVERTIDOR FUENTE DE VOLTAJE TRIFÁSICO DOS NIVELES	75
FIGURA 5.2 REPRESENTACIÓN TRANSISTOR IGBT	76
FIGURA 5.3 CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DEL CONVERTIDOR (A) TRANSISTOR IGBT SUPERIOR ENCENDIDO, (B) TRANSISTOR IGBT INFERIOR ENCENDIDO.....	77
FIGURA 5.4 DISTRIBUCIÓN TENSIÓN DE RED TRIFÁSICA	83
FIGURA 5.5 MARCO DE REFERENCIA $\alpha\beta$	85
FIGURA 5.6 COORDENADA dq	88
FIGURA 5.7 DIAGRAMA DE BLOQUES EN LA GENERACIÓN DE SEÑALES PARA MODULACIÓN SPWM ..	89
FIGURA 5.8 ESQUEMA DE SEGUIMIENTO DE FASE BLOQUE PLL	91
FIGURA 6.1 DIAGRAMA DE BLOQUE CONTROLADOR PI	98
FIGURA 6.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DE CONTROL SIMPLIFICADO ENLACE DC	99
FIGURA 6.3 CONTROL EN CASCADA, CAMBIO DE COORDENADAS Y MODULACIÓN DEL SISTEMA EMULADOR DE BATERÍAS	102
FIGURA 6.4 LGR LAZO CERRADO DE CORRIENTE PARA BATERÍA POWERWALL 2 AC TESLA 100 V	103
FIGURA 6.5 LGR LAZO CERRADO DE VOLTAJE PARA BATERÍA POWERWALL 2 AC TESLA 100 V	104
FIGURA 6.6 LGR LAZO CERRADO DE CORRIENTE PARA BATERÍA TESLA MODEL S 400 V	104
FIGURA 6.7 LGR LAZO CERRADO DE VOLTAJE PARA BATERÍA TESLA MODEL S 400 V	105
FIGURA 6.8 LGR LAZO CERRADO DE CORRIENTE PARA BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V	106
FIGURA 6.9 LGR LAZO CERRADO DE VOLTAJE PARA BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V	107
FIGURA 7.1 VOLTAJES BANCO DE BATERÍAS POWERWALL AC 2 TESLA 100 V, CLI PANASONIC NCR20700A	111
FIGURA 7.2 CORRIENTES BANCO BATERÍAS POWERWALL AC 2 TESLA 100 V, CLI PANASONIC NCR20700A	111
FIGURA 7.3 ESPECTRO ARMÓNICO CORRIENTES DE LÍNEA DEL SISTEMA EMULADOR PARA POWERWALL 2 AC TESLA 100 V	112
FIGURA 7.4 VARIACIÓN ENTRE LOS VOLTAJES DE REFERENCIA DE MATLAB Y SISTEMA EMULADOR DE BATERÍAS LITIO-ION, POWERWALL 2AC TESLA 100 V	112
FIGURA 7.5 BANCO DE BATERÍAS POWERWALL 2 AC TESLA 100 V, IMPACTO DE CARGA	113
FIGURA 7.6 CORRIENTES BANCO DE BATERÍAS POWERWALL 2 AC TESLA 100 V, IMPACTO DE CARGA	113
FIGURA 7.7 VOLTAJES MODELO BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB, POWERWALL 2 AC TESLA 100 V	114
FIGURA 7.8 VARIACIÓN ENTRE LOS VOLTAJES, SISTEMA EMULADOR BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB, POWERWALL 2 AC TESLA 100 V, IMPACTO DE CARGA	114
FIGURA 7.9 BANCO DE BATERÍAS POWERWALL 2 AC TESLA 100 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	116
FIGURA 7.10 CORRIENTES BANCO DE BATERÍAS POWERWALL 2 AC TESLA 100 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	116
FIGURA 7.11 VOLTAJES Y ESTADO DE CARGA MODELO BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB POWERWALL 2 AC TESLA 100 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	117
FIGURA 7.13 CORRIENTES BANCO BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V, CLI PANASONIC NCR18650PF	122
FIGURA 7.12 VOLTAJES BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V, CLI PANASONIC NCR18650PF ..	122

FIGURA 7.14 ESPECTRO ARMÓNICO CORRIENTES DE LÍNEA DEL SISTEMA EMULADOR PARA BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V	123
FIGURA 7.15 VARIACIÓN ENTRE LOS VOLTAJES, SISTEMA EMULADOR PARA BATERÍAS DE LITIO Y REFERENCIA MATLAB, TESLA MODEL S 400 V.....	123
FIGURA 7.16 BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V, IMPACTO DE CARGA.....	124
FIGURA 7.17 CORRIENTES BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V, IMPACTO DE CARGA	124
FIGURA 7.18 VOLTAJES MODELO BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB, TESLA MODEL S 400 V	125
FIGURA 7.19 VARIACIÓN ENTRE LOS VOLTAJES, SISTEMA EMULADOR PARA BATERÍAS DE LITIO Y REFERENCIA MATLAB, BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V, IMPACTO DE CARGA	125
FIGURA 7.20 BANCO DE BATERÍA TESLA MODEL S 400 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	127
FIGURA 7.21 CORRIENTES BANCO DE BATERÍA TESLA MODEL S 400 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	127
FIGURA 7.22 VOLTAJES Y ESTADO DE CARGA MODELO BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB BANCO DE BATERÍAS TESLA MODEL S 400 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	128
FIGURA 7.23 VOLTAJES BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V, CLI LG CHEM E66A	133
FIGURA 7.24 CORRIENTES BANCO BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V, CLI LG CHEM E66A.....	133
FIGURA 7.25 ESPECTRO ARMÓNICO CORRIENTES DE LÍNEA DEL SISTEMA EMULADOR PARA BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V	134
FIGURA 7.26 VARIACIÓN ENTRE LOS VOLTAJES, SISTEMA EMULADOR BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB, PORSCHE TAYCAN 800 V	134
FIGURA 7.27 BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V, IMPACTO DE CARGA	135
FIGURA 7.28 CORRIENTES BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V, IMPACTO DE CARGA.....	135
FIGURA 7.29 VOLTAJES MODELO BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB, PORSCHE TAYCAN 800 V	136
FIGURA 7.30 VARIACIÓN ENTRE LOS VOLTAJES, SISTEMA EMULADOR PARA BATERÍAS DE LITIO Y REFERENCIA MATLAB, BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V, IMPACTO DE CARGA	136
FIGURA 7.31 BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	138
FIGURA 7.32 CORRIENTES BANCO DE BATERÍA PORSCHE TAYCAN 800 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA	138
FIGURA 7.33 VOLTAJES Y ESTADO DE CARGA MODELO BATERÍA LITIO-ION Y REFERENCIA MATLAB BANCO DE BATERÍAS PORSCHE TAYCAN 800 V, MÁXIMO IMPACTO DE CARGA.....	139
FIGURA B.1. DATOS TÉCNICOS CLI PANASONIC NCR20700A	153
FIGURA B.2. CLI PANASONIC NCR18650PF	154

Nomenclatura

Matrices

$\mathbf{M}$: Matriz de conmutación de los interruptores de potencia

Vectores

$\mathbf{V}_s^{abc}$: Vector voltaje de red trifásica

$\mathbf{I}_s^{abc}$: Vector de corrientes de línea

Escalares

E : Voltaje de circuito abierto

R_{int} : Resistencia interna

E_0 : Voltaje de circuito abierto a máxima capacidad de la batería

Q : Capacidad nominal de corriente de la batería

V_{bat} : Voltaje de batería y la resistencia interna

i : Corriente de la batería

it : Capacidad de corriente extraída

A : Factor caída de voltaje en la zona exponencial

K : Coeficiente de voltaje de polarización

B : Factor de capacidad de tiempo inverso en la zona exponencial

Q_{exp} : Capacidad de corriente en el fin de la zona exponencial

$SoC(t)$: Estado de carga em función del tiempo

SoC_0 : Estado de carga inicial

E_M : Voltaje máximo zona exponencial

E_{exp} : Voltaje final de la zona exponencial

K_p : Ganancia proporcional

K_i : Constante tiempo integrativo

Q_{nom} : Capacidad de corriente en el fin de la zona nominal

Abreviaciones

Mayúsculas

AC	: Alternating Current (Corriente Alterna)
DC	: Direct Current (Corriente Directa)
CLI	: Celda de Litio-Ion
VSC	: Voltage Source Converter (Convertidor Fuente de Voltaje)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Puerta Aislada)
SoC	: State of Charge (Estado de Carga)
LVK	: Ley de Voltaje de Kirchhoff
AFE	: Active Front End (Convertidor de Frente Activo)
PLL	: Phase Locked Loop (Lazo de Seguimiento de Fase)
PI	: Proportional and Integrative (Proporcional e Integral)
PWM	: Pulse Width Modulation (Modulación Ancho de Pulso)
SPWM	: Sinusoidal Pulse Width Modulation (Modulación Senoidal por Ancho de Pulso)
LCK	: Ley de Corriente de Kirchhoff
BMS	: Battery Management Systems (Sistema de Gestión de Baterías)
EV	: Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico)
F. de T.	: Función de transferencia
UPS	: Uninterruptible Power Supply (Fuente de Poder Ininterrumpible)
VSI	: Voltage Source Inverter (Inversor Fuente de Voltaje)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronic Engineering (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)
BESS	: Battery Energy Storage System (Sistema de Almacenamiento de Energía en Baterías)
SMES	: Superconducting Magnetic Energy Storage (Almacenamiento de Energía Magnética por Superconducción)
ESS	: Energy Storage System (Sistema de Almacenamiento de Energía)
LGR	: Lugar Geométrico de las Raíces
HESS	: Hybrid Energy Storage System (Sistema de Almacenamiento de Energía Híbrida)

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En la actualidad, el cambio climático y sus consecuencias han dirigido a la humanidad a concientizar sobre los efectos medioambientales que conlleva para el planeta. Ante esta situación, se impone un desafío en conservar nuestro ambiente y crear soluciones que mantengan esta armonía. La Ingeniería Eléctrica cumple con un factor esencial para cubrir estas nuevas demandas, y a partir de la ciencia, comprender estos retos y coexistir amablemente con el entorno.

El sector de la energía eléctrica se enfrenta a transformaciones y retos sin precedentes con la implantación de redes inteligentes. Este nuevo paradigma ha surgido para construir un sistema de energía eléctrica flexible que se coordine mejor con los recursos energéticos, con el objetivo de ofrecer un suministro eléctrico sostenible, económico y seguro [31]. De esta manera, tras diversos desarrollos en investigación y tecnología, el estudio en fuentes de energías limpias ha alcanzado un hito en la renovación de matrices energéticas en todo el mundo, dando un paso importante en la necesidad de construir un modelo de desarrollo sustentable, que resguarde equitativamente los intereses de las generaciones presentes y futuras.

Las energías renovables (energía eólica, solar, termosolar, geotérmica, etc.), han crecido en sus instalaciones a ritmo constante en varios países del mundo, este aumento en generación de energías limpias, ayuda a expandir su acceso, y así, apoyar a mitigar los efectos del cambio climático. Sin embargo, su disponibilidad es intermitente, para suprimir las fluctuaciones de energías renovables se necesitan almacenar los excedentes de energía [20]. Esto es clave para aprovechar el potencial de las energías renovables que van a la vanguardia con la nueva revolución eléctrica, marcando el auge en el desarrollo de procesos industriales y cotidianos para el beneficio de la humanidad.

Avanzar en el almacenamiento energético es un desafío ineludible para avanzar en la transición energética, ecológica y los nuevos requerimientos industriales que se exigen en efecto de lo anterior. Se espera un mercado potencial de almacenamiento de energía, impulsado principalmente por la creciente incorporación de fuentes de energías renovables y la transformación del sector energético, incluyendo nuevas aplicaciones de redes inteligentes [31]. Existen muchas tecnologías capaces de almacenar energía tales como el almacenamiento térmico, almacenamiento mecánico mediante volantes de inercia o Flywheels, almacenamientos químicos como celdas de combustible de

hidrógeno, almacenamientos eléctricos mediante supercapacitores, Energía Magnética por Superconducción (SMES, siglas en inglés), y almacenamiento electroquímicos que mediante un proceso de reacciones químicas, se genera una diferencia de potencial eléctrico entre ánodo y cátodo [35], su uso es a gran escala, sus prestaciones van de acuerdo a su composición química y requerimientos. En la Figura 1.1, se muestran las tecnologías de almacenamiento de energía, donde se comparan en escala de potencia y tiempo de descarga. En este documento se estudiarán las baterías de litio que son muy utilizadas en múltiples procesos actuales como energías limpias, electromovilidad, exploración espacial y sistemas satelitales, su amplio rango de potencia nominal y tiempos de descarga conforme a las condiciones de operación. Es por esto que estos sistemas de almacenamiento de energía a baterías (BESS, siglas en inglés), son fundamentales para satisfacer las necesidades dinámicas de los modernos sistemas eléctricos.

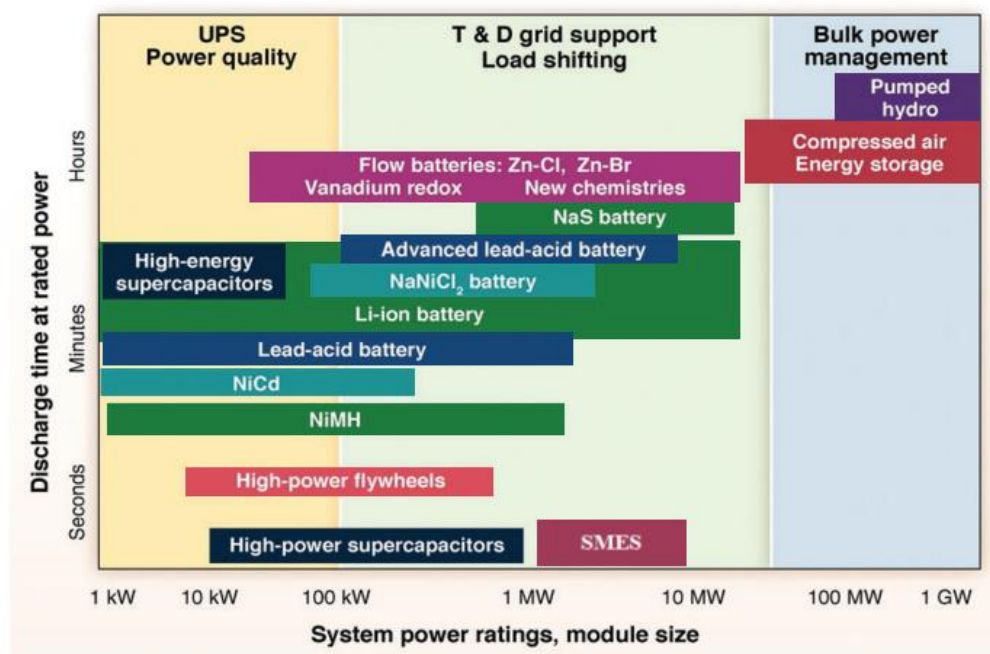


Figura 1.1 Comparación de las Escalas de Potencia y Tiempo de Descarga de Varios Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica [20].

En los experimentos al utilizar baterías de litio reales, tienen el problema de no entregar sus mismas prestaciones de capacidad después de cada prueba, el suministro de corriente hace variar los parámetros iniciales tales como el estado de carga (SoC, siglas en inglés), y, por consiguiente, alterar lectura de resultados por no proporcionar la repuesta adecuada. Otra razón por la que este medio de pruebas no es el correcto, es cuando se presenta el montaje de los bancos de baterías para la ejecución

de los experimentos, la réplica de esta prueba involucraría el montaje de nuevos bancos, lo que incrementaría el desafío en fabricación y de recursos económicos, volviéndose contaminante, peligroso y costoso. Esto ha llevado a encontrar formas de modelamiento más precisas para las baterías de litio, de tal manera, de saber con exactitud su comportamiento dinámico frente a los diversos requerimientos en los sistemas eléctricos. La solución es utilizar un Sistema Emulador que está conformado principalmente por una interfase de electrónica de potencia y un modelo de baterías [5], para que sea capaz de replicar el comportamiento dinámico de distintos tipos de baterías de litio y requerimientos de carga que se vea involucrado el sistema de almacenamiento real, otorgando un beneficioso sistema de pruebas afable con el medio ambiente y atractiva opción económica.

Existen varios tipos de modelamientos para esta batería, entre los que se destacan los modelos electroquímicos y basados en circuitos eléctricos, que reproducen su comportamiento, conforme a lo anterior, en el presente documento se utilizará un circuito basado en Thevenin, en conjunto con la ecuación de Shepherd que se usa para resolver el voltaje de circuito abierto, conformando el modelo de Thevenin-Shepherd [5], que es apropiado para representar el comportamiento de las variables eléctricas de una batería real de litio. El programa de Simulación Matlab/Simulink contiene un modelo semejante, mediante un bloque de simulación, su representación es basada en el modelo de Thevenin-Shepherd, este en su operación considera el estado de carga y temperatura, el estudio de este modelo sirve como referencia para realización del modelo de baterías. Los valores de resistencia interna y parámetros de la curva de descarga serán constantes para la realización de las simulaciones, estos parámetros se pueden calcular mediante ecuaciones o estudiando la curva de descarga de la hoja técnica de la batería.

Sin embargo, para lograr el Sistema Emulador de Baterías, se debe agregar un convertidor de energía eléctrica a su configuración para ofrecer en la operación un ambiente controlado. Desde la invención del transistor en 1948 por John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, los semiconductores desempeñan un papel importante en el desarrollo de la sociedad moderna. En específico para el Sistema Emulador se agrega un dispositivo de electrónica de potencia basado en convertidores de fuente de voltaje (VSC singlas en inglés), Dos Niveles o AFE que se constituye de seis semiconductores de tipo Transistor Bipolar de Puerta Aislada (IGBT, siglas en inglés) y diodos en antiparalelo, estos convertidores de potencia poseen propiedades inherentes, se caracterizan por su capacidad de controlar tanto el encendido como el apagado del semiconductor, flujo bidireccional de potencia, control independiente de potencia activa y reactiva, puede garantizar un factor de potencia unitario y baja distorsión armónica si se compara con rectificadores basados en semiconductores que

operan a menor frecuencia de conmutación. El Sistema Emulador debe ser evaluado a distintos perfiles de requerimiento en la carga, este va conectado a un sistema AC trifásico y un enlace DC, de este último, se debe controlar la respuesta del capacitor para hacerse cargo en seguir la referencia de voltaje que instaura del modelo de batería, este simula el comportamiento en descarga de cualquier marca de celdas de litio, las pruebas se realizan con baterías de empresas consolidadas en el mercado, tales como Panasonic y LG Chem, que son utilizadas en una variedad de aplicaciones dentro de los modernos sistemas de potencia, específicamente, para este proyecto, se enfoca en el área de los EV, empresas como Tesla y Porsche, están asociadas a estas industrias de baterías, que suministran su producción para la fabricación de bancos de almacenamiento de energía necesarios para el sistema eléctrico de sus modelos de automóviles.

También se realizan pruebas para los bancos de baterías mediante el Sistema Emulador, simulando respecto a las prestaciones reales dadas por el fabricante, el seguimiento de voltaje del modelo de batería por parte del convertidor es realizado por controladores lineales, estos consiguen resultados eficaces respecto a las competencias que se buscan de este proyecto, en particular, en su diseño se emplean controladores PI en conexión en cascada con un lazo interno de corriente en eje directo y un lazo externo de voltaje DC. Además, se debe agregar un sistema de seguimiento de fase (PLL siglas en inglés), para luego utilizar transformaciones de Clarke y Park para el correcto funcionamiento del convertidor. El estudio de esta tecnología de almacenamiento, a través, del Sistema Emulador, logra conocer el comportamiento a partir de los requerimientos en sistemas de cualquier área en que las baterías de litio sean necesarias. Además, cabe destacar, que este Sistema Emulador de baterías considera el comportamiento de variables eléctricas dentro de su proceso de réplica y no agrega parámetros de temperatura en la realización de este proyecto de Ingeniería.

1.2. Trabajos Previos

En esta sección se presenta la revisión bibliográfica utilizada, que entregan los conceptos que sustentarán el Sistema Emulador en Descarga para Baterías de Litio, y entregarán herramientas para llevar a cabo la simulación de distintas pruebas y obtener los resultados esperados para el trabajo. Los documentos se basan sobre las baterías de litio y modelamiento, estudio del convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles.

A continuación, se detalla la bibliografía utilizada para cumplir con el objetivo abordado y ha sido obtenida en documentos IEEE, libros, proyectos de título.

1.2.1 Batería de Litio y Modelamiento

- ♣ Y. Wu. (2018), “Non-Invasive Aging Detection Methods of Lithium-Ion Batteries”, Título Académico Doctorado en Ingeniería, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Technische Universität München, Múnich. [1]

En esta Tesis se presenta un estudio de envejecimiento de baterías de litio, en el que se examinan celdas de tipo bolsa compuestas por un cátodo con mezclas de carbonatos orgánicos que contienen sales de litio y el ánodo constituido por grafito. Se investigan con experimentos los efectos de la temperatura, la corriente de carga y la corriente de descarga en el envejecimiento de la batería.

- ♣ J. Jiang, C. Zhang (2015) “Fundamentals and Applications of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles” Wiley. [2]

Este libro se enfoca en exponer sistemáticamente la connotación teórica y la aplicación práctica de los sistemas de gestión de baterías de litio, se discute tecnologías clave y los métodos de investigación. Los contenidos incluyen el modelado y la simulación del rendimiento de las baterías de litio; la teoría, métodos de estimación del estado de carga de la batería de litio; el estado de energía y la potencia máxima; bancos de baterías, diseño y aplicación del sistema de gestión de baterías en los vehículos eléctricos.

- ♣ R. Arunachala. (2017), “Influence of Cell Size on Performance and Lifetime of Lithium-Ion Batteries”, Título Académico Doctorado en Ingeniería, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, Múnich. [3]

Esta tesis tiene como objetivo estudiar como el aumento de tamaño de la celda introduce fenómenos como la temperatura no uniforme, la densidad de corriente y la distribución del estado de carga. Estas causas provocan una utilización no uniforme del material activo de la celda y a largo plazo, pueden provocar un envejecimiento localizado y el fin prematuro de la celda. Se seleccionaron celdas cilíndricas y de bolsa comerciales para la investigación del tamaño. Las celdas fueron elegidas de la misma química y del mismo fabricante.

- ♣ T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeus, P. Le Moigne (2013), “Li-Ion Battery Emulator for Electric Vehicle Applications” in IEEE Vehicle Power and propulsion Conference. [4]

Este trabajo se ha desarrollado un emulador de batería particular basado en un dispositivo de electrónica de potencia con un modelo de batería mejorado. El sistema desarrollado permite al usuario probar el vehículo eléctrico en diversas condiciones ambientales o de comportamiento de la batería. La ventaja de este sistema es su capacidad para variar los parámetros internos de la batería y también la creación de un modelo por defecto de forma segura.

- ♣ R. Hidalgo León (2017), “Simulación de Emulador de Descarga para Baterías Litio-Ion Basado en Circuitos Equivalentes Eléctricos Obtenidos con las Técnicas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica y Extracción de Parámetros en el Dominio del Tiempo,” Tesis Grado Magister en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile. [5]

Esta tesis muestra los resultados de las simulaciones de un emulador de descarga para baterías de litio. La celda de batería estudiada es de 3.7V-4Ah. El emulador se conforma principalmente por un modelo de batería en su configuración en línea y un convertor de voltaje boost tipo multifases. El modelo Thevenin-Shepherd es el utilizado para caracterizar la batería, ese consta de un circuito eléctrico basado en Thevenin en conjunto con la ecuación modificada de voltaje de circuito abierto de Shepherd.

- ♣ O. Tremblay, L. Dessaint, A. Dekkiche (2007), “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles”, in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. [6]

Este trabajo presenta un modelo de batería fácil de usar aplicado a un software de simulación dinámica. El modelo de simulación utiliza sólo el Estado de Carga (SoC) de la batería como variable de estado para evitar el problema del bucle algebraico. Se demuestra que este modelo, compuesto por una fuente de tensión controlada en serie con una resistencia, puede representar con precisión cuatro tipos de baterías. Los parámetros del modelo pueden extraerse fácilmente de la curva de descarga del fabricante, lo que permite un fácil uso del modelo.

- ♣ C. Burgos Mellado (2013), “Estimación del Estado de Carga para un Banco de Baterías Basado en Modelación Difusa y Filtro Extendido de Kalman,” Memoria de Título, Ingeniero Civil Electricista y Tesis Grado Magister en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile. [7]

Esta tesis se centra en el estudio del estado de carga para baterías del tipo plomo ácido y también presenta los principios de una batería de litio, los diferentes tipos de modelamiento que la caracterizan y ecuaciones que permiten conocer el comportamiento de la batería, de los que se destaca el modelo de doble capa y Thevenin–Shepherd. Además, se estudia las ecuaciones del SoC y voltaje de batería.

- ♣ N. Rebolledo Ruiz. (2019), “Balance de SOC's de Baterías por Medio del MMSPC con Transferencia de Energía del Tipo Inductor Conmutado” Habilitación Profesional, Título Ingeniero Civil Eléctrico, Departamento de Medio Ambiente y Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción. [8]

En esta tesis comprende el análisis de distintas tecnologías de baterías, topologías de convertidores DC–DC, el estudio del convertidor propuesto y la estimación del estado de carga en la batería de litio mediante el método contable contador de Coulomb. Todo esto con el fin de obtener un balance intrínseco del SoC de las baterías.

- ♣ H. Ferreira Estrada. (2021), “Convertidor de Potencia Parcial Bidireccional para Sistema de Almacenamiento Híbrido de Vehículo Eléctrico” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Electrónico y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso. [9]

Esta tesis comprende el análisis de una configuración de potencia parcial basado en Dual-Active Bridge es propuesto como interfaz de potencia para incrementar la densidad de potencia de un tren de potencia para vehículo eléctrico basado en HESS mediante baterías de litio y supercapacitores. Finalmente, un exhaustivo análisis de eficiencia y resultados dinámicos transientes son presentados para validar la configuración de potencia propuesta.

1.2.2 Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico Dos Niveles

- ♣ A. Yazdani, R. Iravani (2010), “Voltage-Sourced Converters in Power Systems, Control, and Applications” IEEE Press – Wiley. [10]

Este libro presenta los fundamentos para el análisis y el control de una clase específica de convertidores electrónicos de alta potencia: el convertidor trifásico fuente de voltaje (VSC). Aborda la modelización matemática, el análisis y diseño de control de estos convertidores de potencia. presenta diferentes clases de aplicaciones del VSC en los sistemas de energía eléctrica, proporciona un enfoque sistemático para modelar un sistema basado en VSC con respecto de su clase de aplicación.

- ♣ M. Pérez, R. Lizana Fuentes, J. Rodríguez (2011), “Predictive Control of DC-Link Voltage in an Active-Front-End Rectifier” in IEEE International Symposium on Industrial Electronics. [11]

En esta publicación se presenta un rectificador de frente activo (AFE), el control DC del convertidor es realizado comúnmente por controladores PI, sin embargo, este controlador es difícil de diseñar y presenta un comportamiento dinámico restringido. Es por esto, que en este trabajo se propone un control predictivo de tensión DC, este control presenta un comportamiento de fase no mínima que produce una dinámica inversa inicial y que induce a error de optimización seleccionando un estado de conmutación erróneo, no obstante, el controlador predictivo propuesto obtiene resultados de simulación con buena respuesta dinámica y un error cero en estado estacionario.

- ♣ L. Wang, S. Chai, D. Yoo, L. Gan, K. Ng (2015), “PID and Predictive Control of Electrical Drives and Power Converters using MATLAB / Simulink” IEEE Press – Wiley. [12]

Este libro ofrece una introducción al control automático de los accionamientos eléctricos y de VSC conectados a la red, así como a los últimos avances en el campo del control automático de estos convertidores, así como los últimos avances en su diseño e implementación. El libro consta del diseño del sistema de control, la implementación y la sintonización de los sistemas de control PI del VSC. Hay dos enfoques utilizados en este libro para generar la señal de puerta para los interruptores semiconductores. El primer enfoque utiliza la modulación de anchura de pulso (PWM), en la que se basan los controladores PID y los controladores tradicionales de predicción.

- ♣ A. Thapa, M. Sudhan Chinthavali (2020), “Dynamic Model of Active Front-End Converters with 2DOF-PI Controllers for DC Bus Voltage Control” in IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). [13]

Este trabajo propone un controlador proporcional-integral de dos grados de libertad (2DOF-PI) para la regulación de la tensión del bus de corriente continua en convertidor de frente activo (AFE). Este controlador elimina el cero del semi plano izquierdo en la función de transferencia comando-salida para la regulación de la tensión del bus de corriente continua que es inherente al controlador proporcional-integral de un grado de libertad convencional 1DOF-PI para esta aplicación.

- ♣ D. Jovcic (2020), “High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids” Wiley. [14]

Este libro ofrece un exhaustivo análisis de tecnologías HVDC en particular los VSC dos niveles y multinivel, aborda una profunda comprensión de los convertidores fuente de voltaje, diseño de sistemas, principios de funcionamiento, modelamiento matemático y control del sistema. El libro ofrece un estudio del campo técnico de la transmisión HVDC que se extiende en tres grandes disciplinas de la ingeniería eléctrica: La ingeniería de transmisión de potencia, electrónica de potencia e ingeniería de control.

- ♣ J. Osorio Paveri (2018), “Implementación Experimental de Sistema de Carga con Control de Torque y Capacidad de Regeneración” Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil Electricista, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago de Chile. [15]

En esta tesis se implementa un sistema de carga rotatoria controlada que permite simular el perfil de conducción y cuyo accionamiento, además, tiene la capacidad de inyectar la energía regenerada hacia la red de alimentación. El sistema emulador consiste de un sistema rotatorio inercial conformado por dos máquinas acopladas, además de un circuito rectificador de frente activo controlado mediante plataformas digitales de control DSP+FPGA, con respecto al control, se utilizó un lazo anidado externo de tensión DC.

- ♣ G. Cruz Pinto (2018), “Desarrollo de un Sistema de Almacenamiento de Baterías con Conexión Flexible a Micro Redes” Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile. [16]

En esta tesis se encuentra el estudio, diseño e implementación de un sistema de almacenamiento de baterías (BESS) de baja escala para micro redes. El sistema estudiado está formado por un convertidor, Para emular una micro red, se utiliza una inductancia de enlace para simular líneas de transmisión o transformadores, la carga es conectada en un punto de accionamiento, en el cual se realizan todas las operaciones de conexión y desconexión de carga o sincronización con la red.

- ♣ D. Lee, G. Lee, K. Lee (2000), “DC-Bus Voltage Control of Three-Phase AC/DC PWM Converters Using Feedback Linearization” in IEEE Transactions on Industry Applications. [17]

En este trabajo se presenta una estrategia de control rápido de tensión de convertidores trifásicos modulación por ancho de pulso (PWM) trifásicos aplicando una técnica de linealización por retroalimentación. En primer lugar, incorporando el balance de potencia de los lados de entrada y salida en el modelado del sistema, un modelo no lineal del convertidor PWM con variables de estado variables de estado como las corrientes de entrada de AC y la tensión de salida de DC.

- ♣ M. Merai, M. Wissem Naouar, S. Belkhodja (2017), “An Improved DC-Link Voltage Control Strategy for Grid Connected Converters” in IEEE Transactions on Power Electronics. [18]

En este documento se presenta una estrategia de control robusta para mejorar el rendimiento del control de la tensión del enlace de corriente para los convertidores conectados a la red. La estrategia de control propuesta se basa en un control PI adaptativo y tiene como objetivo asegurar una rápida respuesta transitoria, bajas fluctuaciones de tensión en el enlace de CC, bajo THD de la corriente de red y un buen rechazo de las perturbaciones tras cambios repentinos de la potencia activa. Las ganancias proporcionales e integrales del controlador PI adaptativo se autoajustan para que se adapten bien al punto de funcionamiento del sistema controlado.

1.2.3 Discusión

Considerando los trabajos de la revisión bibliográfica anterior, sobre la tecnología del almacenamiento de energía en base a baterías de litio, participante fundamental para los modernos sistemas de potencia. Se puede observar en [1] [2], los fundamentos y principios de funcionamiento de la batería de litio, esta información es necesaria sobre este elemento químico que constituye un insumo clave para el desarrollo de EV y BESS. La literatura de [3] [4], menciona los atributos de las baterías de litio que proporcionan la mayor cantidad de energía específica por masa en comparación a otras baterías. Además, entrega información sobre los materiales que conforman las celdas, tipos de topología, y sistemas de protección.

Sin embargo, las baterías de litio al ser un producto caro en el aspecto económico, su uso en simulaciones de pruebas es limitada, por lo que trae beneficios conocer su comportamiento dinámico para analizar su dimensionamiento en sistemas eléctricos. Existen varios tipos de modelamiento para una batería de litio, se destacan los modelos electroquímicos y eléctricos, de este último es adecuado para la estimación del estado de carga y útiles para representar las características eléctricas de la batería, se ofrecen modelos basados en Thevenin [5] [7], lineal, capa simple y doble.

Por otra parte, en conjunto con los anteriores modelos, Shepherd desarrolla una ecuación para describir el comportamiento electroquímico de la batería en términos de tensión en los terminales, voltaje de circuito abierto, resistencia interna, corriente de descarga y estado de la batería presentados en [6] [9], la estimación del estado de carga se realiza mediante el método de contador de Coulomb [8]. se opta por elegir el modelo de Thevenin-Shepherd, por la universalidad que ofrece en sus prestaciones.

La información anterior sirve para sustentar el Modelo de Baterías de Litio-Ion de esta habilitación profesional, cabe mencionar que las referencias citadas sobre la batería y modelamiento [1-9], se complementan en información.

A su vez, en este trabajo se busca implementar un convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles para validar la operación del modelo de baterías, de tal manera de realizar pruebas eléctricas en un ambiente controlado.

El VSC Dos Niveles puede proporcionar flujo de potencia bidireccional, debido a la configuración de sus interruptores de potencia, que se basan en un semiconductor IGBT y un diodo en antiparalelo. Durante la operación el interruptor permite circulación de corriente entre los terminales colector y emisor del IGBT mediante los pulsos de conmutación a la compuerta, y de

manera contraria si la circulación de corriente va del terminal emisor a colector, el flujo de electrones pasa mediante el diodo desde ánodo a cátodo, la operación del interruptor se discute en [14] [15], en complemento se presentan en [10] [11], los principios de funcionamiento, modelamiento matemático y ecuaciones que rigen al VSC Dos Niveles. En este sistema controlado la sintonización de compensadores PI es compleja ya que las variables son funciones sinusoidales en el tiempo.

Por el contrario, en coordenadas de ejes rotatorios las señales y las variables que gobiernan las dinámicas del sistema se cambian a cantidades DC, antes se debe transformar mediante transformada de Clarke de ejes naturales abc a ejes estacionarios $\alpha\beta$, y luego se aplica transformada de Park de ejes estacionarios a ejes rotatorios dq [16] [18].

El control de los semiconductores es el medio más eficaz para lograr el control de los convertidores, la función de estos dispositivos es conducir el flujo de energía variando la duración de encendido y apagado de cada interruptor. La señal de conmutación a los semiconductores utilizando modulación ancha de pulso, y la arquitectura del sistema de control en cascada se discute en [12] [13] [17], con un control PI de corriente y tensión para el convertidor de potencia. Todo lo anterior es una selección de títulos sobre el convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles [10-18] que se complementan en información.

1.3. Hipótesis de Trabajo

Utilizando el modelamiento de Thevenin-Shepherd para el Modelo de Batería Litio-Ion y el convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles, es posible realizar un sistema que replica la dinámica de descarga para baterías de litio.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Simular un sistema emulador de descarga para baterías de litio que opera mediante un convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar el Modelo de Batería Litio-Ion basado en un circuito equivalente de Thevenin y la ecuación de Shepherd.
- Replicar la descarga de celdas de litio con dicho modelo
- Simular el control del convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles que opera con la referencia creada por el Modelo de Batería Litio-Ion en la descarga de bancos de litio.

1.5. Alcances y Limitaciones

Para alcanzar el objetivo general de este proyecto, se debe considerar que el análisis realizado sobre el Sistema Emulador de Baterías presenta los siguientes alcances.

- i. Modelo de Batería Litio-Ion simula comportamiento eléctrico
- ii. Semiconductores con los parámetros que incluye el programa de simulación
- iii. El Sistema Emulador no depende de condiciones ambientales

1.6. Temario y Metodología

La estructura de esta tesis se presenta a continuación:

- El **capítulo 2**, muestra información general de las principales partes que constituyen el Sistema Emulador para Baterías de Litio. Este capítulo inicia con la definición y fundamentos básicos de una batería de litio, como se compone una celda, principio de funcionamiento, seguridad de los tipos de celda. A continuación, se revisa los beneficios de utilizar un convertidor fuente de voltaje. Finalmente, se indica el modo de operación de un Sistema Emulador de descarga.
- **Capítulo 3**, este inicia con los tipos de modelamiento de una batería de litio, se analizan los modelos eléctricos y se elige el modelo de Thevenin Shepherd. Se aborda el estudio del estado de carga mediante el contador de Coulomb, se presenta la ecuación de voltaje de circuito abierto y parámetros que rigen el comportamiento dinámico del sistema.

- **Capítulo 4**, presenta los resultados de simulación del Modelo de Baterías Litio-Ion obteniendo las descargas de tensión de tres celdas de baterías de litio reales, dos de tipo cilíndrica y otra prismática, probadas mediante tres escenarios de descarga.
- **Capítulo 5**, describe el convertidor fuente de tensión trifásico dos niveles, se presentan las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema, también se definen las funciones transferencias, en donde la referencia de voltaje del enlace DC del convertidor será la dinámica de descarga del Modelo de Baterías Litio-Ion.
- **Capítulo 6**, se muestra la estructura de control para gobernar el convertidor trifásico dos niveles, donde se realiza un control en conexión en cascada voltaje DC y corriente de eje directo, a través de controladores lineales del tipo PI, a continuación, se muestra el análisis de control del convertidor y diseño.
- **Capítulo 7**, presenta los resultados del Sistema Emulador para Baterías de Litio que simula la descarga de tres bancos de baterías que están conformados por las celdas simuladas por el modelo en el capítulo 4, además, los bancos de baterías simulados se probaron ante tres escenarios de descarga.
- Por último, el **capítulo 8** presenta las conclusiones generales de esta habilitación profesional, sumario y trabajos futuros que se pueden realizar de este trabajo.

Capítulo 2. Sistema Emulador de Descarga para Baterías

2.1. Introducción

En el presente capítulo se entrega información sobre las partes que constituyen el sistema emulador, se muestran detalles sobre la tecnología de las baterías de litio, se analiza los fundamentos básicos, principios de funcionamiento, tipos de diseño que se presentan en el mercado y seguridad de estas, y detalles de su modelamiento. Se analiza el convertidor fuente de voltaje dos niveles, se presentan sus ventajas en utilizarlo, modo en que opera en el sistema frente a la descarga del modelo de baterías.

2.2. Batería de Litio

Las Celdas de Litio-Ion (CLI), son baterías recargables o baterías secundarias, en donde los iones de litio se mueven entre el ánodo y el cátodo durante los procesos de carga o descarga. Con una buena combinación de alta densidad de energía, posee reducido efecto de memoria y autodescarga [1]. Este tipo de baterías están presentes en sistemas que van desde la electrónica de consumo, electromovilidad, exploración espacial, sistemas satelitales, y otros diversos tipos de sistemas en almacenamiento de energía en base a baterías. Este elemento en su forma natural corresponde a un metal ligero y de tono blanco. El símbolo químico de este elemento alcalino es el Li que también servirá para designar al litio en este documento.

2.2.1 Fundamentos Básicos de las Baterías de Litio

Las baterías son dispositivos almacenadores de energía en [38] se define a una batería como un generador electroquímico que transforma energía química en electricidad mediante reacciones de oxidación-reducción. Está conformada por celdas, las cuales están conectadas en serie y paralelo. Los voltajes y corrientes deseados se obtendrán de acuerdo a la forma de conexión de estas celdas [37]. En el caso de necesitar un banco de baterías con un cierto voltaje se deben conectar en serie hasta alcanzar el valor adecuado, mientras que, si se desea un banco con cierto rango de capacidad, se deberán conectar tantas celdas o módulos de celdas en paralelo hasta alcanzar las prestaciones requeridas de diseño y montaje.

Esta batería es una tecnología que está en constante crecimiento, esto se debe en gran medida a que el litio es el elemento metálico más ligero y también tiene mayor potencial electroquímico, por lo tanto, es la tecnología que proporciona la mayor cantidad de energía específica por masa, llegando a ofrecer una densidad de energía de tres veces la de una batería de plomo-ácido [8]. Gracias a lo anterior pueden concentrar grandes cantidades de energía en un pequeño y delgado encapsulado, tienen un bajo nivel de descarga por inactividad, a diferencia de las baterías basadas en níquel-cadmio. También se destaca su alta capacidad para entregar corriente, ya que es posible obtener de ellas varios Ampere-hora (Ah) [30]. En la siguiente Figura 2.1, se observa las prestaciones de densidad de energía volumétrica y densidad de energía específica de las baterías de litio en comparación con otras tecnologías de almacenamiento electroquímico.

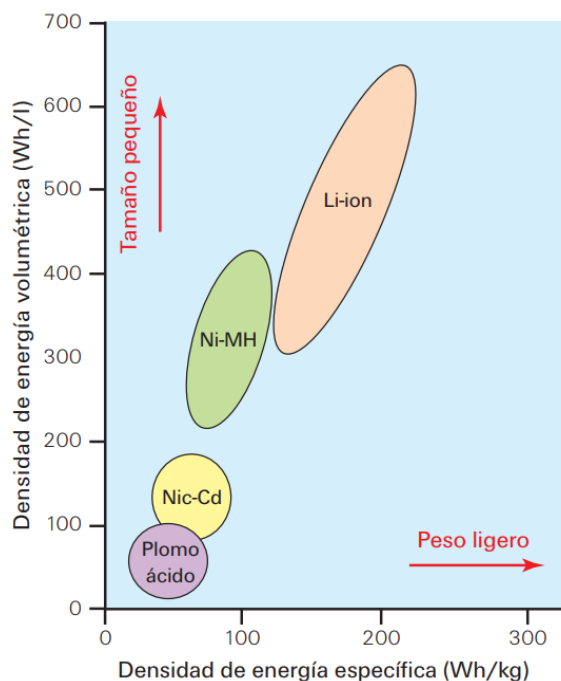


Figura 2.1 Gráfico Entre Densidades de Energía Específica y Volumétrica de Diferentes Tipos de Baterías Recargables, [30]

A continuación, se indicarán algunos parámetros en el estudio de baterías de Li-Ion:

- Resistencia interna: En los modelos eléctricos, la resistencia interna es un componente electrónico pasivo que nos permite representar la caída de voltaje causada por la variación de corriente de descarga [9].

- Estado de carga (SoC): Es la cantidad de energía que puede ser tomada desde la batería en relación a la máxima carga que puede ser tomada desde la batería en relación a la máxima carga que puede ser almacenada en la batería [44].
- Voltaje de circuito abierto: Es el voltaje de la batería sin carga, cuando esta se encuentra totalmente cargada [9].
- Capacidad de corriente: La capacidad es medida en Ampere-hora y esta es una medida de la cantidad de energía en un sistema [42].
- Densidad de energía específica: Es la energía por unidad de masa (Wh/kg).
- Densidad de energía volumétrica: Es la energía por unidad de volumen (Wh/l).

2.2.2 Composición de la Celda

Las CLI están compuestas por un ánodo, cátodo, separador, electrolito, colectores de corriente y materiales de embalaje. El ánodo es el electrodo negativo, suele estar hecho de carbono grafitizable. Por el momento, el grafito es el material de ánodo más importante en las CLI y ha recibido la mayor atención de la investigación [41], la función del grafito es almacenar los iones de litio cargados positivamente durante la carga. El cátodo es el electrodo positivo de la batería, el cual está conformado por óxidos de litio [43]. material del cátodo se deriva principalmente de tres grupos: material de olivino, por ejemplo, óxido de litio hierro fosfato, LiFePO_4 material en capas, por ejemplo, óxido de litio cobalto, LiCoO_2 y material de espinela, por ejemplo, óxido de litio manganeso, LiMnO_4 . Los materiales del ánodo y cátodo permiten la circulación reversible de iones de litio [1], El electrólito que se encuentra entre el óxido de litio y el grafito, es un compuesto orgánico que es el medio por donde se transportan los iones desde el cátodo a ánodo y viceversa, este impide el paso de electrones. Este material está formado por sales de litio y solventes orgánicos [24], El separador es un material de seguridad que impide un cortocircuito que se genera al secarse el electrolito producto de alguna condición anormal de la batería. Este evita el contacto eléctrico entre los electrodos y permite el transporte en iones de litio por el electrolito [26], el material del separador es una capa que tiene poros con diámetros que permiten de manera permeable el paso de iones de litio. Esto es conocido como microporosidad [25]. El colector de corriente del ánodo está hecho de cobre y el colector de corriente del cátodo está hecho de aluminio. Los colectores de corriente se conectan al circuito externo. Los materiales de embalaje pueden ser de tipo bolsa, una caja de aluminio duro o una caja de acero inoxidable de acuerdo con la geometría y la aplicación de las CLI.

2.2.3 Principio de Funcionamiento

En la siguiente Figura 2.2, ilustra el principio de funcionamiento y la estructura interior de la CLI con un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de litio cobalto LiCoO_2 [1]. La batería funciona sobre un concepto llamado potencial electroquímico, que es la tendencia de un metal en perder electrones y el litio satisface este principio. Durante la carga y descarga se producen procesos de oxidación y reducción simultáneamente, según el sentido del proceso [46]. Se puede observar las partes de su composición electrodos, superficies conductoras, electrolito y separador.

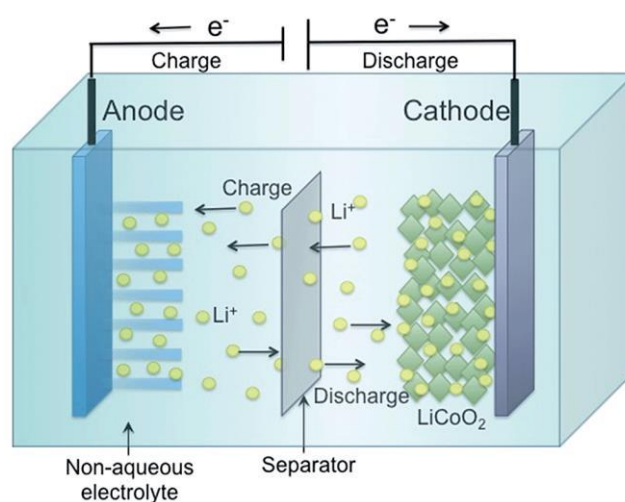


Figura 2.2 Esquema de una Celda de Litio Durante la Carga y Descarga, [36]

Durante el proceso de descarga, al conectar una carga en los terminales de la batería, se produce una reacción química en el litio, que se ocupa en liberar electrones, este flujo se mueve de ánodo a cátodo a través del circuito externo, alimentando el dispositivo conectado mediante el flujo de corriente. Este proceso deposita electrones en el colector del cátodo conformado de aluminio. Dentro de la CLI, el litio está almacenado en la lámina de grafito, este material del ánodo no interviene en la reacción ya que sólo es un medio de almacenamiento para los átomos de litio, durante la reacción química se crean los iones de litio (Li^+), que quieren volver a su estado estable en el óxido de litio del cátodo, los iones circularán fuera del ánodo, transportándose mediante el electrolito y atravesando el separador, los iones Li^+ se conducen hacia el cátodo compuesto por óxidos de litio. En ese momento los electrones depositados en el colector de corriente del cátodo ingresan al óxido de litio y los iones Li^+ recuperan sus electrones nuevamente. Provocando que el grafito del ánodo se quede sin ningún átomo de litio, esto causa que la batería se descargue completamente, en consecuencia, un bajo SoC.

El proceso de carga ocurre al conectar una fuente de alimentación DC, esto provoca una reacción química en el litio que se encarga en ceder electrones, estos se mueven desde cátodo a ánodo mediante el circuito externo, depositando el flujo de electrones en el colector de corriente del ánodo constituido de cobre. Dentro de la CLI, el litio contenido en el cátodo, durante la reacción química se crean los iones de litio, átomos cargados positivamente que viajan fuera del cátodo, los iones Li^+ se transportan mediante el electrolito atravesando el separador, este flujo de iones Li^+ se conduce hacia el ánodo compuesto por grafito y se depositan ahí. En ese momento los electrones depositados en el colector de corriente del ánodo ingresan en el grafito y los átomos de litio almacenados cargados positivamente recuperan de nuevo sus electrones, provocando que el ánodo compuesto por grafito se ocupe completamente por átomos de litio, dejando la batería cargada, es decir, con un alto SoC.

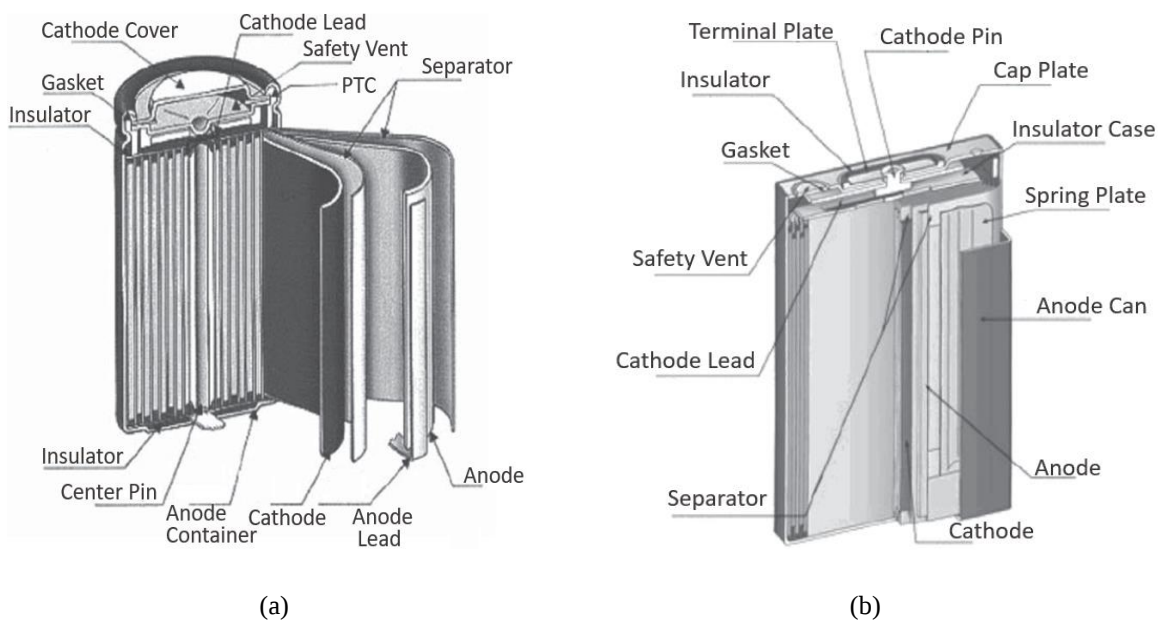
2.2.4 Seguridad de las CLI

La seguridad es fundamental, especialmente para aplicaciones automotrices, teniendo en cuenta que las baterías almacenan más energía, ofrecen alta potencia y tienen un amplio rango de temperatura en funcionamiento. La energía electroquímica almacenada en una batería no debe ser liberada de forma no controlada bajo ninguna operación o condiciones externas. Prácticamente, es imposible alcanzar estos criterios y, por lo tanto, se utilizan varias pruebas de seguridad, como de sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito, se realizan para garantizar los límites de funcionamiento seguro de la batería. En estas hay varios factores que determinan la seguridad de las baterías de litio, tales como:

- Química de la celda: La elección de la química de la celda, en particular los materiales que están conformados el ánodo y cátodo, es vital para la seguridad y estabilidad de una batería.
- Tamaño y diseño de la celda: La seguridad está directamente relacionada con el tamaño de la celda. Las de formato pequeño contienen menos material activo y, por tanto, menos energía, y son más seguras que las celdas de diseño de gran formato. Además, las celdas pequeñas tienen una mayor superficie por unidad de volumen, que se traduce en una mayor refrigeración, que se propaga uniformemente sobre la celda durante el sobrecalentamiento.

- **Carcasa externa:** Este aspecto debe tenerse en cuenta, ya que las celdas deben cumplir con las condiciones mecánicas y ambientales a las que estarán expuestas. Alto impacto y vibración, temperaturas extremas u otras condiciones adversas pueden encontrarse durante el uso y la manipulación, las celdas deben estar construidas de manera hermética, para contener los materiales en su interior y evitar que se filtren [3].
- **Sistemas de Gestión de Baterías (BMS):** Es un sistema de protección que mediante circuitos electrónicos se encarga de gestionar el uso de la batería y de prevenir situaciones de riesgo en operación. La principal tarea de un BMS es proteger cada celda, módulo o banco de baterías, manteniéndolas en su rango de operación segura. Entre las tareas que gestiona el BMS están: la carga y descarga segura de la celda, evitar sobrecorriente, desconectar en caso de detectar sobrevoltajes o bajo voltaje, en su operación de medición de voltaje gestiona el balance entre las celdas, e incluye sistemas de medición de parámetros de la celda, módulo o banco de baterías, tales como el SoC y temperatura.

En la Figura 2.3, se encuentran los tipos arquitectura de las CLI que están disponibles en el mercado para diferentes aplicaciones. Se muestran en detalle las estructuras que lo componen tanto en (a) y (b), las piezas de seguridad que se deben incluir en cada tipo de CLI para enfrentar cualquier contingencia a las que se expongan.



(a) Celda cilíndrica, (b) Celda prismática

Figura 2.3 Esquema de Formas de Celdas con Características de Seguridad, [3]

2.3. Convertidores Fuente de Voltaje

El principal objetivo de este dispositivo de electrónica de potencia es la conversión de energía eléctrica, como AC/DC y DC/AC. Los VSC utilizan interruptores de conmutación automáticos, como los semiconductores IGBT, que pueden encender o apagar de manera controlada independiente de la polarización. La capacidad de apagado/encendido repercute en que se puede tener, dentro del período de la fundamental, más pulsos de apagado/encendido, disminuyendo el nivel de armónicos, pero perjudicando el nivel de pérdidas por conmutación [19]. Se ofrecen prestaciones de potencia y frecuencia de conmutación al utilizar semiconductores IGBT para el VSC dos niveles, ya que este interruptor es capaz de operar a frecuencias mayores a 1 kHz que permite aplicaciones de potencia desde 1 kVA hasta fracciones mayores de 100 kVA como se observa en la Figura 2.5, y usando la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM) para esta habilitación profesional.

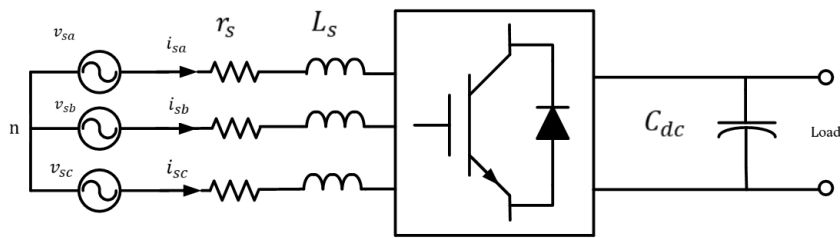


Figura 2.4 Convertidor Fuente de Voltaje.

Estos tipos de convertidores se dividen en dos tipos de topologías, VSC Dos Niveles y VSC Multinivel. La topología VSC Dos Niveles es la tecnología más madura en convertidores VSC. En este caso el convertidor consta de seis semiconductores de conmutación forzada, en donde cada uno de ellos posee conectado un diodo en antiparalelo, que se utiliza en la etapa de rectificación, es decir, opera como un dispositivo electrónico bidireccional de flujo de potencia.

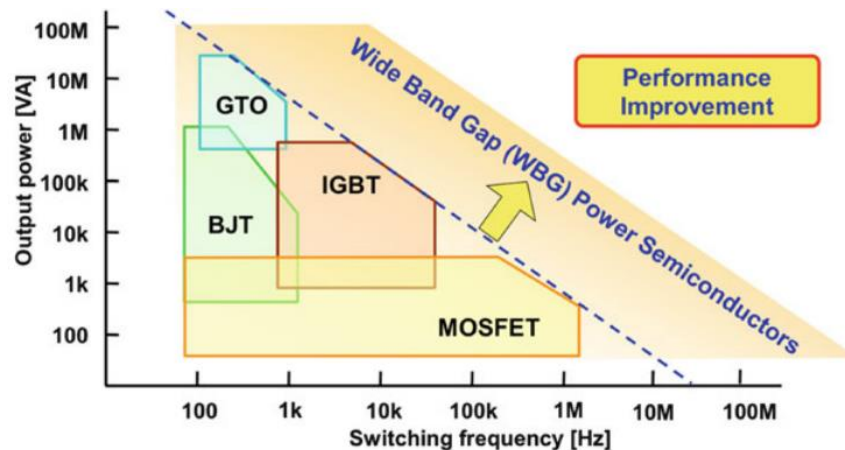


Figura 2.5 Características de Semiconductores [27].

Este convertidor se muestra en la Figura 2.4, este se constituye en primera parte por el lado AC, fuentes de alimentación alterna trifásicos v_{sa} , v_{sb} , y v_{sc} , en segunda parte se encuentran los reactores de fase que consiste en una resistencia r_s y un inductor L_s que es la componente AC del sistema, corresponde a las inductancias equivalentes (autotransformador trifásico y reactancia inductiva de fase) y es parte del diseño de la planta del convertidor para el lazo interno que controla la corriente de eje directo i_{sd} , este es necesario para mitigar el contenido armónico de las corrientes de línea. Este elemento es de alta importancia, pues su diseño determina el comportamiento dinámico del convertidor en lo que respecta a las variables del lado AC [21], además, conforma un filtro pasa bajo junto a la resistencia, que logra que la frecuencia fundamental tenga la menor distorsión armónica posible atenuando las componentes de alta frecuencia del espectro generadas por la conmutación de los semiconductores. Luego se observa el convertidor VSC, este puede ser dependiendo su configuración a implementar, tanto Multinivel o Dos Niveles, de este último se analizará en detalle en el Capítulo 5 del presente documento, estos convertidores permiten el control tanto la potencia activa como reactiva [19]. En el lado DC del sistema se encuentra el capacitor DC, este provee la tensión necesaria para operar el enlace VSC. Este elemento está conectado en paralelo con los terminales, su elección debe tomar en cuenta el rizado de la tensión continua y temas de control del sistema para que el convertidor en su lado DC opere a un voltaje requerido por aplicación. Desde el enlace DC se conecta en sus terminales las cargas a evaluar en el sistema, que luego el convertidor se encarga en suministrar la potencia, estos pueden ser cargas resistivas, baterías, sistemas fotovoltaicos u otro convertidor del tipo inversor VSI.

2.4. Sistema Emulador de Baterías

Un sistema emulador de baterías permite la realización de pruebas para observar su comportamiento dinámico ante cualquier requerimiento que imponga el sistema. Un emulador de batería se comporta como una fuente de voltaje que imita el voltaje en los terminales de una batería electroquímica durante su operación [22]. El emulador puede replicar escenarios de carga/descarga en estado estacionario o dinámico de acuerdo a la precisión del modelo utilizado [23]. El Sistema Emulador en la Figura 2.6, está constituido por un dispositivo de electrónica de potencia bidireccional que contiene un enlace DC controlable y conexión en paralelo de las cargas a evaluar por el sistema, además, está conectado en la parte AC a una red trifásica e impedancia de fase.

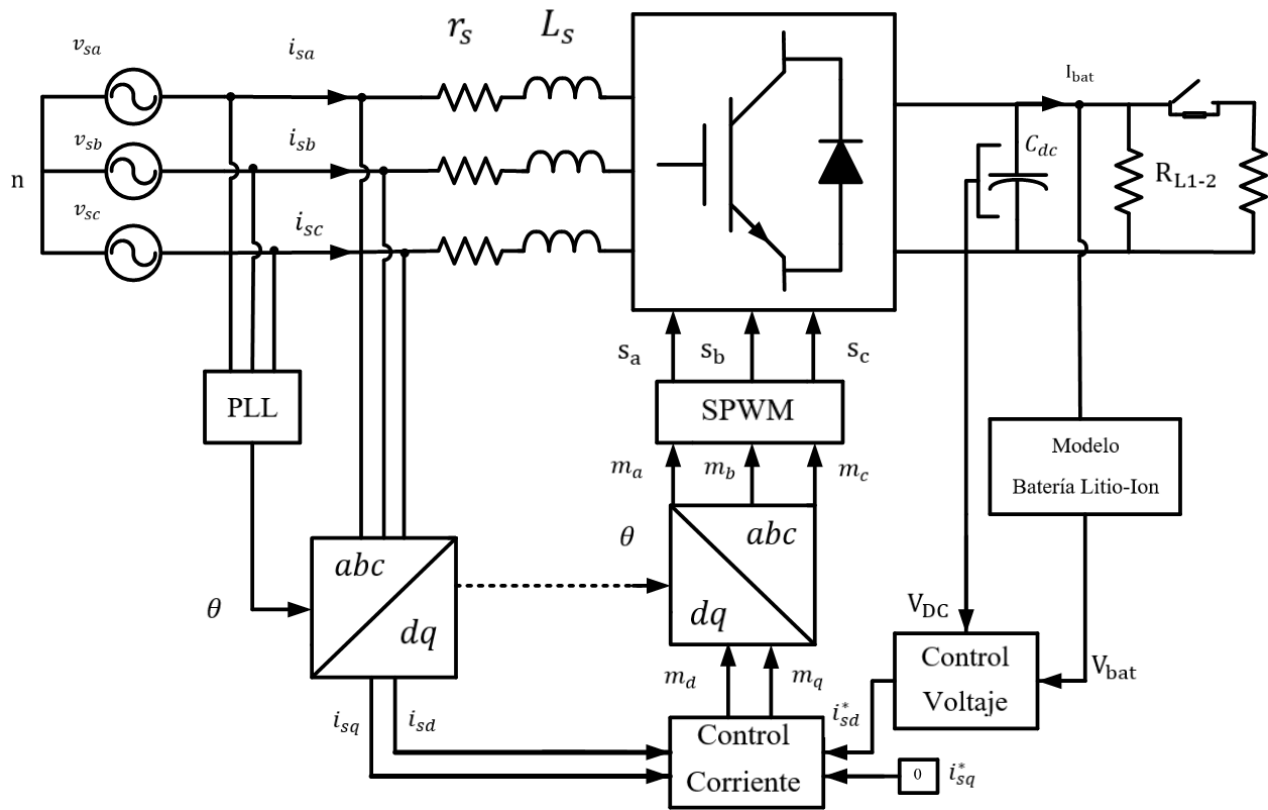


Figura 2.6 Sistema Emulador para Baterías de Litio

Cada voltaje de línea neutro, debe conectarse hacia un subsistema de seguimiento de fase PLL, para conseguir el ángulo de giro de la red y utilizarlo en los cambios de coordenadas pertinentes para el correcto funcionamiento del Sistema Emulador.

Para la utilización de cambio de coordenadas se miden las corrientes de línea en abc para luego utilizar la transformada de Clarke en coordenadas $\alpha\beta$, sin embargo, este eje genera dos señales alternas desfasadas en 90° . Al utilizar controladores PI (Proporcional-Integral) para la conexión en cascada de los lazos de control y realizar el cambio a coordenadas rotatorias, se asegura error cero en estado estacionario en señales continuas, por esta razón se debe cambiar de ejes naturales abc a sistemas de coordenadas dq donde las señales alternas pasan a ser continuas mediante la transformada de Park para la sintonización adecuada mediante controladores lineales PI. Mientras que en el lado DC del sistema, se mide la corriente del convertidor que es sometida a distintos tipos de carga, nominal e impacto, esta ingresa al Modelo de Batería Litio-Ion, en este se deben cargar los parámetros de la celda o banco que se desea evaluar, se utiliza un modelo de Thevenin-Shepherd, que se mostrará en detalle en el capítulo 3, este considera el comportamiento eléctrico y no incluye parámetros térmicos,

para luego generar el voltaje de la batería, que sirve de referencia para el control de tensión del enlace DC mediante el capacitor.

Para las pruebas se consideraron marcas de CLI y sus respectivos bancos consolidados en el mercado y utilizados como sistemas de almacenamiento electroquímicos de litio para EV tipo BESS. La simulación es realizada mediante Matlab/Simulink, este sistema no depende de condiciones ambientales y de temperatura en su análisis. Uno de los resultados más importantes de esta experiencia es que se reducen en contaminación, costos de desarrollo, montaje, y peligros en pruebas con baterías reales, aumentando en seguridad para los operadores.

2.4.1 Ventajas del Sistema Emulador

El Sistema Emulador permite realizar pruebas sobre comportamiento eléctrico independiente de condiciones ambientales en la dinámica de descarga en estado estacionario y transiente para baterías de litio, obteniendo réplicas casi exactas en sus respuestas. El Sistema Emulador permite sustituir las instalaciones de bancos de baterías reales ya que el montaje es más sencillo, esto otorga ventajas en torno al medio ambiente y la economía.

El uso de baterías reales después de su ciclo de vida es difícil de reciclar y su reutilización se encuentra en madura investigación, en cuanto a lo económico el Sistema Emulador de descarga tiene un bajo costo en comparación a adquirir baterías reales para conectar bancos [5]. En si las baterías reales son seguras para el operador, pero durante las pruebas pueden darse condiciones inesperadas, como riesgo de incendio o explosión. Por el contrario, el Sistema Emulador resulta más seguro para el operador que un banco de batería real.

Capítulo 3. Modelamiento de la Batería de Litio

3.1. Introducción

Investigadores de todo el mundo han desarrollado una amplia variedad de técnicas con diversos grados de complejidad para modelar las baterías. A pesar de que las baterías son un elemento ampliamente utilizado en un gran número de aplicaciones de alta y baja potencia, aún siguen siendo elementos difíciles de controlar debido a que las reacciones electroquímicas que rigen su comportamiento son de gran complejidad. Por esto se hace necesario su modelamiento para controlar en algún grado el desempeño de la batería y prever su evolución, tanto en el corto como en el largo plazo, bajo diferentes condiciones de trabajo [7].

3.2. Tipos de Modelos

Existen dos grupos de modelos de baterías: los electroquímicos y eléctricos. Los modelos electroquímicos son basados en ecuaciones de alto nivel no lineales que describen las acciones y reacciones electroquímicas que se dan en el interior de la batería. Además, estos modelos hacen uso de aproximaciones para simplificar sus procesos internos y obtener una respuesta precisa, estas ecuaciones necesitan información específica de las características de los materiales de las baterías [49]. El extensivo análisis de parámetros y ecuaciones de este tipo de modelos derivan en una elevada carga computacional. Estos modelos electroquímicos no son aplicables para estudios de sistemas dinámicos y de potencia.

Es por esto, que mediante un modelo eléctrico se plantea conocer el comportamiento dinámico generado por las reacciones químicas internas y conocer los requerimientos de potencia a las que se somete la batería. El uso de modelos eléctricos ayuda a interpretar de manera sencilla los procesos internos de la batería real mediante el uso de una combinación de resistencias, capacitores, fuentes de voltaje [4]. Estos modelos son de fácil manejo para investigadores del área eléctrica por cuanto estos pueden ser diseñados en simuladores (Matlab, Plecs, etc.). Estos modelos varían ampliamente en términos de complejidad, requerimientos computacionales y confiabilidad de sus predicciones [5].

3.3. Modelos Eléctricos

Dentro de este tipo de modelamiento, se encuentran los basados en Thevenin, en impedancia y basados en circuitos eléctricos combinados y genéricos. Estos serán detallados a continuación.

3.3.1 Thevenin Lineal

El modelo Lineal representa un circuito que consiste de una fuente de voltaje y una resistencia interna de la batería y pueden ser representadas por las siguientes expresiones (3.1) y (3.2).

$$E = E_0 - K \cdot f \quad (3.1)$$

$$R = R_0 - K_R \cdot f \quad (3.2)$$

La variable E representa el voltaje del circuito abierto; E_0 es el voltaje de la batería sin carga cuando está totalmente cargada; el estado de descarga f ; la resistencia interna R_0 , cuando la batería está completamente cargada; K y K_R son constantes que se utilizan para los experimentos [5].

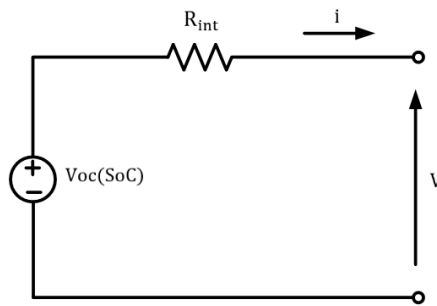


Figura 3.1 Modelo lineal

3.3.2 Thevenin Capa Simple

Los circuitos basados en Thevenin es una simplificación de los procesos electroquímicos que tienen lugar dentro de la batería, esta se representa en base de elementos eléctricos, el circuito se presenta en la siguiente Figura 3.2.

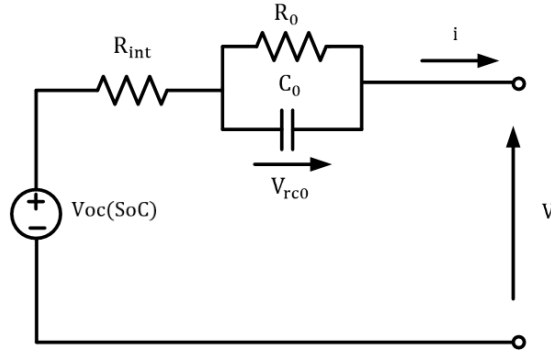


Figura 3.2 Modelo capa simple

De lo anterior, se observa la R_{int} corresponde a la resistencia interna de la batería, C_0 a la capacitancia entre las placas de los electrodos y R_0 a la resistencia no lineal debida a la resistencia de contacto entre las placas de los electrodos y el electrólito. La fuente de tensión V_{oc} tiene una característica no lineal para baterías de litio.

El modelo de Thevenin de capa simple (en tiempo discreto), son expresadas mediante las ecuaciones (3,3) y (3,4). En ellas se asume que la corriente es positiva para la carga y negativa para la descarga. El parámetro T corresponde al periodo de muestreo [7].

$$V^{rc0}(kT) = V^{c0}(kT) \cdot e^{-\frac{kT}{R_0 C_0}} + I^{rc0}(kT) \cdot R_0 \left(1 - e^{-\frac{kT}{R_0 C_0}}\right) \quad (3.3)$$

$$V(kT) = V_{oc}(SoC) + I(kT) \cdot R_{int} + V^{rc0}(kT) \quad (3.4)$$

Las principales desventajas del modelo de Thevenin es que asume que los valores de las resistencias y las capacitancias son constantes, siendo que en la realidad dependen del estado de carga, tasa de descarga, edad de la batería y temperatura. Otra desventaja es que no permite tener información acerca de la vida útil de la batería. Su principal ventaja es que por su naturaleza circuital, es fácil de implementar en programas de simulación. Además, se trabaja con una variante del modelo de Thevenin, el cual presenta dos resistencias internas, una para el proceso de carga (R_c) y otra para el proceso de descarga (R_d), que se puede observar a continuación en la Figura 3.3.

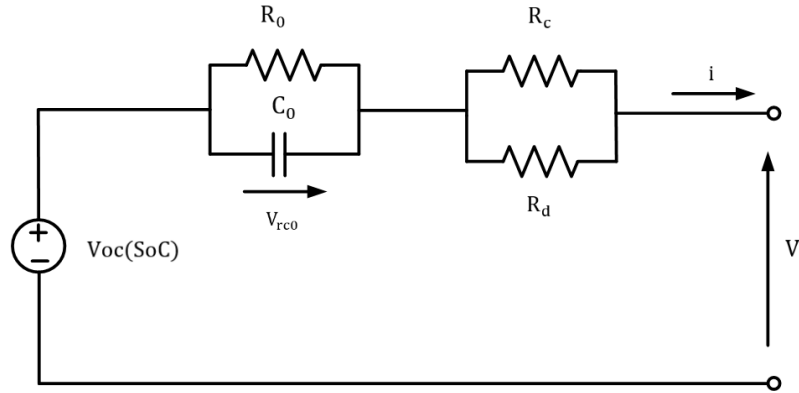


Figura 3.3 Modelo variante capa simple

Las ecuaciones que expresan este modelo de la Figura 3.3 en tiempo discreto, se muestran a continuación.

$$V^{rc0}(kT) = V^{c0}(kT) \cdot e^{-\frac{kT}{R_0 C_0}} + I^{rc0}(kT) \cdot R_0 \left(1 - e^{-\frac{kT}{R_0 C_0}}\right) \quad (3.5)$$

$$V(kT) = \begin{cases} V_{oc}(SoC) + I(kT) \cdot R_c + V^{rc0}(kT), & \text{si } I > 0 \text{ (carga)} \\ V_{oc}(SoC) + I(kT) \cdot R_d + V^{rc0}(kT), & \text{si } I < 0 \text{ (descarga)} \end{cases} \quad (3.6)$$

Cabe comentar que este modelo presenta las mismas características del modelo original capa simple de Thevenin, la variante del modelo realiza una diferenciación entre resistencia de carga R_c y resistencia de descarga R_d , lo que mejora su desempeño [7].

3.3.3 Thevenin Doble Capa

A este modelo es posible agregar “ n ” ramas RC, que mejora notablemente su desempeño, con el costo de aumentar su complejidad. En relación a lo anterior, se sugiere que con dos ramas RC es posible caracterizar los efectos de polarización y difusión que tienen lugar en el interior de la batería. Este modelo es mostrado en la siguiente Figura 3.4.

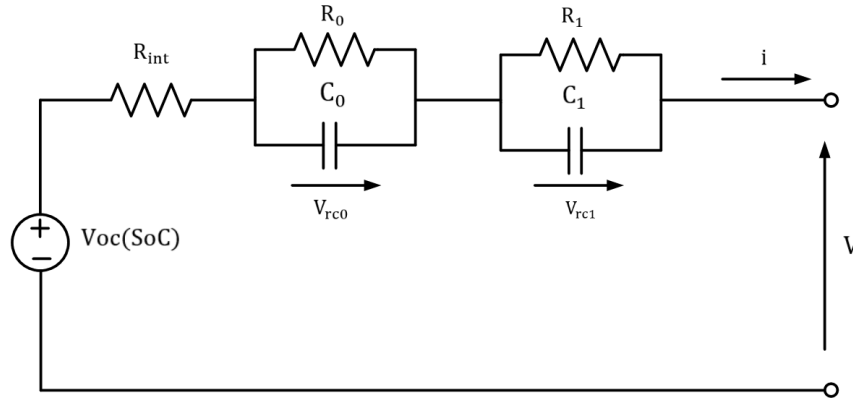


Figura 3.4 Modelo doble capa

En este esquema se muestran seis componentes y cada uno representa un aspecto diferente de la batería: V_{oc} , R_{int} , y las dos redes RC con combinaciones de polarización paralelas, R_0 , C_0 , R_1 , C_1 , responsables de la respuesta transitoria de la batería. Donde, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto y uno de los parámetros más importantes de una batería, es la resistencia óhmica interna R_{int} de la celda y es responsable de la caída o subida inmediata de tensión cuando la batería se está descargando o cargando. En donde R_0 y C_0 , describen la dinámica rápida en la batería que representa los efectos sobre la superficie en los electrodos y la reacción cinética, R_0 la resistencia de transferencia de carga y C_0 representa la capacitancia electroquímica de doble capa. R_1 y C_1 representan la dinámica más lenta. Todos estos parámetros son funciones del estado de carga (SoC) de la batería, temperatura y corriente [39]. Es preciso mencionar que estos modelos son para caracterizar baterías en particular.

Las ecuaciones en tiempo discreto del modelo de Thevenin de capa doble mediante LVK son las siguientes.

$$V^{rc0}(kT) = V^{c0}(kT) \cdot e^{-\frac{kT}{R_0 C_0}} + I^{rc0}(kT) \cdot R_0 \left(1 - e^{-\frac{kT}{R_0 C_0}}\right) \quad (3.7)$$

$$V^{rc1}(kT) = V^{c1}(kT) \cdot e^{-\frac{kT}{R_1 C_1}} + I^{rc1}(kT) \cdot R_1 \left(1 - e^{-\frac{kT}{R_1 C_1}}\right) \quad (3.8)$$

$$V(kT) = V_{oc}(SoC) + I(kT) \cdot R_{int} + V^{rc0}(kT) + V^{rc1}(kT) \quad (3.9)$$

Este modelo, al igual que el de capa simple presenta la desventaja de asumir los valores de sus elementos como constantes. Además de no ser capaz de representar el tiempo de vida útil de la batería, además, el modelo de doble capa representa mayor cantidad de fenómenos que el de capa simple [7].

3.3.4 Thevenin Runtime

Este modelo, es una nueva formulación del modelo de Thevenin, este tiene la particularidad de poder representar el tiempo de vida útil de la batería, se observa a continuación en la Figura 3.5.

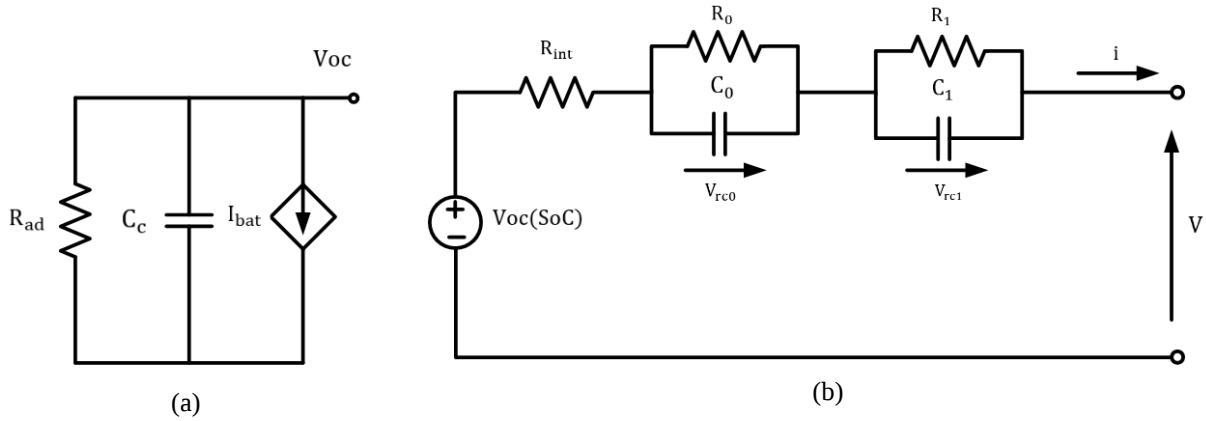


Figura 3.5 Modelo Thevenin Runtime

(a) Tiempo de vida de la batería, **(b)** Dinámicas de la batería

En la rama derecha de la Figura 3.5, que corresponde a un modelo de Thevenin de doble capa, que está encargado de representar la dinámica de carga/descarga de una batería en específico, mientras que la rama izquierda representa la pérdida de capacidad de la batería debido a los ciclos de uso, los componentes de esta rama R_{ad} corresponde a la resistencia de autodescarga propia de la batería, C_{ap} se relaciona con la capacidad nominal y la fuente de corriente que circula por la batería. Además, este modelo en comparación a los anteriores, permite representar la degradación de la batería con los ciclos de vida, se determinan los parámetros de este modelo en función del estado de carga [7].

3.3.5 Thevenin-Shepherd

Para este modelo necesitamos conocer las diversas ecuaciones que obtienen el voltaje de circuito abierto (E) de los modelos de baterías de litio en función del estado de carga (SoC), para determinar E se obtiene mediante un modelo combinado que utiliza la ecuación de Shepherd y Nerst.

$$E = k_0 + k_1 \cdot \ln \cdot SoC + k_2 \cdot \ln \cdot (1 - SoC) + k_3 \cdot \frac{1}{SoC} + k_4 \cdot SoC \quad (3.10)$$

Los valores de las constantes k_0 , k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son parámetros del modelo, estos son obtenidos mediante el método de ajuste de mínimos cuadrados comparados con una curva de descarga real. Una ecuación mejorada para la obtención precisa de E se puede observar en la siguiente expresión (3.11).

$$E(SoC) = k_0 + k_1 \cdot SoC + k_2 \cdot SoC^2 + k_3 \cdot \frac{1}{SoC} + k_4 \cdot \ln(1 - SoC) \quad (3.11)$$

La ecuación formulada por Shepherd, utilizada para la determinación de E en conjunto con un circuito basado en Thevenin tipo lineal es adecuada para la representación de las baterías de litio. Esta configuración es llamada modelo de Thevenin-Shepherd. La ecuación de Shepherd está conformada por diversos parámetros, estos caracterizan una batería en particular. Una modificación del modelo Thevenin-Shepherd se ilustra a continuación en la Figura 3.6.

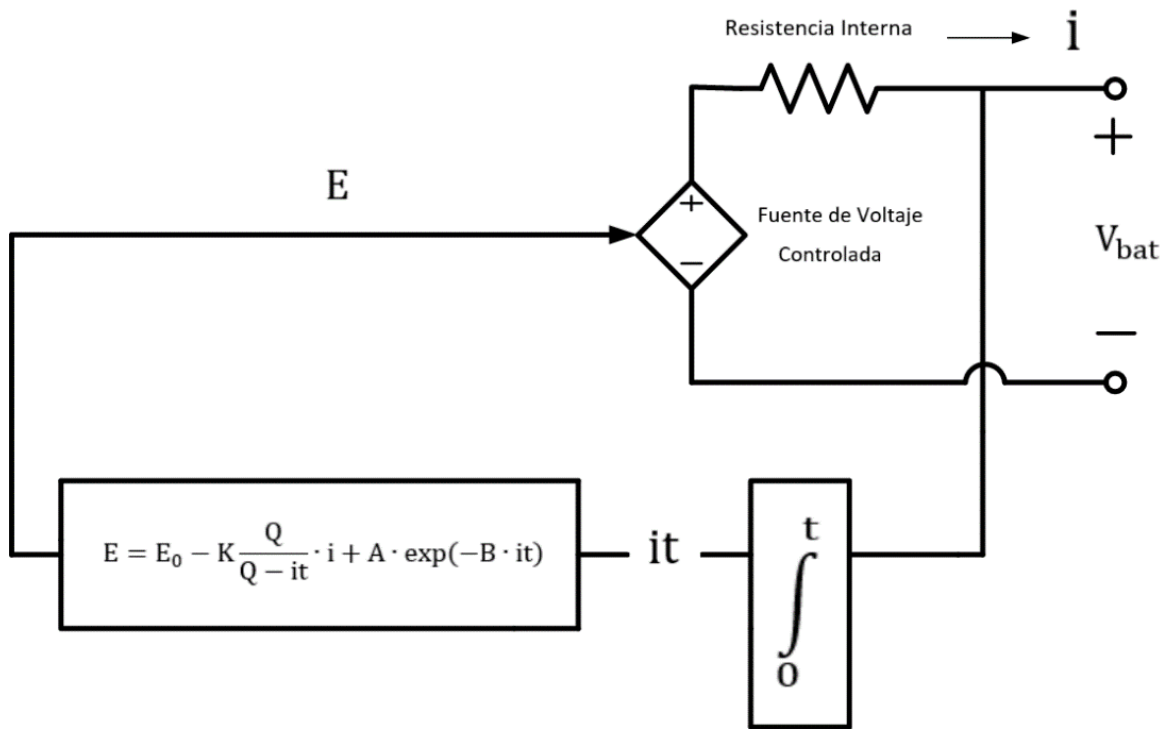


Figura 3.6 Modelo Thevenin-Shepherd

De la Figura 3.6, el estado de carga de la batería (SoC), el voltaje en los bornes de la batería V_{bat} y el voltaje de circuito abierto E , están dadas mediante las siguientes expresiones:

$$SoC(t) = SoC_0 - \frac{1}{Q} \int_{t_0}^t i \, dt = 100 \cdot \left[1 - \frac{\int i}{Q} \right] \quad (3.12)$$

$$V_{bat} = E - R_{int} \cdot i \quad (3.13)$$

$$E = E_0 - K \left(\frac{Q}{Q - \int i} \right) \cdot i + A \cdot e^{(-B \int i)} \quad (3.14)$$

Los parámetros de las expresiones anteriores:

SoC_0 : Estado de carga inicial (%).

E_0 : Representa el voltaje de circuito abierto E de la batería a full capacidad (V) [5]

E : Voltaje de circuito abierto (V)

K : Coeficiente de voltaje de polarización (V)

$\int i \, dt$: Carga real de la batería (Ah) [6]

Q : Capacidad de la Batería (Ah)

i : Corriente de la batería (A)

R_{int} : Resistencia interna (Ω)

A : Amplitud de la zona exponencial (V)

B : Constante inversa de tiempo de zona exponencial (Ah^{-1}).

La expresión $\int i$ se alcanza a partir de la extracción de la corriente de la batería, la ecuación (3.13) es obtenida mediante la suma de las caídas de voltaje durante la descarga, en la ecuación (3.14), el término no lineal $(Q / (Q - \int i))$, representa la variación de tensión con la amplitud de la corriente y el actual estado de carga de la batería, el modelo de batería tendrá un comportamiento similar a una batería real. Este modelo ofrece resultados precisos y también representa el comportamiento de la batería, este no considera parámetros ambientales, por ende, la temperatura no influye en su comportamiento y la autodescarga de la batería no está representada [6].

La temperatura en un sistema de almacenamiento electroquímico, afecta la composición química de la batería, cuando esta se somete a esfuerzos térmicos, en consecuencia, la resistencia interna disminuye, si se mantiene a una exposición continua de elevadas temperaturas puede producir una reducción de la vida útil y aumentar el índice de autodescarga.

Además, este modelo no tiene gran precisión en la obtención V_{bat} debido a que no toma en cuenta ciertas pérdidas ocasionadas por procesos internos de la batería [5]. Este modelo además es similar al utilizado por el programa de simulación Matlab/Simulink en su bloque de batería que implementa un modelo dinámico parametrizado para representar los tipos más populares de baterías recargables. Para baterías de Li-Ion, se representan en las siguientes expresiones de modelo de carga y descarga [2].

Modelo de carga ($i^* < 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (3.15)$$

Modelo de descarga ($i^* > 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (3.16)$$

Donde:

i : Corriente de la batería (A)

i^* : Dinámica de corriente de baja frecuencia (A)

it : Capacidad extraída (Ah)

Q : Capacidad máxima de la batería (Ah)

A : Voltaje exponencial (V)

B : Capacidad exponencial (Ah^{-1})

3.4. Estado de Carga de la Batería

En el modelo de batería de litio que tiene Matlab/Simulink, se utiliza un bloque del programa, donde se ingresa el voltaje y capacidad nominal de una batería a simular, La estimación del SoC se consigue mediante los métodos de resistencia, filtro de Kalman y el contador de Coulomb [2], este último se basa en la medición de flujos de carga eléctrica desde y hacia la batería, para poder estimar el SoC se expresa mediante la ecuación (3.12), además, este método puede aplicarse a las baterías de todos los EV [2]. En donde se observa el estado de carga de una batería de litio, esta se debe integrar la corriente en función del tiempo, luego dividir por la capacidad de corriente Q para obtener un SoC equivalente al modelo de batería de Matlab/Simulink. Al analizar la expresión de la ecuación (3.12), cuando la corriente es positiva, la batería se descarga, ya que según la ecuación disminuye el SoC. En cambio, si la corriente es negativa el SoC aumenta y por ende se carga la batería. Conforme a lo anterior, la corriente que se debe integrar en función del tiempo es la corriente medida saliendo de la batería para la eficaz estimación del estado de carga.

La relación que modela el estado de carga se puede representar mediante la Figura 3.7.

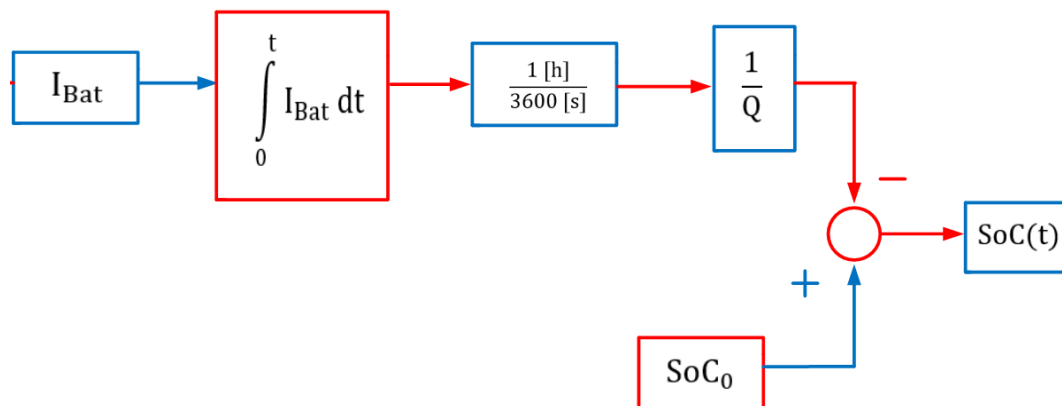


Figura 3.7 Diagrama de Bloques SoC

De la Figura 3.7, el estado de carga inicial (SoC_0) mediante la ecuación será de un 100 %, se mide la corriente saliendo de la batería, luego de integrar la corriente, se agrega una ganancia que representa la proporción entre hora y segundos, después otra ganancia con la capacidad nominal en (Ah) de la batería y finalmente se comparan con el valor del estado de carga inicial SoC_0 , para así determinar eficazmente el SoC de la batería.

Para representar el estado de carga de la batería se simula mediante Matlab/Simulink, se utiliza de referencia el bloque de batería de litio del programa que también el SoC inicial corresponde a un 100 %, a continuación, se evalúa el SoC con una batería de litio LG Chem, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 3.1, donde se someten a dos tipos de resistencia de carga luego se observa la comparación entre los estados de carga de la batería de Matlab utilizada como referencia y la representación matemática del contador de Coulomb.

Tabla 3.1 Celda Li-Ion LG Chem E66A

Parámetro	Valor
V_{nom}	3.657 [V]
Q	65 [Ah]

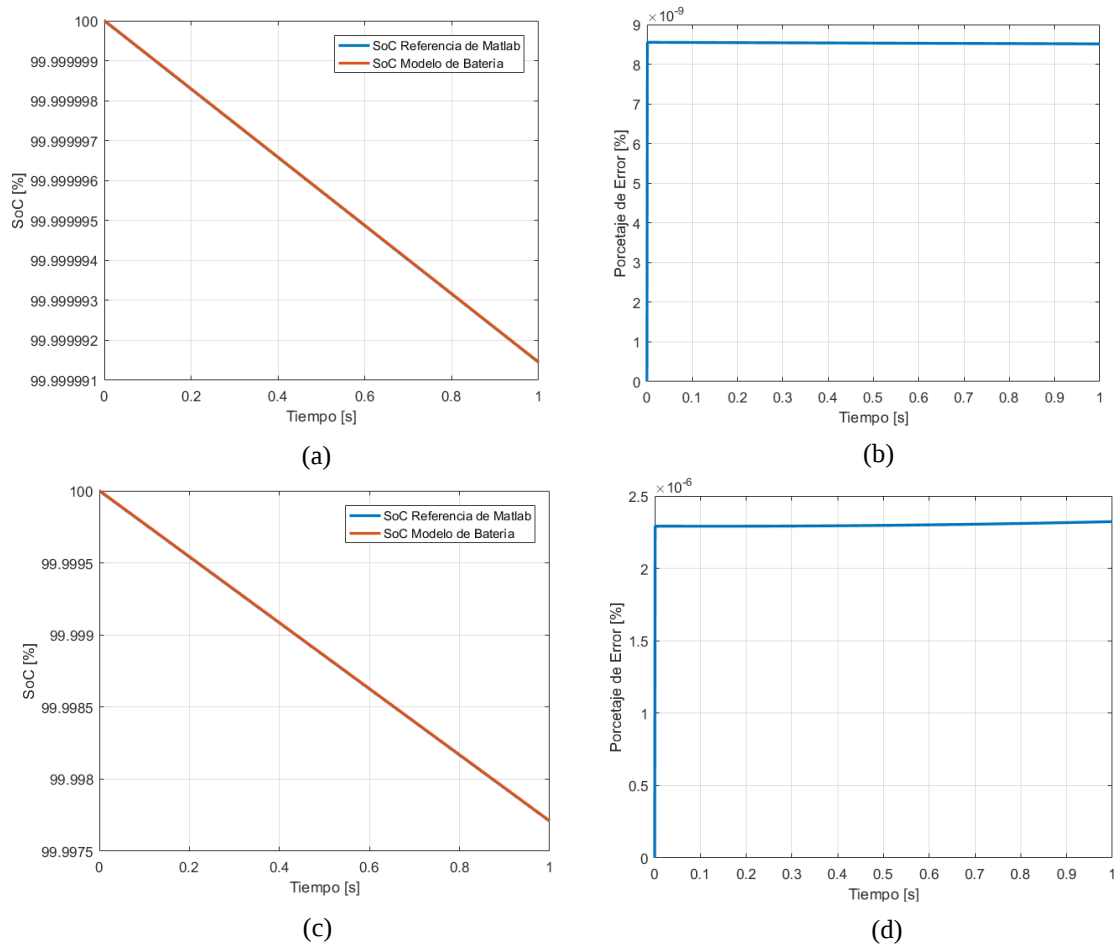


Figura 3.8 Estado de Carga

- (a)** SoC de ambos modelos con una resistencia de carga de 215 Ω , **(b)** Variación entre ambos SoC con una resistencia de carga de 215 Ω , **(c)** SoC de ambos modelos con una resistencia de carga de 0.8 Ω , **(d)** Variación entre ambos SoC con una resistencia de carga de 0.8 Ω .

De la Figura 3.8. (a), se observa el nivel de estado de carga de la batería de litio LG Chem E66A de la referencia y el implementado mediante el contador de Coulomb para el modelo de batería, ambos modelos conectados a una carga resistiva en serie de 215Ω , durante la descarga de la batería obtienen un nivel de SoC semejante en el primer segundo de la simulación. De lo anterior en la Figura 3.8 (b), muestra el gráfico correspondiente al error porcentual entre los dos modelos de baterías que comprende a un valor ínfimo del orden de 10^{-9} . En la Figura 3.8 (c), se aprecia la misma prueba anterior pero ahora ambos modelos conectados a una resistencia de carga en serie de 0.8Ω , en el proceso de descarga de la batería el SoC son similares para los dos modelos y en la Figura 3.8 (c), se presenta el error que corresponde a ambos modelos que alcanza un valor mínimo del orden de los 10^{-6} .

3.5. Capacidad de Corriente

La capacidad de corriente Q determina la cantidad de carga eléctrica que puede suministrar un sistema de almacenamiento de energía eléctrica en el tiempo. Para simulación en la descarga de voltaje para ambos modelos se necesita conocer las equivalencias entre los sistemas, el programa Matlab/Simulink opera en el dominio del tiempo en segundos para la simulación en el eje de las abscisas. Es por esto que se debe tener en consideración algunas expresiones sobre la capacidad de corriente para comprender la dinámica de descarga de una batería de litio. La unidad derivada de la cantidad de electricidad por el sistema internacional es el Coulomb (C), se define como la cantidad de carga eléctrica transportada en un segundo por una intensidad de corriente, cuya expresión de [47] se muestra a continuación:

$$1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} \Rightarrow 1 \text{ C} = 1 \text{ As} \quad (3.17)$$

De lo anterior, en las baterías el uso normal de capacidad de corriente Q en Ampere-hora (Ah), por lo tanto:

$$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ As} \quad (3.18)$$

Esto indica la cantidad de carga eléctrica almacenada en la batería, la expresión de tiempo de descarga t , capacidad de corriente Q e intensidad de corriente del consumo eléctrico de la aplicación I , se muestra en la ecuación (3.19) y se utilizará en las pruebas de descarga del capítulo 4.

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (3.19)$$

3.6. Voltaje de Circuito Abierto de la Batería

El modelo Thevenin-Shepherd para el cálculo del voltaje de circuito abierto de la batería, se compone de diversos parámetros que caracterizan una batería. Estos parámetros se suministran mediante la curva de descarga. En función de las características de descarga de la batería, las curvas típicas se deben analizar en tres secciones como se puede observar en la siguiente Figura 3.9.

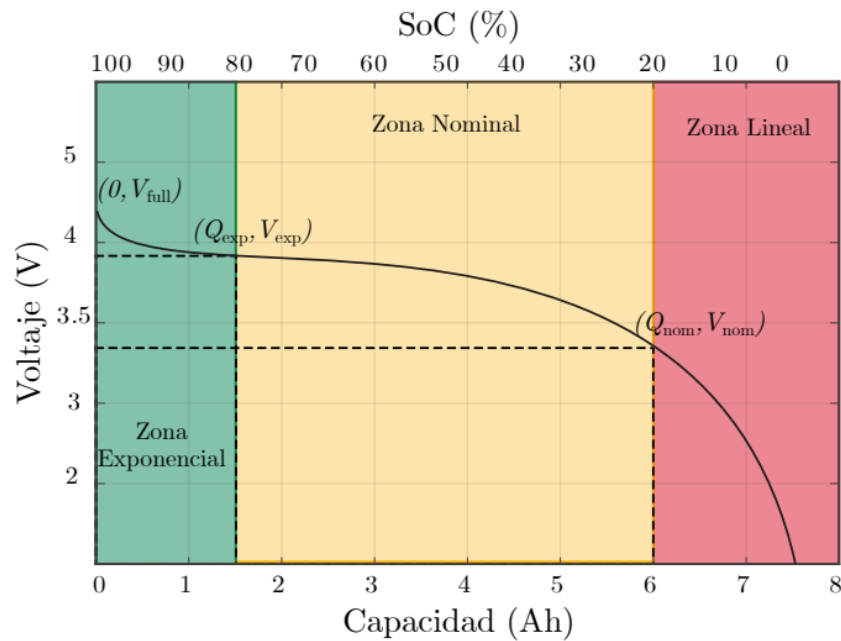


Figura 3.9 Curva de Descarga Típica de la Batería de Litio a Corriente Constante [9]

De la Figura 3.9, se observa un gráfico de voltaje (V), SoC (%) y capacidad de corriente (Ah), esta última, representa la descarga de corriente producida por la batería al operar a una cierta unidad de tiempo. En el eje inferior de las abscisas de la misma figura, puede ser representado mediante la escala de capacidad de corriente (Ah) o de tiempo en horas, minutos o segundos, según la amplitud de corriente extraída durante la operación de la batería durante la descarga. En otras palabras, una batería con una capacidad de corriente de 7500 mAh es la cantidad de electricidad que genera al operar durante una hora, cuando fluye una corriente de descarga nominal de 7.5 A. La primera sección de la curva, representa el voltaje de inicio de la zona exponencial cuando la batería está completamente cargada, durante el tiempo de extracción de corriente en esta sección, el voltaje decrece hasta alcanzar la siguiente área de operación.

La segunda sección de la curva de descarga representa la zona nominal, en este tramo la batería entrega todas sus prestaciones nominales si la carga exige esos requerimientos de operación, durante el tiempo de descarga, la integración de corriente en esta región de la batería alcanza los límites en el fin de la zona nominal, en consecuencia, el voltaje de la batería también llega a su condición nominal, hasta este punto la batería puede entregar todo su servicio de exigencia nominal a la aplicación. Finalmente, en la última sección representa la zona lineal de descarga gradual de la batería hasta alcanzarla en su totalidad, en este tramo la batería sigue entregando potencia, sin embargo, sus condiciones de operación no logran satisfacer requerimientos de algunas aplicaciones de la carga, en este caso, se debe cargar este sistema de almacenamiento para conseguir que opere eficazmente.

Estas curvas de descarga pueden representar de forma precisa mediante el Modelo Thevenin-Shepherd el voltaje dinámico cuando la corriente varía y se tiene en cuenta el voltaje de circuito abierto en función del estado de carga SoC que se observa en la ecuación (3.13).

En esta expresión representa de manera más precisa la variación de dinámica del voltaje durante un cambio de corriente de carga, el parámetro it es la capacidad de corriente de carga consumida, donde el parámetro A es la amplitud de voltaje (V) durante la caída en la zona exponencial que se encuentra en la primera sección de la curva típica de descarga. Además, es representado mediante la siguiente expresión (3.16).

$$A = E_M - E_{exp} \quad (3.16)$$

De la expresión anterior, E_M es el voltaje máximo de la zona exponencial, E_{exp} es el voltaje al final de la zona exponencial. El parámetro B es la constante de tiempo inversa de la zona exponencial, en la primera sección de la curva de descarga, está dado por la siguiente expresión (3.17).

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (3.17)$$

En esta expresión Q_{exp} es la capacidad de corriente consumida en la final de la zona exponencial, para estos parámetros se debe analizar la zona exponencial de la curva de descarga, donde es posible extraer los valores de voltaje máximo E_M y el final de la zona exponencial Q_{exp} y E_{exp} , para una buena comprensión del comportamiento en esta sección.

El voltaje de polarización K , para su ecuación se debe extraer datos de la sección nominal de la curva de descarga tales como voltaje nominal E_{nom} y capacidad nominal Q_{nom} , esta será representada en la siguiente expresión (3.18).

$$K = \frac{(E_M - E_{nom} + A \cdot (e^{(-B \cdot Q_{nom})} - 1)) \cdot (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (3.18)$$

De la expresión (3.18), Q_{nom} es la capacidad de corriente de la batería en el final de la zona nominal de la curva de descarga, y Q es la capacidad nominal de corriente de la batería. El voltaje de circuito abierto de la batería a máxima capacidad E_0 , es calculado en la siguiente expresión (3.19).

$$E_0 = E_M + K + R \cdot i - A \quad (3.19)$$

De las expresiones anteriores, la precisión con la que se logren los parámetros dependerá de la precisión del modelo [5], Matlab/Simulink también utiliza las curvas típicas de descarga separada en tres secciones para calcular los parámetros del voltaje de circuito abierto.

3.7. Análisis de Resultados

Del contador de Coulomb cuya expresión se encuentra en [8], se analizó dos tipos de resistencia de carga mediante una batería de litio LG Chem E66A para ambos modelos, para la prueba con una mayor resistencia 215Ω se obtuvo una menor variación asociada al SoC, es decir la corriente extraída hacia la carga es menor lo que conlleva en este caso que la integración de corriente del contador de Coulomb es más precisa del orden de 10^{-9} , mientras que la prueba con menor resistencia de carga 0.8Ω , es decir con mayor corriente de descarga se consigue un error del orden de 10^{-6} . Si bien hay una diferencia en las variaciones de SoC dependiendo de la resistencia de carga, sin embargo, ambos son valores ínfimos y logran un resultado adecuado en la estimación del SoC que permite de buena manera a conseguir el voltaje en la dinámica de descarga. Para lograr el voltaje en los terminales de la batería se analizaron las expresiones del voltaje de circuito abierto de [5], además, se generan estos parámetros mediante la batería de Matlab con los valores nominales de capacidad y voltaje de la batería, los resultados son similares a los entregados por las ecuaciones.

Capítulo 4. Modelo de Batería Litio-Ion, Simulaciones y Resultados

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta y evalúa el Modelo de Batería Litio-Ion, para la simulación del modelo de la batería se utilizaron tres marcas de baterías de Li-Ion que se encuentran como BESS en el mercado de la industria automovilística, la CLI Panasonic NCR18650PF utilizadas por la empresa estadounidense consolidada en la producción de vehículos eléctricos Tesla, utilizadas para el modelo S, la CLI LG Chem E66A, producción destinada a la empresa alemana Porsche, que vuelve a sus inicios en la propulsión eléctrica de vehículos, ahora para el modelo Taycan y la CLI Panasonic NCR20700A, utilizadas por la empresa Tesla para el modelo 3 y bancos de baterías domiciliarias. Los parámetros de las curvas de descargas de las baterías y simulaciones se muestran a continuación.

4.2. Modelo de Batería Litio-Ion

Este modelo se ilustra en la Figura 4.1, ha sido implementado en el software Matlab/Simulink y es desarrollado para replicar el funcionamiento de descarga de la batería a analizar.

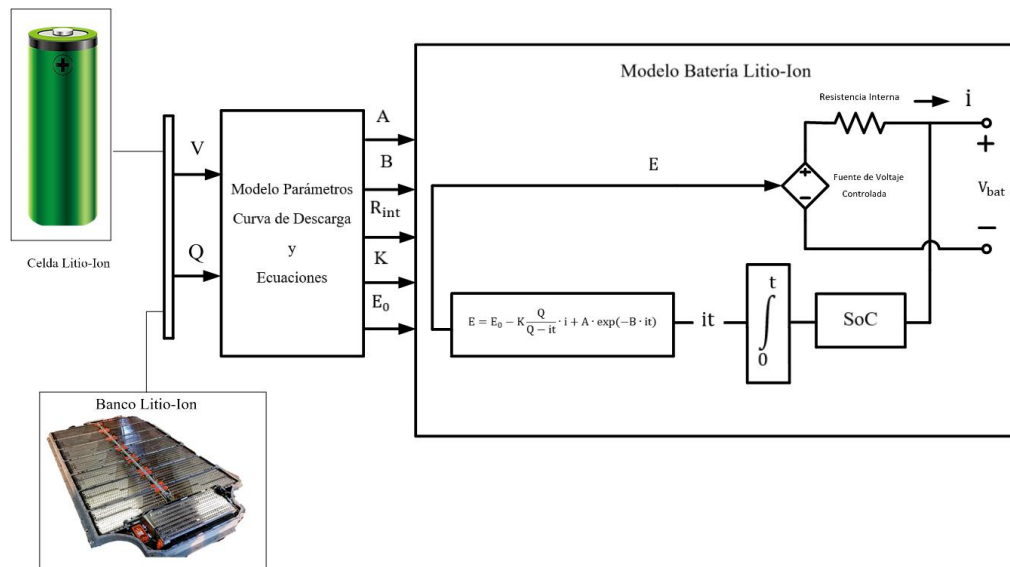


Figura 4.1 Modelo de Batería Litio-Ion

Como se observa en la Figura 4.1, el modelo de batería está formado por dos bloques, modelo de batería mediante Thevenin-Shepherd y modelo de parámetros, que definen el comportamiento dinámico de descarga de la celda o banco a analizar, Este modelo caracteriza el voltaje de circuito

abierto mediante una fuente de tensión controlada, en donde mediante la ecuación de Shepherd, se extraen de la celda o banco los parámetros nominales de voltaje, capacidad de corriente y resistencia interna R_{int} entregados por el fabricante, además se agregan los parámetros de la batería de litio a estudiar evaluando sus ecuaciones, que componen la curva de descarga, tales como la amplitud de voltaje zona exponencial A , constante inversa de tiempo de zona exponencial B , voltaje de circuito abierto a capacidad máxima E_0 , y el coeficiente de voltaje de polarización K , este último parámetro está asociado a las dinámicas de factores químicos como la conductividad del electrolito o movilidad de los iones de litio. Estos parámetros permiten modelar de manera eficaz el comportamiento de descarga de una batería real, el modelo inicia midiendo la corriente de descarga, luego se agrega el cálculo de SoC para después obtener la integración de corriente, donde ambas ingresan a la ecuación de Shepherd junto a los parámetros extraídos de la batería. En las simulaciones a partir del subcapítulo 4.4, se evalúa cada batería de litio mediante las curvas de descarga a corriente nominal que entrega el fabricante, donde, el eje de las abscisas de la curva puede ir representada en capacidad de corriente nominal es decir a una tasa de carga/descarga (C-rate), que corresponde a la relación del ritmo de descarga o carga de una batería respecto a su capacidad máxima [50], que es de 1C o en tiempo, de esta última corresponde a la descarga de corriente en una hora, que mejora la precisión del Modelo de Batería Litio-Ion.

4.3. Ejecución de la Simulación en Matlab/Simulink

De las CLI o bancos se deben ingresar tanto en el Modelo de Batería Litio-Ion y bloque de batería de Matlab/Simulink los parámetros de voltaje V_{nom} y capacidad Q , de acá se comparan las referencias de SoC, voltaje y corriente entre ambos modelos a implementar, y luego se analizan sus resultados. Las simulaciones de ambos modelos estarán conectadas en serie a una resistencia de carga aleatoria de 0.8Ω . Al medir la corriente i de salida de la batería del Modelo de Batería Litio-Ion apreciada en la Figura 4.3, esta corriente ingresa al bloque de estado de carga que se muestra en la Figura 4.2.

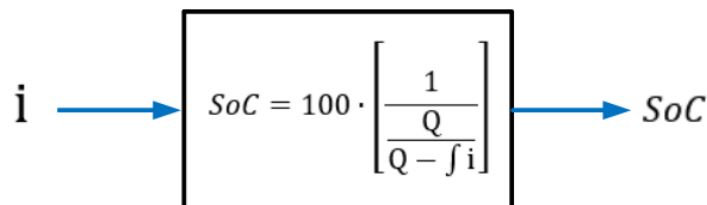


Figura 4.2 Estado de Carga del Modelo de Batería Litio-Ion

Al obtener el SoC de la batería, se empieza a simular el voltaje del Modelo de Batería Litio-Ion que se ilustra en la Figura 4.3, en este se agregan las cargas para simular los escenarios de descarga a evaluar.

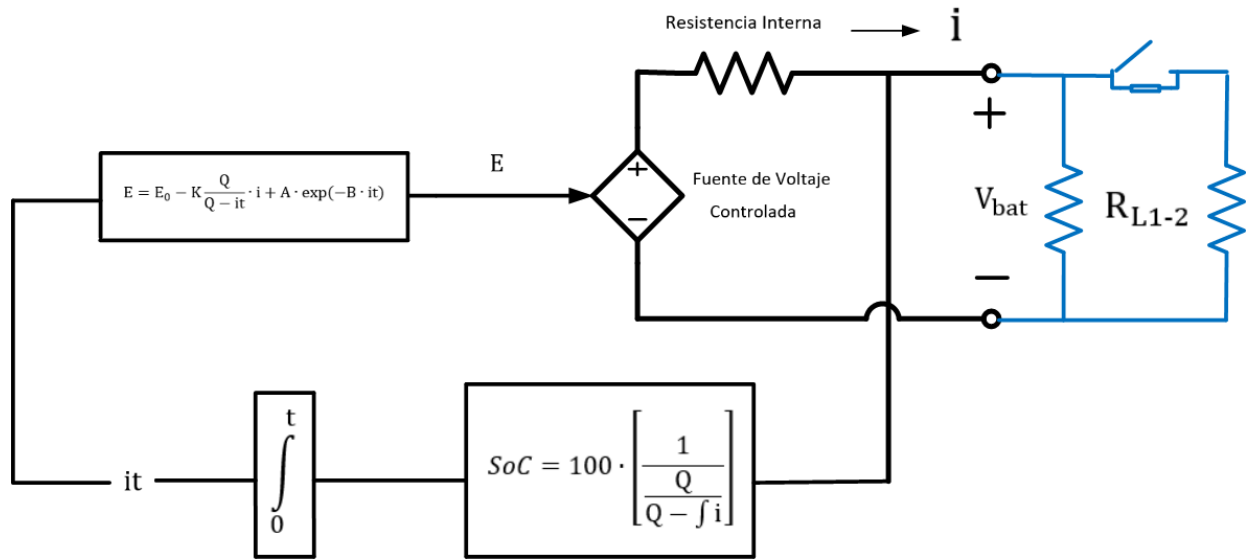


Figura 4.3 Voltaje del Modelo Batería Litio-Ion

El circuito de simulación a implementar del bloque de batería de Matlab/Simulink es el siguiente:

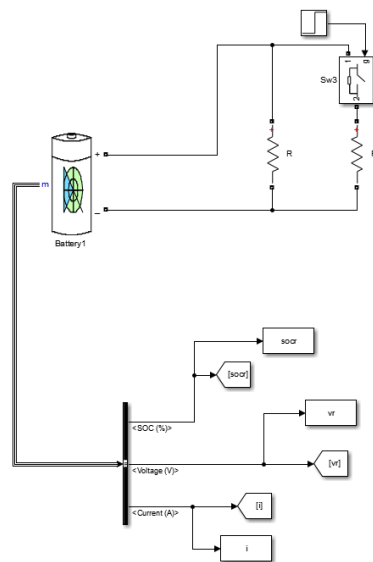


Figura 4.4 Bloque Batería Litio-Ion Matlab/Simulink

4.4. Simulación CLI Panasonic NCR18650PF

4.4.1 Prueba Carga Nominal

En esta prueba, se simula la celda de Li-Ion Panasonic NCR18650PF de tipo cilíndrica, durante un tiempo en la simulación de 100 s, correspondiente a una capacidad de corriente extraída por la CLI de 125 mAh, cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 4.1, ambas simulaciones están conectadas a una carga de 0.8Ω , la potencia suministrada por el Modelo de Batería Litio-Ion alcanza los 18.81 W al terminada la simulación, los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.1 Celda Litio-Ion Panasonic NCR18650PF

Parámetro	Valor
V_{nom}	3.6 [V]
A	0.29416 [V]
Q	2.7 [Ah]
B	22.6159 [Ah ⁻¹]
K	0.0072252 [V]
E_0	3.9322 [V]
R_{int}	0.013333 [Ω]

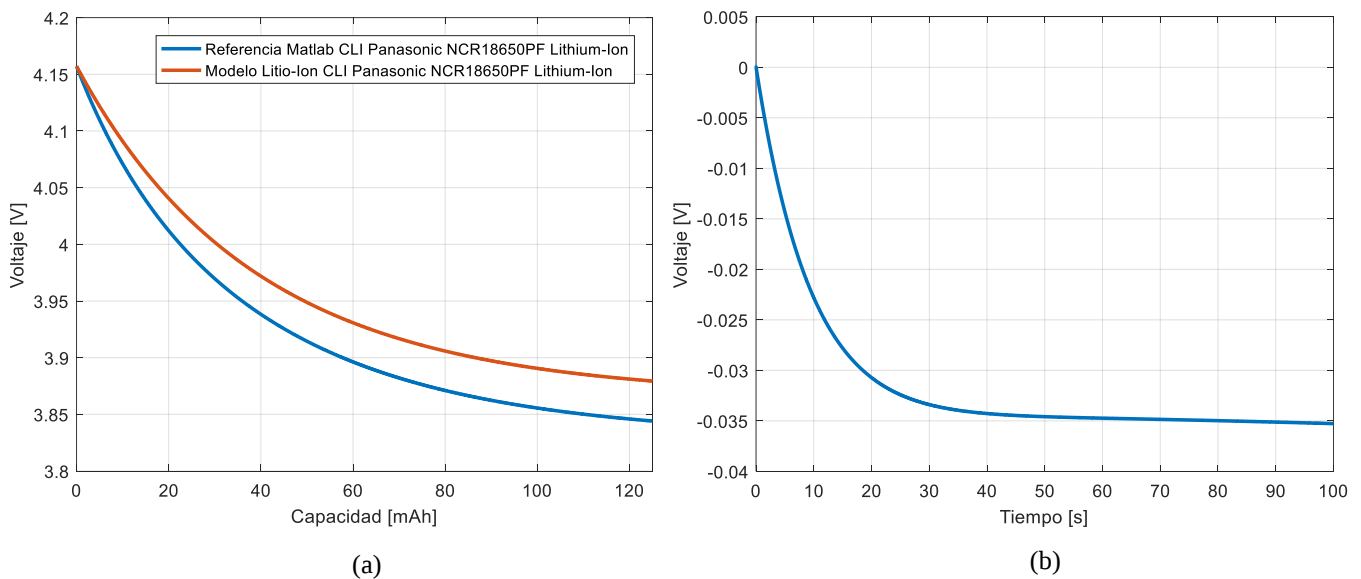


Figura 4.5 Simulación Celda Litio-Ion Panasonic NCR18650PF

(a) Voltaje de la Referencia, Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, **(b)** Variación Entre Ambos Voltajes

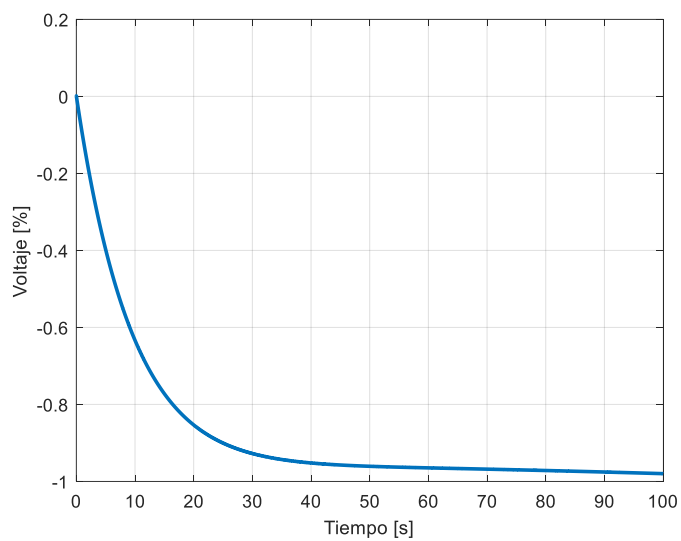


Figura 4.6 Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas Panasonic NCR18650PF



Figura 4.7 Celda Litio-Ion Panasonic NCR18650PF

4.4.2 Prueba Impacto de Carga

A continuación, se le realiza en un tiempo de simulación de 50 s, un impacto de carga correspondiente a los 62.5 mAh de capacidad de corriente entregada por la CLI, se agrega una resistencia en paralelo de 0.8Ω , luego del impacto el Modelo de Batería Litio-Ion suministra una capacidad de corriente de 125 mAh a una potencia de 36.2 W al final de la simulación.

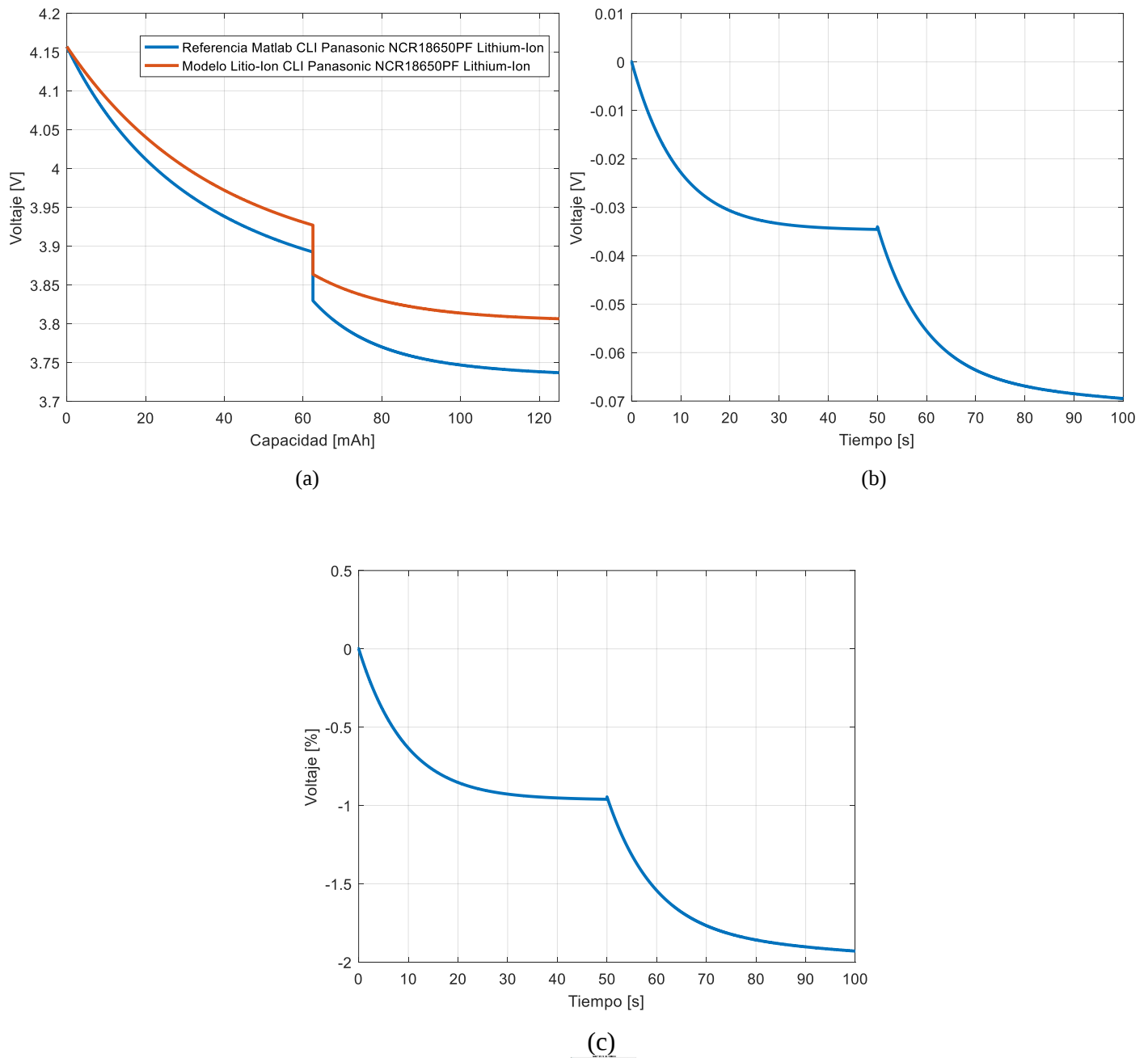


Figura 4.8 Simulación Celda Litio-Ion Panasonic NCR18650PF, Impacto de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, **(b)** Variación Entre Ambos Voltajes, **(c)** Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas

4.4.3 Prueba Disminución de Carga

Ahora se simula con una carga de 1.6Ω , durante un tiempo de simulación de 100 s, que corresponde a una capacidad de corriente extraída por la CLI de 62.49 mAh, la potencia suministrada del Modelo de Batería Litio-Ion al finalizar la simulación alcanza los 9.79 W.

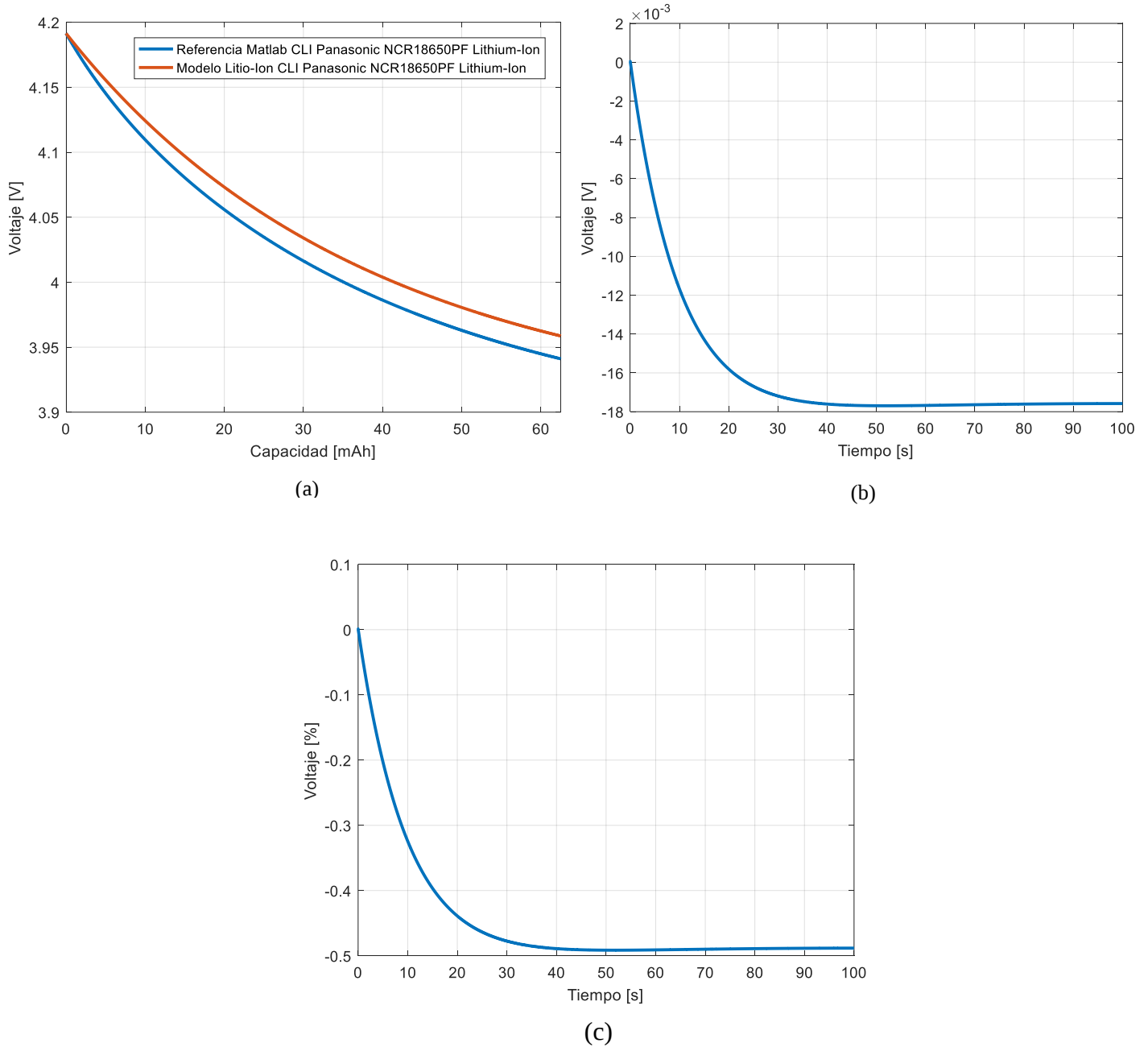


Figura 4.9 Simulación Celda Litio-Ion Panasonic NCR18650PF, Disminución de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, (b) Variación Entre Ambos Voltajes, (c) Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas

En la primera prueba de carga nominal con una resistencia de 0.8Ω , la batería de litio Panasonic NCR18650PF opera a una descarga de corriente de 4.5 A que es mayor a las prestaciones nominales de la CLI y su capacidad permite operar durante menos de una hora, ya que la resistencia de carga aproximada para que esta batería opere a sus condiciones nominales es de 1.33Ω a una corriente de 2.7 A durante una hora. En la Figura 4.5 (a), se aprecian los comportamientos de ambos modelos, donde existe una variación de voltaje en la CLI Panasonic NCR18650PF, donde alcanza los 125 mAh de capacidad de corriente extraída por la celda. Se observa en la Figura 4.5 (b), durante los 30 segundos, la variación de voltaje entre ambas curvas alcanza alrededor de 0.035 V, que corresponde a un porcentaje de 0.97 % mostrada en la Figura 4.6.

Ahora se analiza los gráficos de la prueba a impacto de carga, para ambos modelos, durante la simulación de la dinámica de descarga de la CLI Panasonic NCR18650PF a una corriente de descarga de 4.5 A, luego al producirse un impacto de carga durante los 62.5 mAh de capacidad de corriente suministrada por la CLI, equivalente a 50 s, se produce un alza de corriente que alcanza hasta los 9 A operando en la área nominal, la baja de voltaje se genera al emplear suficiente suministro de corriente, hasta alcanzar el valor nominal de 3.6 V, esto significa que no hay cambios en la capacidad que alcanza los 125 mAh, pero si disminuye la capacidad durante la operación en su zona nominal durante la simulación, en otras palabras la batería se descarga más rápido y su capacidad permite operar por menos de una hora. Se observa en la Figura 4.8 (b), antes del impacto de carga, la variación entre las tensiones logra los 0.034 V, luego del impacto se alcanza una variación de voltaje de 0.069 V. En la Figura 4.8 (c), se observa el aumento en la variación entre ambos voltajes de manera porcentual, antes de incrementar la corriente de descarga ambas señales logran un error aproximadamente de 0.94 %, luego del impacto a un tiempo de 50 s, aumenta al 1.93 %.

En la prueba de disminución de corriente de carga, se observa el comportamiento dinámico de la CLI Panasonic NCR18650PF en la Figura 4.9 (a), la dinámica de descarga de ambos modelos, en donde, al aumentar la resistencia en 1.6Ω del circuito a una corriente de descarga de 2.25 A, es decir, una resistencia de carga que no exige las condiciones nominales de operación de la CLI y su capacidad permite operar por más de una hora, se produce una baja en la potencia en la salida, causando en la batería la disminución de corriente que entrega a la carga para ambos modelos, durante un tiempo de 30 s, la variación porcentual observada en la Figura 4.9 (c) entre ambas curvas alcanza los 0.48 %, que corresponde a un voltaje alrededor de 0.017 V, mostrado en la Figura 4.9 (b).

4.5. Simulación CLI LG Chem E66A

4.5.1 Prueba Carga Nominal

Ahora, se simula la celda de Li-Ion LG Chem E66A, de tipo prismática o bolsa, cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 4.2, se simula en un tiempo de 3000 s, que corresponde a una capacidad de corriente extraída por la CLI de 3809 mAh y una carga de 0.8Ω , y una potencia suministrada por el Modelo de Batería Litio-Ion de 19.96 W al finalizar la simulación.

Tabla 4.2 Celda Litio-Ion LG Chem E66A

Parámetro	Valor
V_{nom}	3.657 [V]
A	0.29875 [V]
Q	65 [Ah]
B	0.93941 [Ah ⁻¹]
K	0.00030486 [V]
E_0	3.9945 [V]
R_{int}	0.00056262 [Ω]

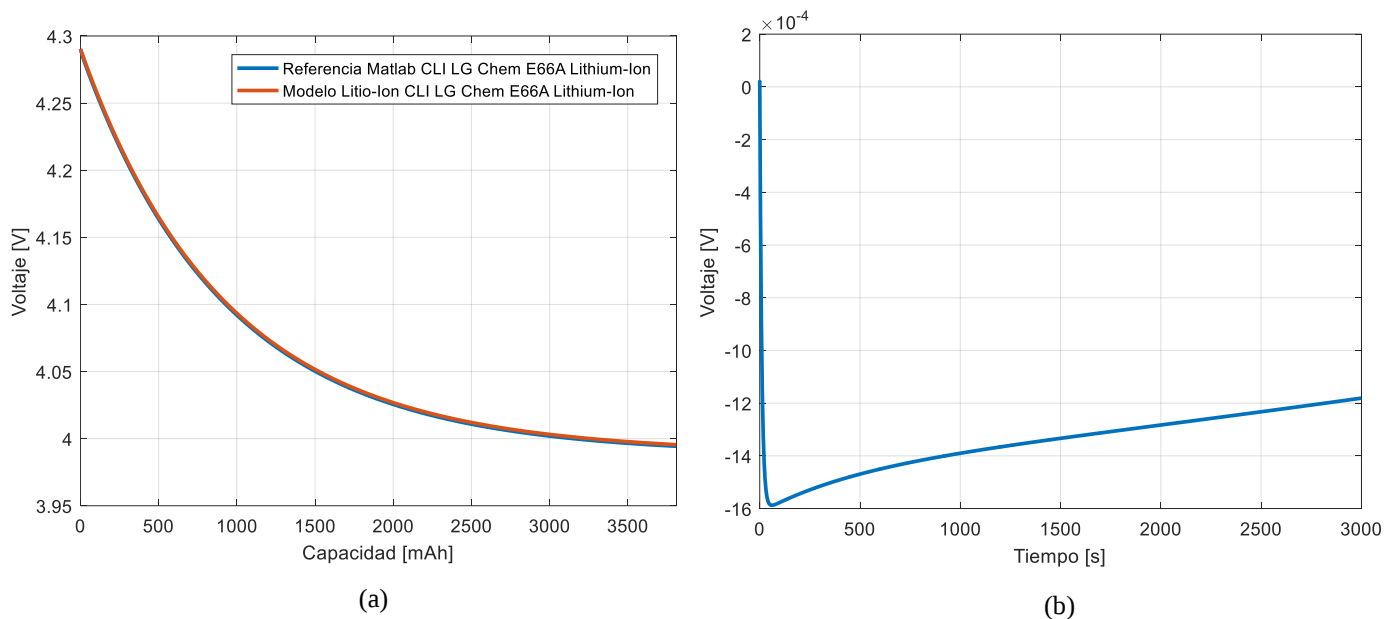


Figura 4.10 Simulación Celda Litio-Ion LG Chem E66A

(a) Voltaje de la Referencia, Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, (b) Variación Entre Ambos Voltajes

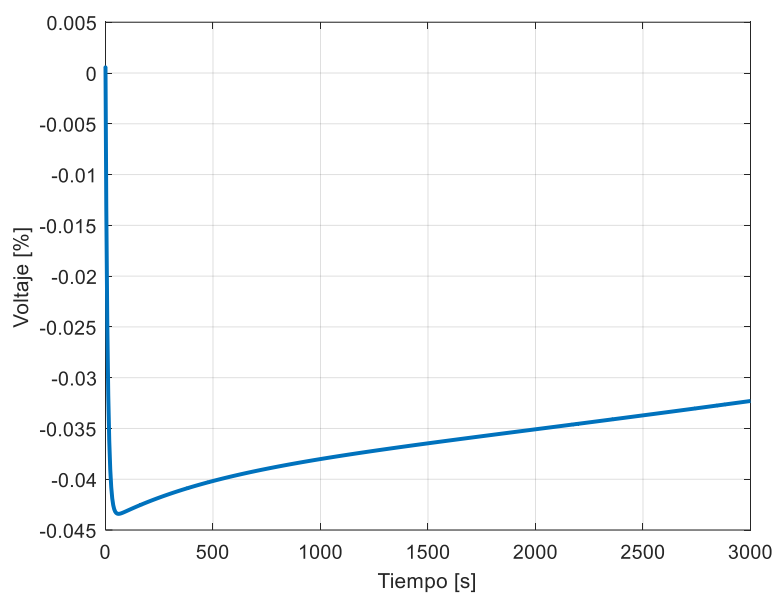


Figura 4.11 Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas LG Chem E66A



Figura 4.12 Celda Litio-Ion LG Chem E66A

4.5.2 Prueba Impacto de Carga

A continuación, se le realiza un impacto de carga a la celda de Li-Ion LG Chem E66A a los 1500 s, correspondiente a una capacidad de corriente entregada por la CLI de 1905 mAh, se agrega una resistencia en paralelo de 0.8Ω , luego del impacto el Modelo de Batería Litio-Ion suministra hasta una capacidad de corriente de 3908 mAh a una potencia de 39.71 W al final de la simulación.

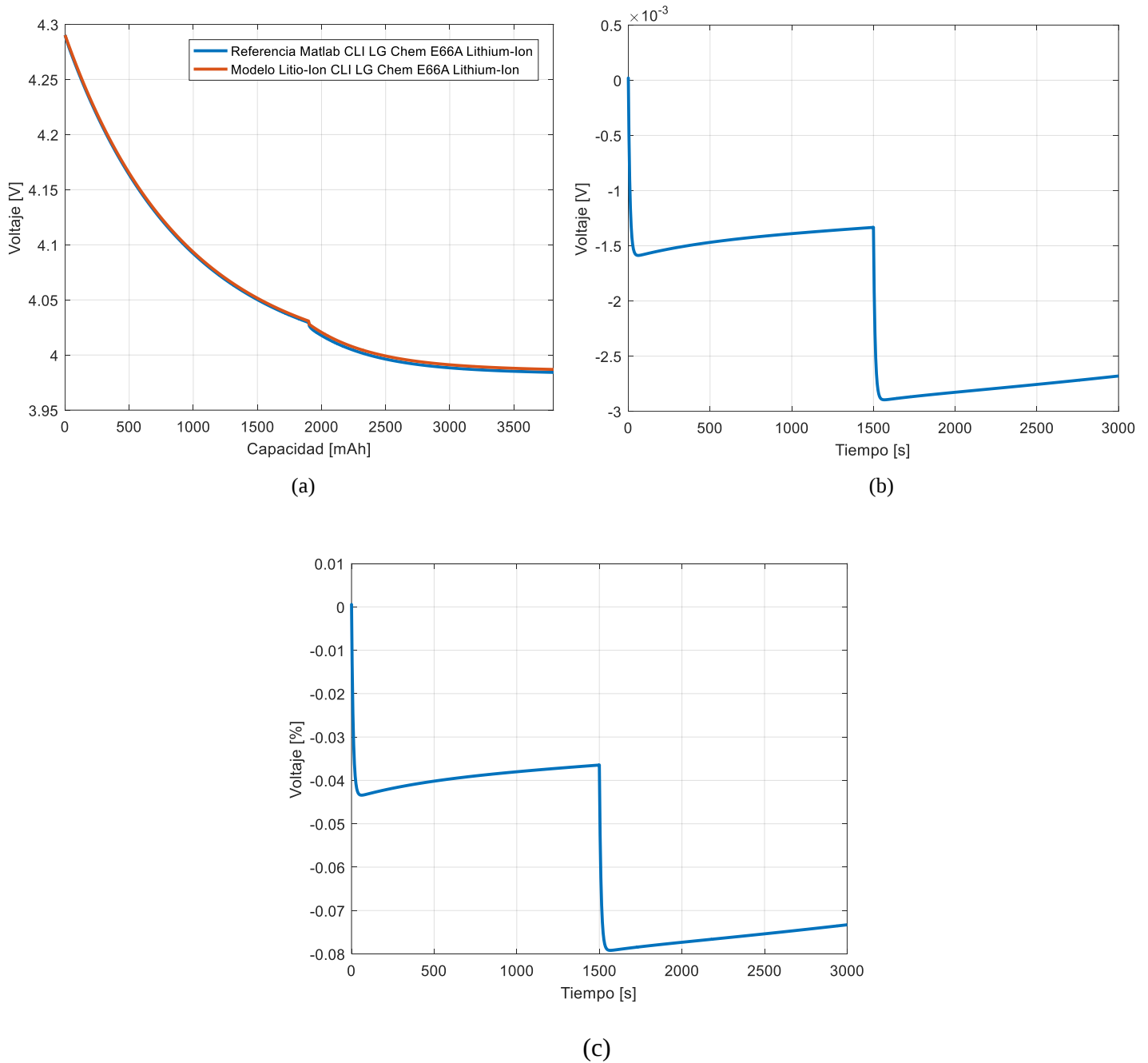


Figura 4.13 Simulación Celda de Litio-Ion LG Chem E66A, Impacto de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, (b) Variación Entre Ambos Voltajes, (c) Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas

4.5.3 Prueba Disminución de Carga

Ahora se simula con una carga de 1.6Ω , durante un tiempo de simulación de 3000 s, correspondiente a una capacidad de corriente entregada por la CLI de 1905 mAh, la potencia suministrada por el Modelo de Batería Litio-Ion al finalizar la simulación alcanza los 10.16 W.

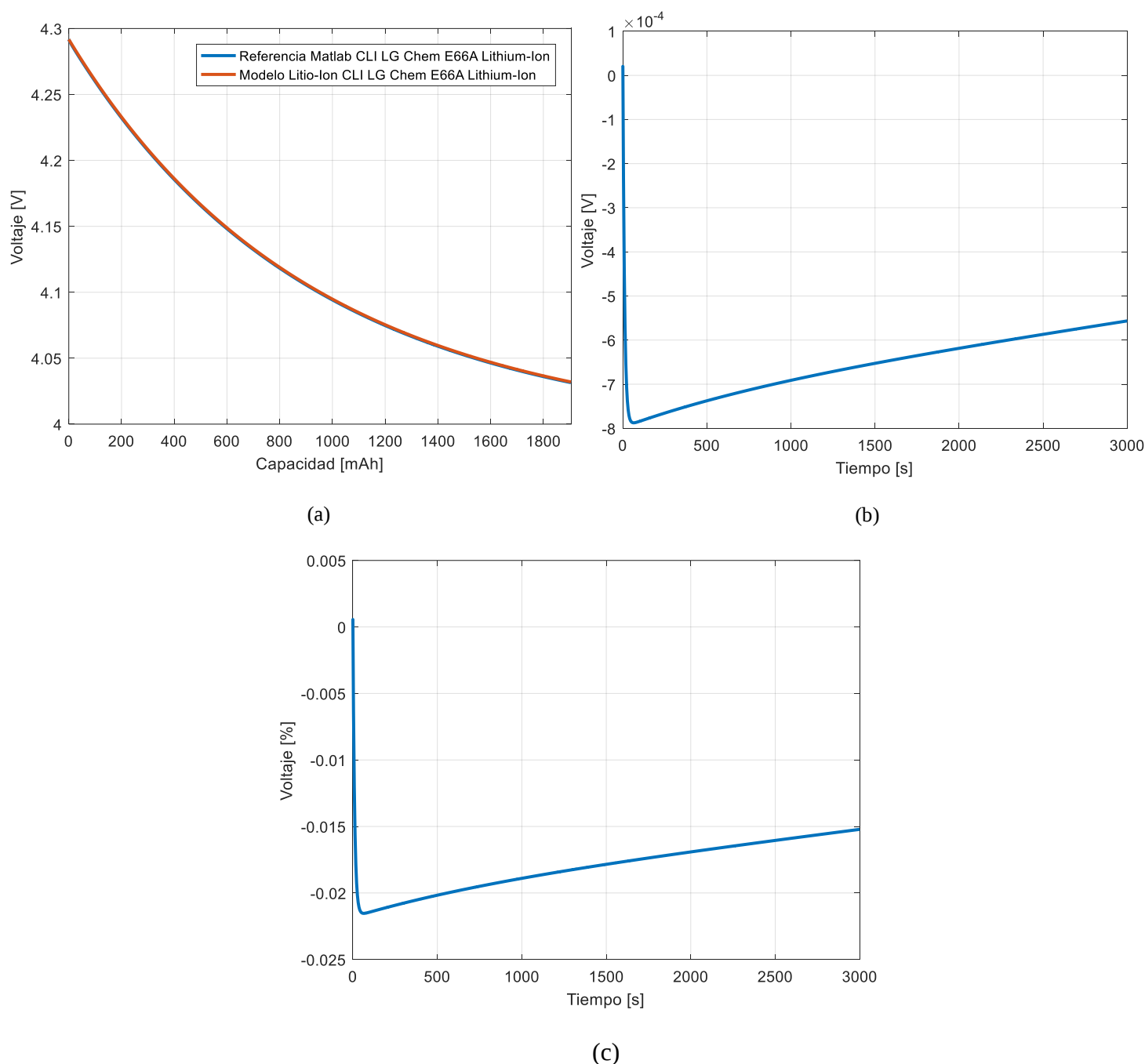


Figura 4.14 Simulación Celda de Litio-Ion LG Chem E66A, Disminución de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, (b) Variación Entre Ambos Voltajes, (c) Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas

En la prueba de carga nominal con una resistencia de 0.8Ω , la CLI LG Chem E66A opera a una descarga de corriente de 4.57 A que es menor a las prestaciones nominales de la CLI y su capacidad permite operar por más de una hora, ya que la resistencia de carga aproximada para que la celda opere a sus condiciones nominales es de 0.0563Ω a una corriente de 65 A. En la Figura 4.10 (a), se observa la dinámica de voltaje en descarga de la CLI LG Chem E66A, para ambos modelos, luego de avanzada la simulación, comienzan a contener una variación de voltaje, durante los 3809 mAh de capacidad de corriente suministrada por la batería. En la Figura 4.11, el error entre ambas curvas alcanza los 0.032 %, que pertenece a una variación de voltaje alrededor de $1.1e^{-3}$ V alcanzando los 3000 s de iniciada la simulación, mostrado en la Figura 4.10 (b).

En la prueba de impacto de carga en la Figura 4.13 (a), se muestra la dinámica de descarga de la CLI LG Chem E66A para ambos modelos, se descarga a una corriente de 4.57 A, antes del impacto de carga producido a los 1905 mAh de capacidad de corriente suministrada por la celda, equivalente a 1500 s de iniciada la simulación, la variación de voltajes alcanza aproximadamente los $1.3e^{-3}$ V, mostrado en la Figura 4.13 (b), con un valor porcentual mostrado en la Figura 4.13 (c) de 0.036 %, luego se produce el impacto de carga, esto genera un alza de corriente de 9.14 A operando en el área nominal, provocando una baja en el voltaje de descarga, es decir, la batería está entregando suficiente corriente, hasta alcanzar su valor nominal de voltaje 3.657 V, esto indica que no hay cambios en la capacidad que alcanza los 3908 mAh, pero si disminuye la capacidad durante la operación en su zona nominal durante la simulación, es decir la batería se descarga más rápido que la prueba anterior, sin embargo, en este caso su capacidad permite operar por más de una hora. Después del impacto en la Figura 4.13 (b), la variación de voltaje entre ambas señales comprende aproximadamente a los $2.6e^{-3}$ V. En la Figura 4.13 (c), se observa de manera porcentual al incrementar la corriente de descarga, después de los 1500 s, la variación de voltaje alcanza los 0.073 % en la descarga.

En la prueba de disminución de corriente de carga con la CLI LG Chem E66A, se muestra en la Figura 4.14 (a), el comportamiento dinámico de descarga ambos modelos, en donde, al aumentar la resistencia en 1.6Ω en el circuito a una corriente de descarga de 2.29 A, provoca una disminución de corriente hacia la carga, es decir no exige las prestaciones nominales de operación de la CLI y su capacidad permite operar por más de una hora, causando en la batería la disminución de corriente hacia la carga, durante la simulación, ambas señales de descarga comienzan a contener un error. La variación porcentual observada en la Figura 4.14 (c) entre ambas curvas alcanza los 0.015 %, que corresponde a un voltaje alrededor de $5.5e^{-4}$ V, alcanzado durante un tiempo de 3000 s, mostrado en la Figura 4.14 (b).

4.6. Simulación CLI Panasonic NCR20700A

4.6.1 Prueba Carga Nominal

Ahora, se simula la celda de Li-Ion Panasonic NCR20700A, de tipo cilíndrica, durante un tiempo en la simulación de 100 s, correspondiente a una capacidad de corriente entregada por la CLI de 125 mAh, cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 4.3, con una carga resistiva de 0.8Ω , la potencia suministrada por el Modelo de Batería Litio-Ion alcanza los 18.95 W al terminada la simulación.

Tabla 4.3 Celda Litio-Ion Panasonic NCR20700A

Parámetro	Valor
V_{nom}	3.6 [V]
A	0.29416 [V]
Q	3.1 [Ah]
B	19.698 [Ah ⁻¹]
K	0.0062917 [V]
E_0	3.9322 [V]
R_{int}	0.011603 [Ω]

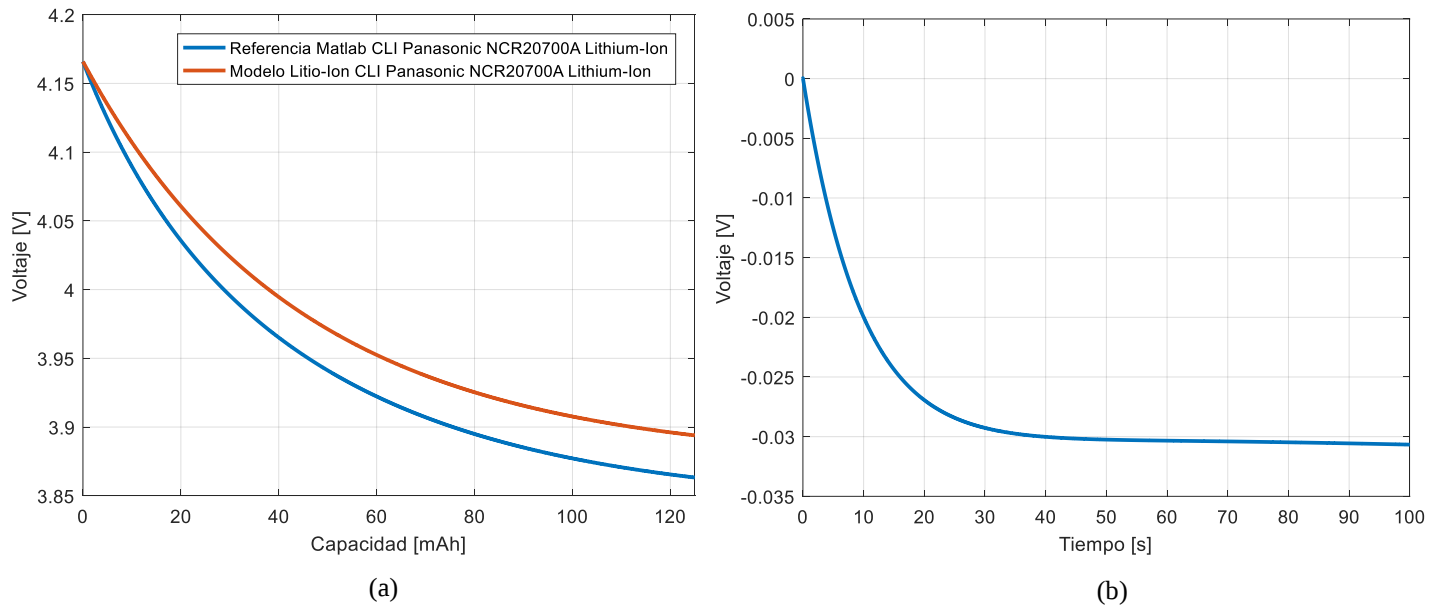


Figura 4.15 Simulación Celda Litio-Ion Panasonic NCR20700A

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, (b) Variación Entre Ambos Voltajes

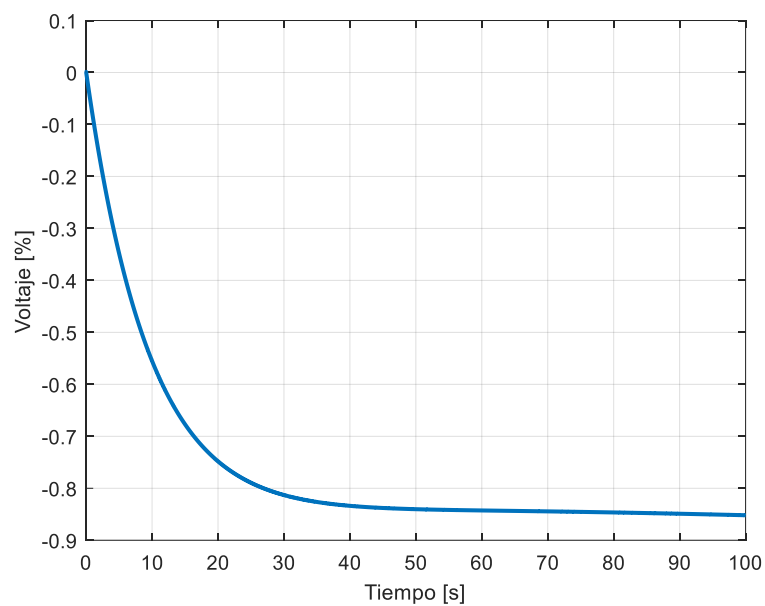


Figura 4.16 Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas Panasonic NCR20700A



Figura 4.17 Celda Litio-Ion Panasonic NCR20700A

4.6.2 Prueba Impacto de Carga

A continuación, se le realiza un impacto de carga a la celda de Li-Ion Panasonic NCR20700A, a los 50 s de la simulación, correspondientes a una capacidad de corriente suministrada de 62.5 mAh, se agrega una resistencia en paralelo de 0.8Ω , luego del impacto el Modelo de Batería Litio-Ion entrega una potencia de 36.55 W al final de la simulación.

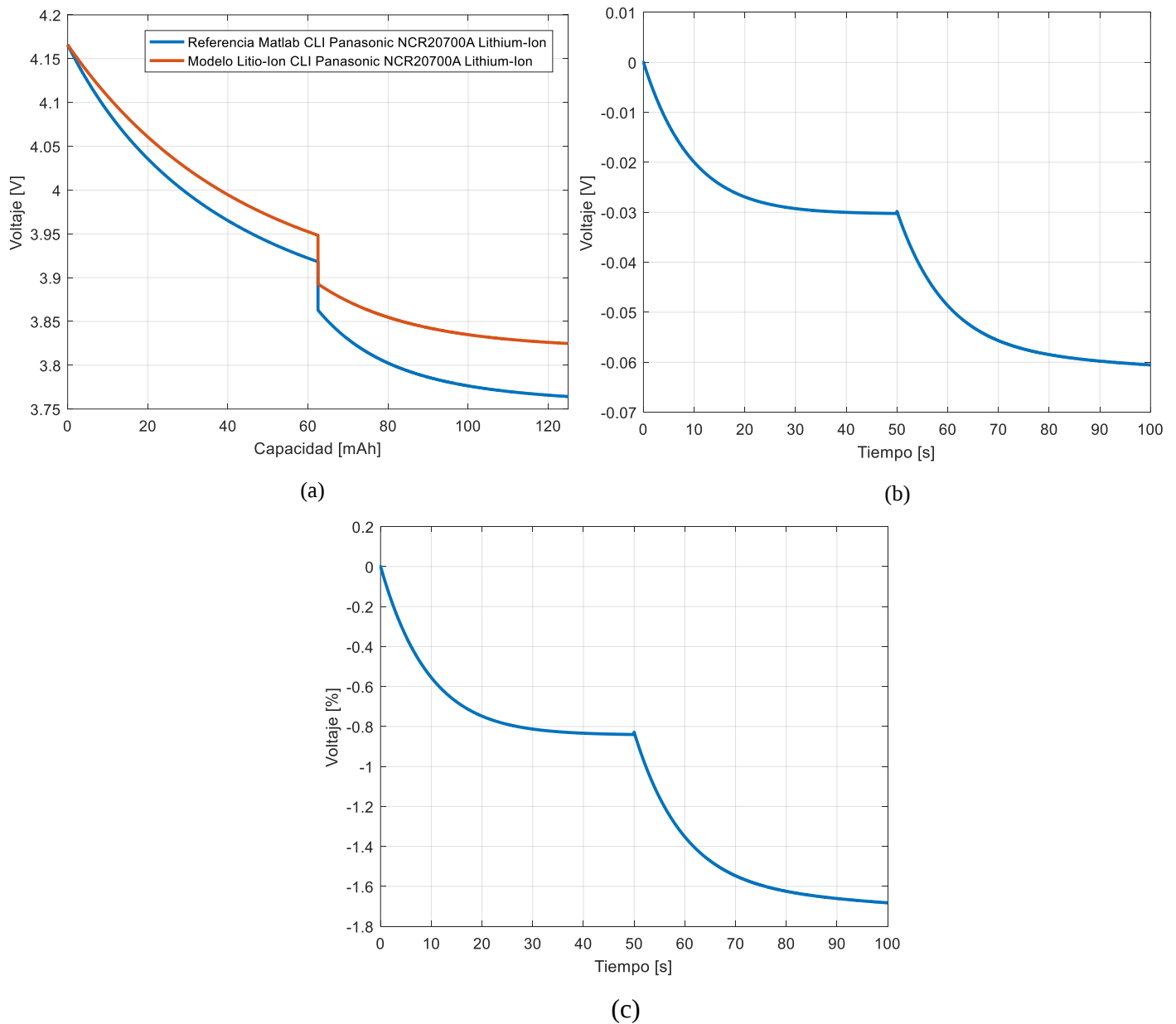


Figura 4.18 Simulación Celda de Litio-Ion Panasonic NCR20700A, Impacto de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, (b) Variación Entre Ambos Voltajes, (c) Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas

4.6.3 Prueba Disminución de Carga

Ahora se simula la batería Panasonic NCR20700A con una carga de 1.6Ω , durante un tiempo de simulación de 100 s, que corresponde a una capacidad de corriente extraída por la CLI de 62.5 mAh, la potencia suministrada por el Modelo de Batería Litio-Ion al finalizar la simulación suministra una capacidad de corriente de 125 mAh a una potencia de 9.88 W.

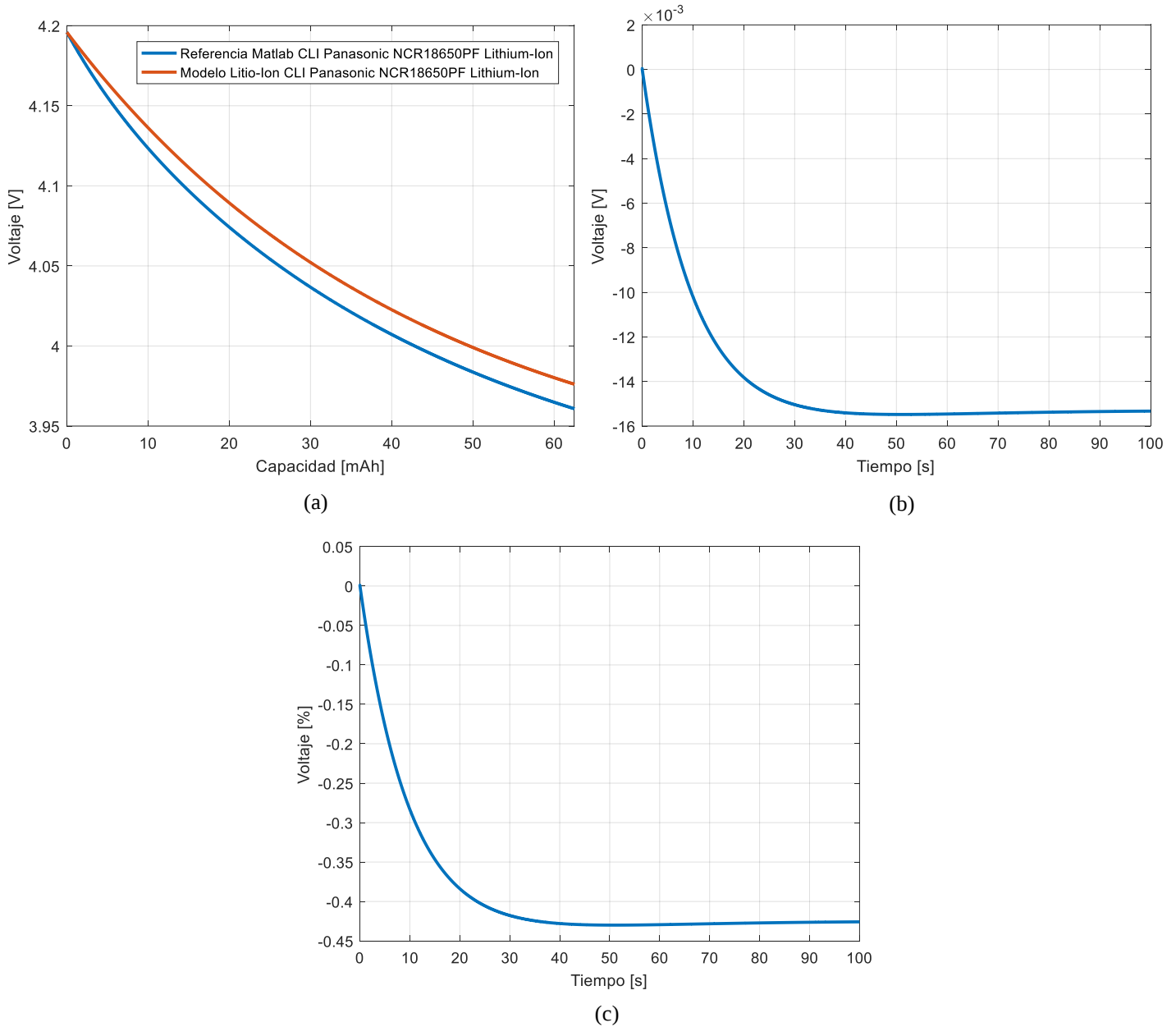


Figura 4.19 Simulación Celda de Litio-Ion Panasonic NCR20700A, Disminución de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería, (b) Variación Entre Ambos Voltajes, (c) Variación Porcentual Entre Ambas Respuestas

En la prueba de carga nominal con una resistencia de 0.8Ω , la CLI Panasonic NCR20700A opera a una descarga de corriente de 4.5 A, que es mayor a las prestaciones nominales de la celda y su capacidad permite operar durante menos de una hora, ya que la resistencia de carga aproximada para que esta batería opere a sus condiciones nominales es de 1.6Ω a una corriente de 3.1 A. En la Figura 4.15 (a), se observa el comportamiento dinámico de ambos modelos para la descarga de la CLI Panasonic NCR20700A, donde alcanza los 125 mAh de capacidad de corriente extraída por la batería. Se observa en la Figura 4.15 (b), luego de iniciada la simulación durante los 30 s, la variación de voltaje entre ambas curvas consigue alrededor de 0.03 V, que corresponde a un porcentaje de 0.85 %, mostrada en la Figura 4.16.

En la prueba de impacto de carga, se aprecia en la Figura 4.18 (a), la dinámica de descarga de la CLI Panasonic NCR20700A con los comportamientos de ambos modelos, antes del impacto de carga, la corriente de descarga es de 4.5 A, luego de generarse el impacto durante los 62.5 mAh de capacidad de corriente extraída por la CLI, equivalente a 50 s en el tiempo, se produce un incremento de corriente que alcanza los 9 A operando en zona nominal, la baja de voltaje se genera al emplear suficiente suministro de corriente, hasta alcanzar el valor nominal de 3.6 V, esto significa que en la simulación no hay cambios en la capacidad que alcanza los 125 mAh, pero si disminuirá la capacidad operando en su zona nominal durante la simulación, es decir, la celda se descarga más rápido y opera por menos de una hora. Se observa en la Figura 4.18 (b), antes del impacto de carga, la variación de voltaje alcanza los 0.029 V, luego del impacto la dinámica de ambas curvas alcanza una variación de 0.06 V. En la Figura 4.18 (c), se aprecia el aumento de la variación entre ambos voltajes de manera porcentual, antes de incrementar la corriente de descarga ambas señales logran un error aproximadamente de 0.82 %, luego del impacto a los 50 s aumenta a 1.68 %.

En la prueba de disminución de carga, se aprecia el comportamiento dinámico de la CLI Panasonic NCR20700A que se observa en la Figura 4.19 (a), la dinámica de descarga de ambos modelos, al aumentar la resistencia en 1.6Ω del circuito a una corriente de descarga de 2.25 A, es decir, la resistencia de carga no exige las prestaciones nominales de la CLI y su capacidad permite operar por más de una hora, se produce una baja de potencia en la salida, causando en la batería la disminución de corriente hacia la carga, las señales de voltaje de descarga comienzan a contener una variación, durante los 30 s, el error porcentual observado en la Figura 4.19 (c) alcanza los 0.42 %, que pertenece a una variación de voltaje alrededor de 0.015 V mostrado en la Figura 4.19 (b).

4.7. Análisis de Resultados del Modelo de Baterías Litio-Ion

De las tres CLI, las curvas analizadas anteriormente corresponden a la sección exponencial de la curva de descargas de las baterías, las de tipo cilíndricas se simularon hasta un tiempo de 100 s, para alcanzar a comparar estas regiones con la batería de tipo prismática se simula hasta los 3000 s, producto de sus diferentes capacidades nominales. Al inicio de la descarga, para todas las CLI simuladas, ambas dinámicas empiezan en el mismo voltaje máximo E_M , estos voltajes simulan las celdas, con un rango menor de variación de voltaje entre el modelo y la referencia. Ambos modelos fueron capaces de entregar sus prestaciones ante los requerimientos de carga y emular su comportamiento dinámico. De lo anterior se muestra en la Tabla 4.4 los Resultados de las tres baterías simuladas mediante la prueba de carga nominal.

Tabla 4.4 Resultados Carga Nominal

CLI	Error Máximo (%)	$\Delta V/V_{nom}$
Panasonic NCR18650PF	0.97	0.035/3.6
LG Chem E66A	0.032	$1.1 e^{-3}$ /3.657
Panasonic NCR20700A	0.85	0.03/3.6

Ahora se muestran los resultados de las tres CLI simuladas mediante la prueba de impacto de carga en la siguiente Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados Impacto de Carga

CLI	Error Máximo (%)	$\Delta V/V_{nom}$
Panasonic NCR18650PF	1.93	0.069/3.6
LG Chem E66A	0.073	$2.6 e^{-3}$ /3.657
Panasonic NCR20700A	1.68	0.06/3.6

Por último, la Tabla 4.6, que muestra los resultados de las tres CLI simuladas mediante la prueba de disminución de carga.

Tabla 4.6 Resultados Disminución de Carga

CLI	Error Máximo (%)	$\Delta V/V_{nom}$
Panasonic NCR18650PF	0.48	0.017/3.6
LG Chem E66A	0.015	$0.55 e^{-3}$ /3.657
Panasonic NCR20700A	0.42	0.015/3.6

Del análisis anterior se deduce que, para las pruebas realizadas, se destaca la de impacto de carga, ya que se logra analizar el incremento de corriente tanto como el Modelo de Batería Litio-Ion y la referencia de Matlab/Simulink, de este último se observa un mayor aumento de corriente en comparación al modelo de batería propuesto, este aumento de corriente es debido a los requerimientos de carga, y esta demanda de corriente causa una baja considerable en el voltaje, debido a esto, al aumentar la corriente en el circuito, se amplifica el error en la sumatoria de la integral de la corriente medida de descarga, es decir, la batería de Matlab/Simulink contiene una constante de temperatura que acompaña a la variación del SoC, que afecta a la dinámica de voltaje, cuando la demanda de corriente sea mayor en la carga, sin embargo, este efecto térmico no está presente en las ecuaciones que gobiernan la dinámica de voltaje del Modelo de Batería Litio-Ion, por medio del modelo Thevenin-Shepherd, ya que este en su operación entrega las respuestas dinámicas de comportamiento eléctrico de una CLI y parámetros ambientales no inciden en el Modelo de Baterías Litio-Ion.

Tabla 4.7 Análisis de Comparación entre las CLI

Parámetro	Panasonic NCR18650PF Tipo Cilíndrica	Panasonic NCR20700A Tipo Cilíndrica	LG Chem E66A Tipo Prismática
Capacidad de corriente Q (Ah)	2.7	3.1	65
Voltaje de polarización K (V)	0.0072252	0.0062917	0.00030486
Resistencia interna R_{int} (Ω)	0.0133	0.0116	0.000562

El análisis de comparación entre las CLI se realiza con los parámetros mostrados en la Tabla 4.7, en donde, según los resultados anteriores, se asevera que el Modelo de baterías de litio puede obtener una respuesta del comportamiento dinámico de descarga, mitigando el error por efecto de temperatura del modelo de referencia de Matlab, esto se cumple cuando, la CLI contienen una resistencia interna y voltaje de polarización menores, en las pruebas las celdas que obtuvieron mejores respuestas de descarga fueron la LG Chem E66A y Panasonic NCR20700A que cumplen con los parámetros mencionados anteriormente, y otro parámetro que incide en una menor variación de voltaje entre modelos, es la capacidad de corriente que puede suministrar la CLI, que mientras mayor sea esta cantidad, los errores en las respuestas de descarga disminuyen respecto a la referencia del modelo de baterías de Matlab.

Capítulo 5. Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico Dos Niveles

5.1. Introducción

La acción del convertidor permite manejar de forma dinámica el flujo de energía, perfeccionando la eficiencia y calidad del sistema. Estos se conforman por distintos tipos en conversión de energía eléctrica, primordialmente por uno que convierte corriente alterna a corriente continua (AC/DC), llamado rectificador y el otro que convierte de DC/AC, denominado inversor.

La tecnología de Convertidores de Fuente de Voltaje (VSC), está siendo cada vez más importante en aplicaciones industriales modernas en especial a las del ámbito de energías limpias y electromovilidad. Estos convertidores se han utilizado cada vez más para aplicaciones como los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) y los sistemas de accionamiento AC industriales que requieren un funcionamiento frecuente de aceleración y desaceleración [17]. Desde el punto de vista de su topología, estos se dividen en dos tipos, convertidores Multinivel y Dos Niveles o AFE, que se ilustra en la Figura 5.1, de este se enfoca este proyecto de investigación en ingeniería.

5.2. Características del Convertidor Trifásico Dos Niveles

El VSC de dos niveles utilizando semiconductores IGBT, opera a una alta frecuencia de conmutación mayores a 1 kHz, que permite aplicaciones de potencia desde 1 kVA a fracciones mayores a 100 kVA. Los interruptores de control de potencia, están conformados por transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) y diodos conectados en antiparalelo.

Este convertidor posee características tales como la capacidad de poder controlar tanto el encendido como el apagado de los semiconductores, flujo de potencia bidireccional, control independiente de potencia activa y reactiva, lograr un factor de potencia unitario y obtener una baja distorsión armónica en las corrientes de entrada, si se compara con convertidores que operan a baja frecuencia de conmutación en un rango menor a 1 kHz.

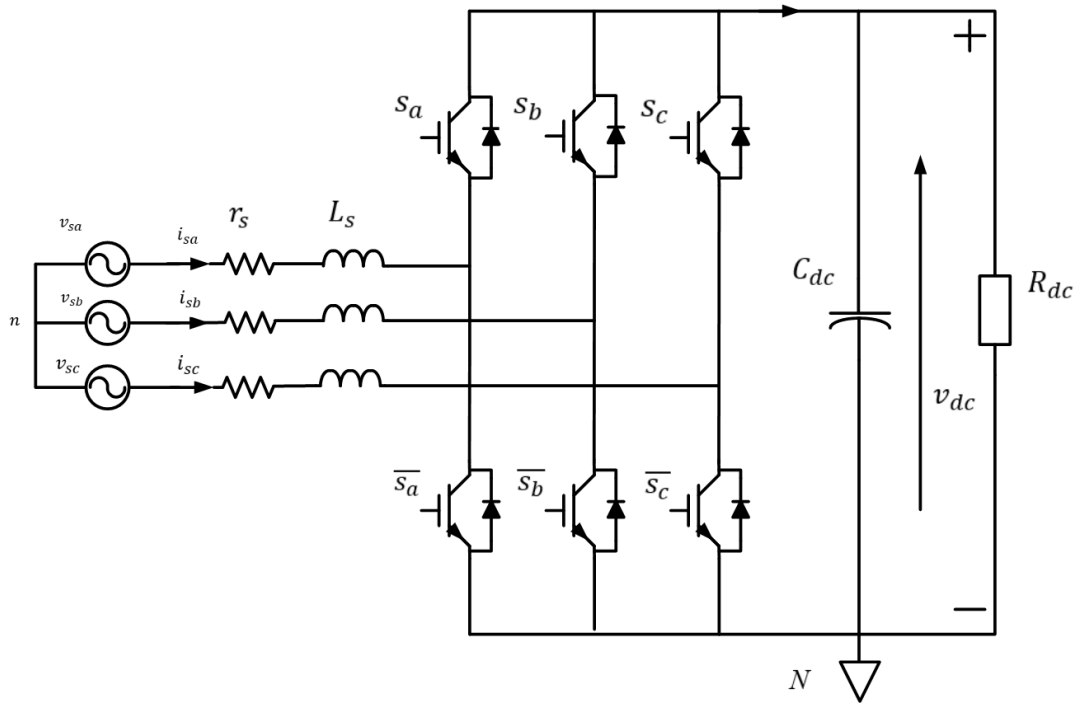


Figura 5.1 Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico Dos Niveles

Este convertidor fuente de voltaje, se compone por un puente trifásico que está conformado por tres ramas idénticas más un enlace DC, que se constituye por un capacitor y una carga resistiva. Cada una de estas ramas representa una fase de alimentación (a , b y c) y se constituye de dos IGBT con diodos en antiparalelo por fase, sumando una cantidad de seis de estos arreglos de semiconductores en el convertidor, los interruptores de potencia deben operar de manera complementaria para evitar el corto circuito en el lado DC. Cuando los interruptores de potencia operan, la carga es conectada al polo positivo o negativo, generan sólo dos posibles niveles de tensión a la salida de cada fase.

Utilizando una estrategia de modulación adecuada, los pulsos de disparo pueden sintetizar una tensión de componente fundamental deseada [28]. Cada par de semiconductores opera en los estados de saturación, comportándose como un interruptor que permite sostener flujos bidireccionales de potencia entre el lado de alterna y continua del convertidor. Además, en la entrada AC contiene un filtro inductivo L_s , constituido por inductancias equivalentes y resistencias r_s que representan las pérdidas en el filtro.

5.2.1 Interruptor de Potencia

El semiconductor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), es un dispositivo electrónico de alta impedancia de entrada y una gran capacidad de corriente portadora, que posee tres terminales, Colector, Compuerta y Emisor. Este transistor se caracteriza por su alta eficiencia y mayor frecuencia de conmutación en comparación al transistor BJT, pero menores a la de un transistor MOSFET.

Los IGBT poseen características de los MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) y los BJT (Bipolar Junction Transistor) para alcanzar alta corriente y baja capacidad de voltaje de saturación. Estos integran una puerta aislada usando FET (Field Effect Transistor) para obtener control en la entrada [29]. Su representación se muestra en la siguiente Figura 5.2.

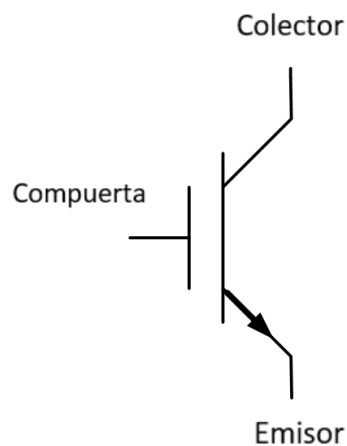


Figura 5.2 Representación Transistor IGBT

5.2.2 Modelo Matemático del Convertidor

Los semiconductores se asumen ideales, en este convertidor se considera los dos semiconductores de cada fase que operen de manera complementaria para evitar corto circuitos en el sistema, los voltajes de fase que ingresan al convertidor, dependen únicamente de los estados de conmutación de cada fase y la tensión en el enlace de corriente continua V_{dc} . Estos estados de conmutación se definen por $\{s_a, s_b, s_c\}$, donde el estado de conmutación toma el valor igual a uno si está encendido o conduciendo, por lo que el elemento semiconductor se modela como un corto circuito, y un valor igual a cero, si está apagado, el elemento semiconductor se modela como un circuito abierto.

En la Figura 5.3, se observa los dos estados de operación de una rama considerando sólo el caso de corriente en sentido positivo, es decir, la corriente fluyendo hacia el lado DC del convertidor, para corrientes en sentido negativo es similar para los dos posibles estados de cada rama.

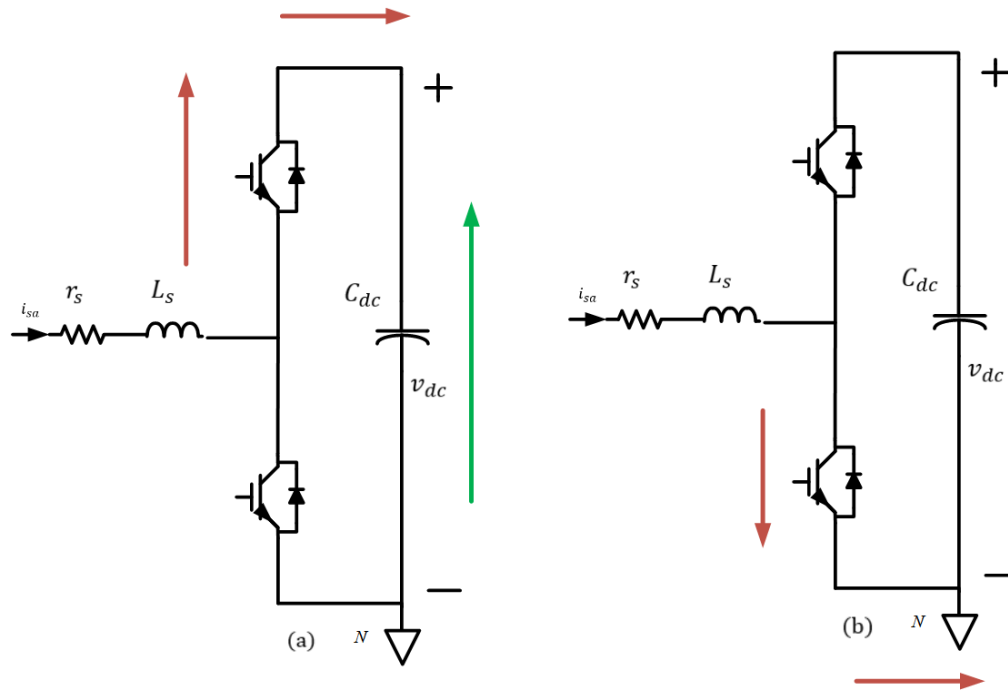


Figura 5.3 Circuito Equivalente por Fase del Convertidor (a) Transistor IGBT Superior Encendido, (b) Transistor IGBT Inferior Encendido

Cuando se tiene el siguiente estado de conmutación el IGBT superior está conduciendo y el inferior apagado, esto genera que el capacitor se cargue, pero en estricto rigor la carga y descarga del capacitor depende más bien del sentido de la corriente, ya que puede que se encuentren en el mismo estado de conmutación pero esta vez la dirección de la corriente es contraria, en consecuencia de aquello, el capacitor se descarga, y el semiconductor opera con sentido negativo de la corriente, para luego suministrar potencia al lado AC del convertidor. Es importante destacar que la corriente que fluye a través del diodo superior y no circula por el IGBT a pesar de que se encuentre encendido. La corriente fluye a través del semiconductor IGBT desde el colector a emisor. Bajo esta última condición, los diodos evitan la descarga del capacitor DC hacia el lado de alterna por estar polarizado inversamente [15].

El modelo matemático de la Figura 5.1, se debe efectuar un LVK en cada una de las fases, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$v_{sa} = L_s \frac{di_{sa}}{dt} + r_s i_{sa} + s_a v_{dc} + v_{Nm} \quad (5.1)$$

$$v_{sb} = L_s \frac{di_{sb}}{dt} + r_s i_{sb} + s_b v_{dc} + v_{Nm} \quad (5.2)$$

$$v_{sc} = L_s \frac{di_{sc}}{dt} + r_s i_{sc} + s_c v_{dc} + v_{Nm} \quad (5.3)$$

Donde los voltajes v_{sn} representan el valor máximo de las tensiones fase-neutro de la red trifásica que se conectan al convertidor. Sumando los tres voltajes de fase de las ecuaciones anteriores tenemos:

$$v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = r_s (i_{sa} + i_{sb} + i_{sc}) + L_s \frac{d}{dt} (i_{sa} + i_{sb} + i_{sc}) + v_{dc} (s_a + s_b + s_c) + 3v_{Nm} \quad (5.4)$$

Considerando una fuente de alimentación balanceada y simétrica para obtener amplitud idéntica y frecuencia, con un desfase de exactamente 120° . Ahora sumando tensiones y corrientes para obtener lo mencionado anteriormente tenemos:

$$v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \quad (5.5)$$

Además, asumiendo que no hay corrientes en el neutro.

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (5.6)$$

Se obtiene:

$$v_{Nm} = -\frac{1}{3}(s_a + s_b + s_c)v_{dc} \quad (5.7)$$

De la ecuación (5.7), v_{Nm} corresponde al voltaje de modo común entre el neutro flotante de la red y la barra negativa del rectificador. Luego reemplazando la ecuación (5.7) en las ecuaciones originales por LVK del convertidor se tiene que:

$$v_{sa} = L_s \frac{di_{sa}}{dt} + r_s i_{sa} + \frac{2s_a - s_b - s_c}{3} v_{dc} \quad (5.8)$$

$$v_{sb} = L_s \frac{di_{sb}}{dt} + r_s i_{sb} + \frac{-s_a + 2s_b - s_c}{3} v_{dc} \quad (5.9)$$

$$v_{sc} = L_s \frac{di_{sc}}{dt} + r_s i_{sc} + \frac{-s_a - s_b + 2s_c}{3} v_{dc} \quad (5.10)$$

Escrito de manera vectorial tenemos:

$$V_s^{abc} = L_s \frac{d}{dt} I_s^{abc} + r_s I_s^{abc} + M_s^{abc} v_{dc} \quad (5.11)$$

De la ecuación anterior los vectores son los siguientes:

$$V_s^{abc} = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T \quad (5.12)$$

De lo anterior V_s^{abc} corresponde al fasor espacial de los voltajes de red.

$$I_s^{abc} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T \quad (5.13)$$

El vector I_s^{abc} corresponde al fasor espacial de corrientes de línea, luego.

$$s^{abc} = [s_a \ s_b \ s_c]^T \quad (5.14)$$

El último parámetro corresponde al vector de los pulsos de disparo de los interruptores.

Además, la matriz de conmutación de los interruptores es la siguiente:

$$M = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

El modelo de este convertidor en la parte de rectificación DC se describe mediante un LCK:

$$i_{sa}s_a + i_{sb}s_b + i_{sc}s_c = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R_{dc}} \quad (5.16)$$

Se observa que las corrientes de línea que ingresan a los semiconductores son iguales a la corriente en el capacitor y de la carga.

5.2.3 Limitaciones del Convertidor

Para un funcionamiento adecuado para un AC/DC trifásico, el convertidor debe poseer rangos de operación, en su valor mínimo, este puede producir que el semiconductor IGBT no conmute y se produzca una distorsión, esto produce que el convertidor opere sólo con los diodos que están conectados en antiparalelo al interruptor de potencia. El voltaje mínimo de operación de un convertidor fuente de voltaje dos niveles es cuando se comporta como un puente rectificador trifásico a diodos. La ecuación (5.17) de [34], que relaciona tanto el lado AC como DC, asumiendo la operación como rectificador de seis pulsos no controlado es la siguiente:

Se tiene que la tensión periódica de salida se define como:

$$v_{dc}(\omega t) = V_{mL-L} \sin(\omega t) \quad (5.17)$$

Para un período de $\frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}$, con periodo de $\frac{\pi}{3}$, por lo tanto, tenemos:

$$v_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_{mL-L} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (5.18)$$

Al resolver la integral:

$$v_{dc} = \frac{3 V_{mL-L}}{\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \left[\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right] \right] \quad (5.19)$$

Luego, se obtiene el voltaje DC, que representa la tensión nominal del banco de baterías a replicar por el Sistema Emulador de Baterías en su enlace continuo:

$$v_{dc} > \frac{3 \sqrt{3} V_{mL-N}}{\pi} \quad (5.20)$$

En caso contrario, si el voltaje que se ingresa de referencia en el valor DC es mayor al voltaje mínimo, los semiconductores IGBT estarán en un modo de operación convencional de corte y saturación.

5.3. Representación Matemática del Modelo de Red Trifásico

Un circuito trifásico genera, distribuye, y utiliza energía en forma de tres voltajes iguales en magnitud y simétricos en fase. Una fuente de voltaje trifásico simétrico, puede ser representado por tres vectores con la misma magnitud, desfasadas en 120° entre sí. Como la describe la ecuación (5.21). Las tensiones quedan definidas como:

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\omega t) \\ V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Donde V_m es la magnitud máxima de voltaje del fasor, luego para el estudio de componentes simétricas se definirán dos fasores que representan el avance trifásico en las siguientes ecuaciones:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (5.22)$$

$$a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (5.23)$$

El operador a es un fasor de magnitud unitaria y un desfase de 120° que permitirá relacionar entre si los fasores de cualquier secuencia, tanto positiva, negativa y cero. Aplicando identidad de Euler en las ecuaciones (5.22) y (5.23), tenemos:

$$e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.24)$$

$$e^{-j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.25)$$

A estos dos fasores se le agrega un tercer vector de módulo unitario y sin desfase. Obtenido su representación en la Figura 5.4. el respectivo diagrama fasorial trifásico.

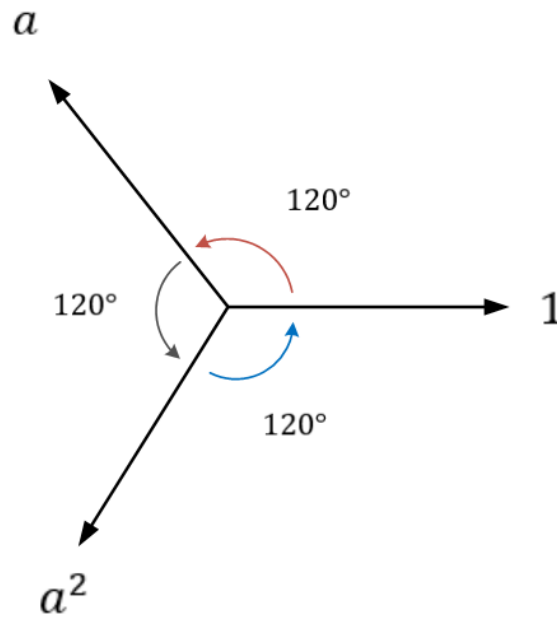


Figura 5.4 Distribución Tensión de Red Trifásica

5.3.1 Transformación $\alpha\beta$

En sistemas trifásicos, tanto el voltaje como la corriente pueden ser representados en el plano complejo, se componen por una parte real e imaginaria. Convencionalmente el eje real se denomina como alpha α y el eje imaginario se llama beta β . Esta transformación de componentes abc a un sistema de coordenadas $\alpha\beta$ se denomina como Transformada de Clarke que convierte de tres señales sinusoidales a dos de estas señales, pero desfasadas en 90° .

Se define V_s^{abc} como el vector voltaje de red, que se representa en la siguiente ecuación [12].

$$V_s^{abc} = \frac{2}{3} (v_{sa} + \alpha v_{sb} + \alpha^2 v_{sc}) = v_{s\alpha} + j v_{s\beta} \quad (5.26)$$

La ecuación anterior describe al vector trifásico de tensión igualado a un número complejo que representa los voltajes en coordenadas $\alpha\beta$.

Reemplazando (5.22) y (5.23) en (5.27) tenemos.

$$V_s^{abc} = \frac{2}{3} \left[v_{sa} + v_{sb} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] + v_{sc} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] \right] \quad (5.27)$$

Se agrupan reales e imaginarios de la ecuación anterior.

$$V_s^{abc} = \frac{2}{3} \left[v_{sa} + v_{sb} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + v_{sc} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \left[v_{sb} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) - v_{sc} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] \right] \quad (5.28)$$

De la ecuación anterior, se deduce que $\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}$ y $\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}$, entonces.

$$V_s^{abc} = \frac{2}{3} \left[v_{sa} - \frac{1}{2} v_{sb} - \frac{1}{2} v_{sc} + j \frac{\sqrt{3}}{2} v_{sb} - j \frac{\sqrt{3}}{2} v_{sc} \right] \quad (5.29)$$

De la ecuación anterior se separan la parte real e imaginaria correspondientes respectivamente a $v_{s\alpha}$ y $v_{s\beta}$.

$$v_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left[v_{sa} - \frac{1}{2} v_{sb} - \frac{1}{2} v_{sc} \right] \quad (5.30)$$

$$v_{s\beta} = \frac{2}{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} v_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{sc} \right] \quad (5.31)$$

La ecuación (5.30) y (5.31) se puede representar la Transformada de Clarke mediante matrices.

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

Al realizar la transformada de Clarke a un sistema trifásico se obtiene un sistema que depende de dos componentes, que representan en el plano complejo la parte real e imaginaria y que están desfasadas 90° entre ellas. El diagrama fasorial se puede observar en la siguiente Figura 5.5.

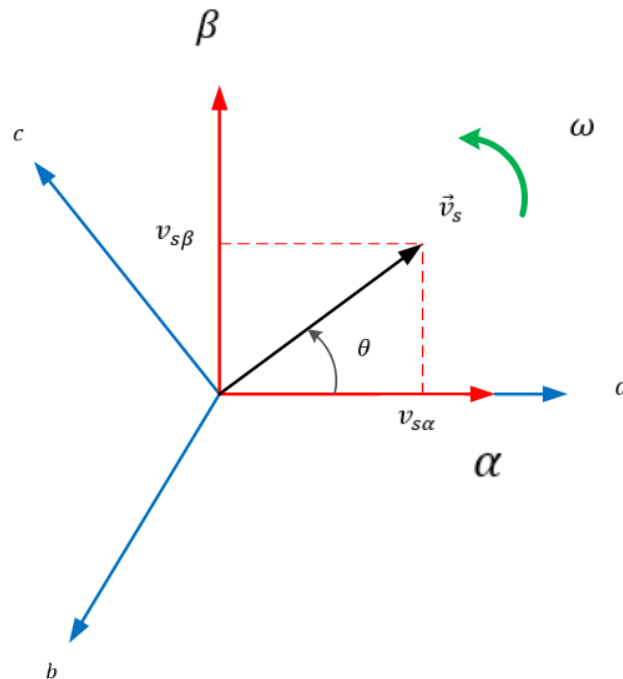


Figura 5.5 Marco de Referencia $\alpha\beta$

5.3.2 Transformación dq

Al obtener mediante transformada de Clarke un sistema representado en $\alpha\beta$, las variables del sistema trifásico se reducen a dos coordenadas. Sin embargo, estas componentes se encuentran rotando a la misma velocidad angular que las variables de la red trifásica. Estos modelos se utilizan generalmente en simulaciones o en sistemas de control resonante ya que el controlador PI no pueden lograr un seguimiento de la señal con error cero en estado estacionario en las componentes $\alpha\beta$ [16]. Es por esto que se utiliza la transformada de Park como la herramienta matemática que permite transformar las coordenadas $\alpha\beta$ a un sistema equivalente de dos componentes continuas dq , que se encuentran rotando a la misma velocidad angular que el vector voltaje de red V_s^{abc} .

Conceptualmente la transformada dq es la proyección de magnitudes de fase en un sistema de referencia de dos ejes giratorios, la transformación $\alpha\beta$ puede considerarse como la proyección de las magnitudes de fase en un sistema de referencia de dos ejes estacionarios. Se define un vector trifásico A_s en coordenadas estacionarias, de esto se obtiene que:

$$A_s^S = A_{s\alpha} + jA_{s\beta} = |A_s^S| \cos(\theta + \delta) + j|A_s^S| \sin(\theta + \delta) \quad (5.33)$$

El mismo vector trifásico A_s en coordenadas rotatorias

$$A_s^R = A_{sd} + jA_{sq} = |A_s^S| \cos(\delta) + j|A_s^S| \sin(\delta) \quad (5.34)$$

El ángulo θ está expresado como:

$$\theta = 2\pi f \cdot t \quad (5.35)$$

Donde θ es la velocidad angular a la que giran los ejes dq , lo que se consigue este nuevo eje al rotar a la misma velocidad que el vector A_s , las componentes A_{sd} y A_{sq} son señales continuas. Esta resolución matemática de [10].se denomina transformada de Park y se puede denotar de la siguiente manera.

$$A_s^R = |A_s^S| e^{j\delta} \quad (5.36)$$

Donde $e^{j\delta}$ corresponde al desfase que hay entre el vector trifásico A_s y las coordenadas dq . Para transformar de coordenadas rotatorias a estacionarias o viceversa, se logra mediante las siguientes ecuaciones.

$$A_s^R = |A_s^S| e^{-j\theta} \quad (5.37)$$

$$A_s^S = |A_s^R| e^{j\theta} \quad (5.38)$$

De las ecuaciones (5.34) y (5.37), tenemos que

$$A_s^R = A_{sd} + j A_{sq} = A_s^S [\cos(\theta) - j \sin(\theta)] \quad (5.39)$$

De la ecuación (5.33) se reemplaza en (5.40) obteniendo la siguiente expresión.

$$A_s^R = A_{sd} + j A_{sq} = A_{s\alpha} + j A_{s\beta} [\cos(\theta) - j \sin(\theta)] \quad (5.40)$$

Desarrollando la expresión anterior tenemos

$$A_{sd} + j A_{sq} = A_{s\alpha} \cos(\theta) - A_{s\alpha} j \sin(\theta) + A_{s\beta} j \cos(\theta) + A_{s\beta} \sin(\theta) \quad (5.41)$$

Agrupando parte real e imaginaria de las coordenadas dq

$$A_{sd} = A_{s\alpha} \cos(\theta) + A_{s\beta} \sin(\theta) \quad (5.42)$$

$$A_{sq} = -A_{s\alpha} \sin(\theta) + A_{s\beta} \cos(\theta) \quad (5.43)$$

De forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} A_{sd} \\ A_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{s\alpha} \\ A_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

Ahora se tiene una expresión en función del ángulo θ . Al aplicar transformada de Park se utiliza el ángulo θ de la referencia del vector A_s para orientar el eje rotatorio de coordenadas dq , en la dinámica al estar alineado el eje directo d con el vector voltaje de red trifásico A_s , se genera la componente continua A_{sd} , al girar a velocidad angular correcta y superponer la proyección del vector A_s , además, se asume que la componente de cuadratura q del vector de voltaje es cero, esto implica que el control de componentes dq puede controlar directamente la potencia activa (P) y reactiva (Q) de manera independiente, a través del lazo cerrado de corrientes i_{sd} e i_{sq} , así la potencia activa depende de la componente de eje d y la potencia reactiva mediante la componente de eje q , como se muestra en la ecuación (5.45) de [10], donde $A_{sq} = 0$ y el eje directo d se oriente en una dirección tal que esté en fase al vector AC trifásico $A_{sd} = A_s$. Su operación eficaz se consigue al cumplir con el alineamiento del vector espacial de voltaje de red y el ángulo de la transformada de Park, esto facilita el diseño de control del sistema al usar controladores lineales. El esquema de las coordenadas dq se muestran en la siguiente Figura 5.6.

$$P = \frac{3}{2} A_{sd} i_{sd} \quad Q = \frac{3}{2} A_{sd} i_{sq} \quad (5.45)$$

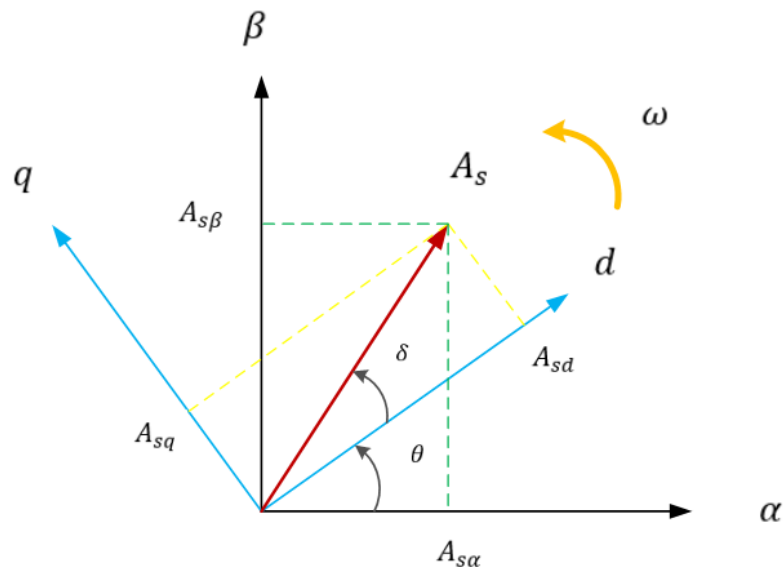


Figura 5.6 Coordenada dq

5.4. Modulación PWM

Actualmente uno de los métodos de modulación más empleados en tecnología VSC, corresponde al denominado Pulse Width Modulation (PWM), conocido en idioma español como modulación de ancho de pulso. Esta técnica de modulación, permite comparar una señal portadora que se establece como una señal triangular de mayor frecuencia f_{tri} , de valor medio cero y con una señal modulante sinusoidal, con una frecuencia f_{mod} , esta puede ser modificada en amplitud, fase y frecuencia para obtener un voltaje alterno con características deseadas, este tipo de modulación es llamada SPWM. En esta modulación mientras mayor sea la frecuencia de la señal triangular, mayor será la frecuencia de conmutación en los IGBT, esto produce pérdidas por conmutación, pero generando armónicos de alta frecuencia, siendo estas últimas fáciles de filtrar. Es por esto que debe haber una banda de operación que esté en balance entre pérdidas y contenido armónico presente en la onda de salida.

La modulación SPWM consiste en desarrollar señales de disparo mediante la comparación de dos señales, una de ellas de forma triangular y otra sinusoidal. Gracias a esto se puede controlar la señal de salida modificando la amplitud de la señal sinusoidal y, además, eliminar el contenido armónico mediante la designación de adecuadas frecuencias en la señal portadora. La frecuencia de la señal moduladora será igual a la frecuencia de la señal de salida del convertidor, mientras que la frecuencia de la señal portadora establecerá la frecuencia de conmutación de los interruptores de potencia [32]. Las señales de disparo entregadas a los semiconductores son generadas por pulsos de comparación binaria, para seleccionar los estados posibles de los interruptores de potencia. En la Figura 5.7 se observa la estructura de la modulación SPWM.

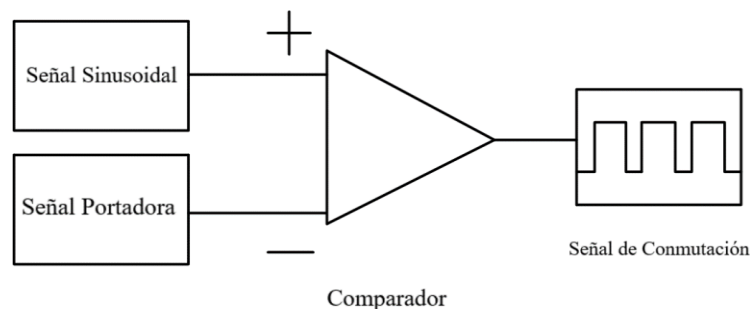


Figura 5.7 Diagrama de Bloques en la Generación de Señales para Modulación SPWM

En un convertidor trifásico de dos niveles, se utilizan tres señales modulantes v_{ma} , v_{mb} , v_{mc} , que se requieren en el lado AC, estas estarán desfasadas en 120° una respecto de otra, y v_{tri} la señal triangular. Las tres señales modulantes se compararán a la señal portadora común v_{tri} .

La componente fundamental del voltaje AC del convertidor trifásico de dos niveles, puede ser controlado mediante el índice de modulación que se define en la siguiente expresión:

$$m_a = \frac{V_{mod}}{V_{tri}} \quad (5.46)$$

Donde V_{mod} y V_{tri} corresponden a los valores máximos de las señales modulante y triangular, respectivamente. La amplitud del índice de modulación se modifica variando la amplitud de la señal modulante V_{mod} dejando la señal portadora constante en amplitud.

El índice de modulación en frecuencia se define como:

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{mod}} \quad (5.47)$$

Esta razón mediante una designación adecuada de la frecuencia en la señal portadora que además establece la frecuencia de conmutación de los interruptores de potencia. De lo anterior, esta habilitación profesional se define una frecuencia de la triangular de 2.5 kHz, que es la operación nominal de los semiconductores tradicionales que se encuentran en el laboratorio de electrónica de potencia de la universidad, esta frecuencia no estresa el sistema a pérdidas excesivas y este estudio no se centra en el impacto que tiene el sistema en la calidad de la red y en la implementación de filtros, sólo en la operación adecuada del Sistema Emulador.

De esta manera el voltaje de fase contiene la cantidad de pulsos por ciclo de la fundamental designado para la aplicación, cada uno de los pulsos son producidos al conmutar los semiconductores s_n en los estados de encendido y apagado. Cuando una señal portadora es sincronizada con la señal modulante si m_f es un número entero, el esquema de modulación se denomina PWM síncrona, si ocurre el caso contrario, el esquema de modulación se denomina PWM asíncrona. En general, esta técnica de modulación garantiza ventajas al ser una estrategia clásica que cumple con buenos resultados.

5.5. Phase Locked Loop (PLL)

En el control de convertidores de potencia, la sincronización con la red es esencial para su operación. La técnica más utilizada para la extracción del ángulo de la componente fundamental de tensión, es la basada en PLL. En general, la medición debe realizarse en tiempo real para establecer un funcionamiento adecuado, donde la PLL es la estrategia que permite que una señal siga a otra, para proporcionar una señal de salida con misma frecuencia y fase en comparación con la señal de entrada, al orientarse correctamente con el ángulo de tensión de la red, faculta la sincronización con el convertidor [33]. Un PLL debe ser capaz de mantener el desfase entre el voltaje del conversor y la red en valores aceptables, de tal manera, que ante repentinos cambios de carga, que ocasionen desfase, rápidamente el inversor alterne su frecuencia y no pierda la sincronización [44].

El esquema de una PLL trifásica es ampliamente utilizado, se presenta en la Figura 5.8. En donde se puede observar que se miden las tres tensiones en coordenadas abc , que son transformadas a un sistema de coordenadas $\alpha\beta$, que luego son cambiadas a un marco de referencia dq . Se espera en este modelo, que el ángulo θ logre que la componente A_{sq} sea cero, esto se consigue comparado con una señal de referencia A_{sq}^* igual a cero, cuyo resultado ingresa a un controlador PI (Proporcional-Integral), que mediante un sistema de control en lazo cerrado su diseño, genere una actuación que proporcione lograr la referencia, de lo anterior se le suma la velocidad angular ω de la red, que mediante lo anterior se determina el ángulo θ para realimentar el bloque de control PLL. Si el bloque opera de manera eficaz y se sintoniza a los parámetros de diseño del controlador PI, que, en estado estacionario, A_{sq} sea cero, logrando que la componente A_{sd} en amplitud represente en su totalidad a la componente fundamental de la tensión de red en secuencia positiva, en consiguiente, la diferencia angular después de la actuación, es cero, consiguiendo, en cada instante, que el bloque de control se sincronice de manera eficaz a la secuencia positiva fundamental [33].

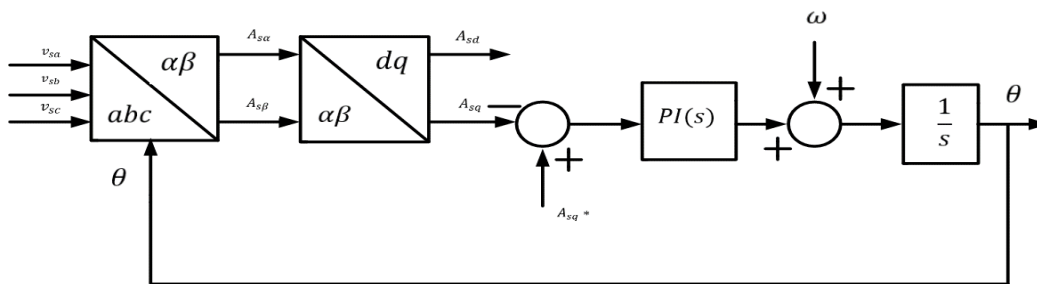


Figura 5.8 Esquema de Seguimiento de Fase Bloque PLL

5.6. Análisis Planta del Sistema

La planta del sistema tiene el objetivo de realizar una operación determinada mediante el análisis de su función de transferencia. Para alcanzar la planta del convertidor se debe efectuar un exhaustivo análisis que se inicia a continuación.

De las ecuaciones que rigen el comportamiento en el lado AC del sistema VSC dos niveles, en la ecuación (5.11), tenemos que la variable s que representa el vector de los pulsos de disparo hacia los interruptores de potencia, estos se constituyen como:

$$V_s^{abc} = L_s \frac{d}{dt} I_s^{abc} + r_s I_s^{abc} + M[G_{dc} + G_{ac}m_s^{abc} + G_H]v_{dc} \quad (5.48)$$

De la ecuación anterior s^{abc} se constituye respectivamente de una ganancia DC, ganancia AC por sus respectivos índices de modulación, y una ganancia que se compone de las componentes armónicas. Esto determina la compensación de ganancias que se incluyen en la modulación, para crear los pulsos de disparos hacia los semiconductores. De manera matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + r_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{dc} + G_{ac}m_a + G_H \\ G_{dc} + G_{ac}m_b + G_H \\ G_{dc} + G_{ac}m_c + G_H \end{bmatrix} v_{dc} \quad (5.49)$$

Analizando por fase tenemos que v_{sa} :

$$v_{sa} = L_s \frac{d}{dt} i_{sa} + r_s i_{sa} + \frac{1}{3} [2G_{dc} + 2G_{ac}m_a + 2G_H - G_{dc} - G_{ac}m_b - G_H - G_{dc} - G_{ac}m_b - G_H] v_{dc} \quad (5.50)$$

Se eliminan las ganancias armónicas y DC por simetría, luego:

$$v_{sa} = L_s \frac{d}{dt} i_{sa} + r_s i_{sa} + \frac{G_{ac}}{3} [2m_a - m_b - m_c] \quad (5.51)$$

En un sistema trifásico se tiene que los índices de modulación en cada fase son:

$$m_a + m_b + m_c = 0 \quad (5.52)$$

Por lo tanto, despejando la modulación de amplitud de la fase a:

$$m_a = -m_b - m_c \quad (5.53)$$

Reemplazando (5.53) en (5.51) tenemos la siguiente expresión:

$$v_{sa} = L_s \frac{d}{dt} i_{sa} + r_s i_{sa} + G_{ac} m_a v_{dc} \quad (5.54)$$

Ahora, se analiza el voltaje en la fase b:

$$v_{sb} = L_s \frac{d}{dt} i_{sb} + r_s i_{sb} + \frac{1}{3} [-G_{dc} - G_{ac} m_a - G_H + 2G_{dc} + 2G_{ac} m_b + 2G_H - G_{dc} - G_{ac} m_b - G_H] v_{dc} \quad (5.55)$$

Se eliminan ganancias de componente DC y armónicas de alta frecuencia por simetría, luego:

$$v_{sb} = L_s \frac{d}{dt} i_{sb} + r_s i_{sb} + \frac{G_{ac}}{3} [2m_b - m_a - m_c] \quad (5.56)$$

Por lo tanto, despejando la modulación de amplitud de la fase b:

$$m_b = -m_a - m_c \quad (5.57)$$

Reemplazando (5.57) en (5.56) tenemos la siguiente expresión

$$v_{sb} = L_s \frac{d}{dt} i_{sb} + r_s i_{sb} + G_{ac} m_b v_{dc} \quad (5.58)$$

Por último, se analiza la fase c:

$$v_{sc} = L_s \frac{d}{dt} i_{sc} + r_s i_{sc} + \frac{1}{3} [-G_{dc} - G_{ac} m_a - G_H - G_{dc} - G_{ac} m_b - G_H + 2G_{dc} + 2G_{ac} m_b + 2G_H] v_{dc} \quad (5.59)$$

Al igual que en las demás se eliminan ganancias de componente DC y armónicas de alta frecuencia por simetría, luego tenemos:

$$v_{sc} = L_s \frac{d}{dt} i_{sc} + r_s i_{sc} + \frac{G_{ac}}{3} [2m_c - m_a - m_b] \quad (5.60)$$

Por lo tanto, despejando la modulación de amplitud de la fase c:

$$m_c = -m_a - m_b \quad (5.61)$$

Reemplazando (5.61) en (5.60) tenemos la siguiente expresión

$$v_{sc} = L_s \frac{d}{dt} i_{sc} + r_s i_{sc} + G_{ac} m_c v_{dc} \quad (5.62)$$

De las ecuaciones anteriores de las fases, se expresan de manera de vector.

$$V_s^{abc} = L_s \frac{d}{dt} I_s^{abc} + r_s I_s^{abc} + G_{ac} m_s^{abc} v_{dc} \quad (5.63)$$

Donde el voltaje del convertidor es $v_c^{abc} = G_{ac} m_s^{abc} v_{dc}$, luego se aplica identidad de Euler para transformación a coordenadas rotatorias dq logrando la siguiente ecuación.

$$V_s^{dq} e^{j\omega t} = L_s \frac{d}{dt} I_s^{dq} e^{j\omega t} + r_s I_s^{dq} e^{j\omega t} + G_{ac} m_s^{dq} v_{dc} e^{j\omega t} \quad (5.64)$$

Resolviendo la ecuación tendremos:

$$V_s^{dq} e^{j\omega t} = j\omega L_s I_s^{dq} e^{j\omega t} + L_s \frac{d}{dt} I_s^{dq} e^{j\omega t} + r_s I_s^{dq} e^{j\omega t} + G_{ac} m_s^{dq} v_{dc} e^{j\omega t} \quad (5.65)$$

Se divide por $e^{j\omega t}$.

$$V_s^{dq} = j\omega L_s I_s^{dq} + L_s \frac{d}{dt} I_s^{dq} + r_s I_s^{dq} + G_{ac} m_s^{dq} v_{dc} \quad (5.66)$$

De los números complejos V_s^{dq} e I_s^{dq} se tiene que:

$$V_s^{dq} = v_{sd} + j v_{sq} \quad (5.67)$$

$$I_s^{dq} = i_{sd} + j i_{sq}$$

Luego, de la ecuación (5.66), se agrupan parte real e imaginaria.

$$v_{sd} = -\omega L_s i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + r_s i_{sd} + G_{ac} m_{sd} v_{dc} \quad (5.68)$$

$$0 = \omega L_s i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + r_s i_{sq} + G_{ac} m_{sq} v_{dc}$$

De este sistema de ecuaciones, asumiendo a v_{sd} como perturbación dentro de este sistema de control y un acople en frecuencia, despreciable entre ambas expresiones. Logrando un control de corrientes en coordenadas rotatorias mediante la función de transferencia de la planta desarrollada por las ecuaciones anteriores. Para obtener la función de transferencia de la planta del sistema se aplica transformada de Laplace:

$$-s L_s i_{sd} - r_s i_{sd} = G_{ac} m_{sd} v_{dc} \quad (5.69)$$

$$-s L_s i_{sq} - r_s i_{sq} = G_{ac} m_{sq} v_{dc}$$

De lo anterior, la función de transferencia de la planta del sistema es el siguiente:

$$h_i(s) = \frac{i_{sd}}{m_{sd}} = \frac{i_{sq}}{m_{sq}} = \frac{-G_{ac}v_{dc}}{sL_s + r_s} \quad (5.70)$$

5.7. Análisis de Resultados y Discusión

En este capítulo se analizó el estudio del convertidor trifásico fuente de voltaje de dos niveles que proporcionará el ambiente controlado para el Sistema Emulador de Baterías, el modelo matemático se desprende de [11], de las ecuaciones se obtiene el comportamiento dinámico del sistema de electrónica de potencia mediante las leyes de Kirchhoff, y desde la representación matemática del modelo trifásico y aplicar transformadas de Clarke y Park de [10] [12], para conseguir mediante coordenadas de ejes rotatorios dq una operación eficaz con el control lineal PI facultando la sincronización con el convertidor mediante la planta del sistema que corresponde a la función de transferencia que sirve para el control en lazo cerrado de corriente en eje directo.

Para obtener en el enlace DC del convertidor el voltaje nominal del banco de baterías, el Sistema Emulador de Baterías debe operar con un voltaje alterno línea-neutro que sea capaz de conseguir que el semiconductor IGBT conduzca y no produzca distorsión de [34] se desarrollan las ecuaciones generando una expresión en donde el voltaje DC nominal a replicar de un banco de baterías debe ser mayor al V_{mL-N} , este voltaje línea-neutro se debe considerar entre un 47-50 % del voltaje nominal DC a conseguir, en ambiente de laboratorio se debe ejecutar con un autotransformador trifásico para el lado alterno del Sistema Emulador de Baterías.

Se aborda el tema de modulación PWM que también está presente en la planta por las modulaciones de amplitud y del lazo de seguimiento de fase (PLL), que en las pruebas del capítulo 8 de simulación de bancos de baterías por el Sistema Emulador se utiliza el bloque PLL que se encuentra en Matlab/Simulink, en el presente capítulo se analiza los principios básicos de este sistema, necesario para conseguir el ángulo de la red de alimentación y así lograr la orientación angular correcta para el uso de componentes continuas y conseguir la sintonía con el lazo cerrado de control en el sistema.

Capítulo 6. Control del Convertidor

6.1. Control Proporcional-Integral

El control Proporcional-Integral (PI), es uno de los más utilizados en estrategias de control análogo y discreto. Se compone de dos acciones, la proporcional, implementa la operación típica al introducir una ganancia proporcional a la lectura presente del error que se produce al comparar la salida y entrada del lazo cerrado del sistema, mientras que la acción integral está relacionada con los valores pasados del error de control y permite la reducción a cero en el error en estado estacionario cuando se aplica una señal de referencia en la entrada del lazo de control.

La expresión del controlador PI, es el siguiente:

$$h_c(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = k_p \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) = k_p \left(\frac{s + 1/T_i}{s} \right) \quad (6.1)$$

Obteniendo la función de transferencia del controlador PI.

$$C_{PI}(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = k_p \left(\frac{s + 1/T_i}{s} \right) \quad (6.2)$$

En este controlador, la acción proporcional funciona al multiplicar esta ganancia al error presente entre la comparación de la referencia y la señal medida, pero esta acción al alcanzar su consigna, sigue estando presente un error en estado estacionario constante distinto de cero, para eliminar este error y lograr un correcto control, se debe obtener información pasada de la acción de control, esto se logra mediante el integrador, este suma la señal de entrada durante el transcurso del tiempo, luego en la salida del integrador la señal sigue cambiando y el valor aumenta. Estas acciones del controlador operando entre sí, pueden funcionar para reducir el error a cero en el sistema.

La salida del controlador $u(s)$ ingresa al actuador, que es un dispositivo físico de comportamiento no lineal, que producto de una acción de fuerza o energía, logra cambiar el sistema, sin embargo, el controlador debe tener restricciones para una operación eficaz, el controlador debe estar limitado ante una saturación en el actuador, sin este limitador, la salida del controlador sigue aumentando y el sistema no tiene una operación adecuada, ya que no puede seguir el comando del controlador por las restricciones físicas del actuador, en consecuencia, se agrega un saturador a la salida del controlador y para la acción integral.

En el saturador se verifican las señales de entrada y salida, para comparar la información de ambas, si son iguales es porque no se produjo saturación, pero al contrario si son distintas, resulta en una saturación en las señales proporcionadas por las acciones de control. También existe otra verificación, que busca comparar el signo del controlador entre la entrada del error y la salida, si ambas señales son iguales, la salida sigue aumentando dependiendo del signo que esté sumando la acción integral, no obstante, al existir una saturación en la comparación de entrada y salida, el controlador proporciona una operación condicional de activar o desactivar la ruta de la acción integral, para este caso se cierra el acceso a esta operación, una vez que el controlador no esté saturado, se restaura la acción integral. En la Figura 6.1 se observa el diagrama de bloque del controlador PI.

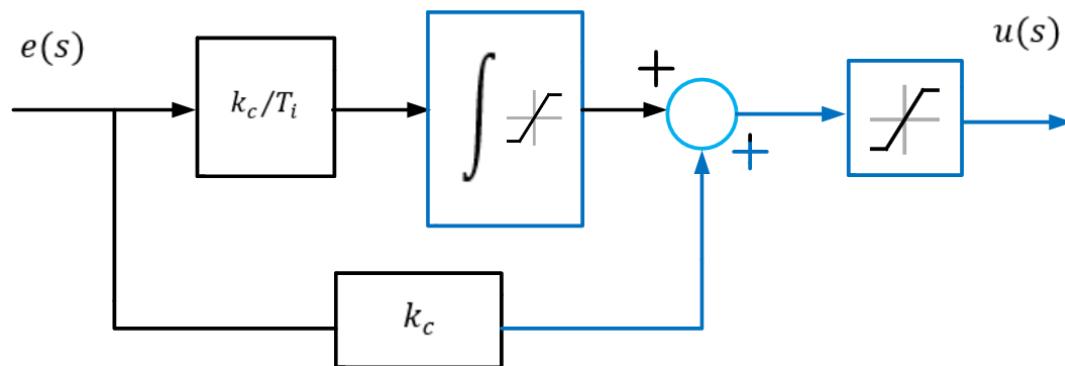


Figura 6.1 Diagrama de Bloque Controlador PI

6.2. Control Conexión en Cascada Voltaje-Corriente

Para este convertidor es necesario diseñar un control lineal proporcional-integral en conexión cascada. Para la regulación de tensión del enlace DC, se construye un lazo interno de corriente y un lazo externo de voltaje para controlar el convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles. La función de transferencia del controlador DC se obtiene a partir del modelo simplificado presentado en la ecuación (6.3). El control de corriente se realiza mediante la función de transferencia en la ecuación (5.70). El objetivo del sistema de control del lazo externo es mantener el funcionamiento de la tensión de salida en presencia de la variación de la corriente de carga [12], la precisión de la respuesta de salida en estado estacionario es fundamental, por lo que se elige un controlador PI. La tensión DC del convertidor se controla utilizando la componente de corriente del eje d que ingresa al capacitor C , el controlador procesa el error entre el voltaje DC de referencia y el voltaje DC medido y produce la referencia de corriente del eje directo d .

$$h_v(s) = \frac{v_{dc}(s)}{i_{sd}(s)} = \frac{1}{sC} \quad (6.3)$$

El esquema de control de tensión continua en la Figura 6.2, forma el lazo externo de control. Como tal, el ancho de banda de control del bloque externo ω_v se elige por muy debajo del ancho de banda de control de la corriente ω_i , de manera que $\omega_v \ll \omega_i$, como el lazo externo tiene una respuesta mucho más lenta que el control interno de corriente, la dinámica de la corriente en lazo cerrado se aproxima por un sistema simplificado de ganancia unitaria y, por tanto, es despreciado para las consideraciones de diseño del controlador de corriente continua [13].

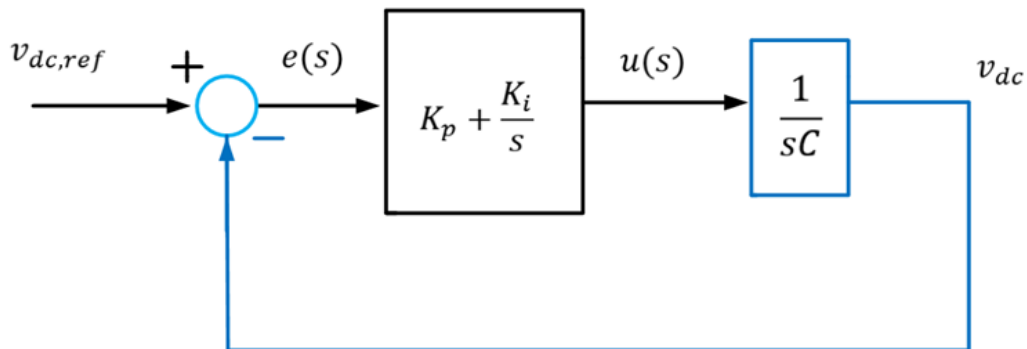


Figura 6.2 Diagrama de Bloques de Control Simplificado Enlace DC

Para la sintonización de la planta en la ecuación (6.3) con el diseño del controlador PI es necesario conocer los voltajes generados por el VSC dos niveles en el lado AC del sistema en coordenadas rotatorias dq representado en las siguientes ecuaciones [10].

$$v_{cd}(t) = \frac{v_{dc}}{2} m_d(t) \quad (6.4)$$

$$v_{cq}(t) = \frac{v_{dc}}{2} m_q(t) \quad (6.5)$$

Las tensiones de salida de alta potencia v_{cd} y v_{cq} son por tanto directamente proporcionales a las señales de control de baja potencia m_d y m_q , y el VSC responde como un amplificador lineal [14], multiplicado por $\frac{1}{2}$ que corresponde a la ganancia alterna G_{ac} que también está presente en la F. de T. de la planta para el lazo interno en la expresión (5.70). Es por esto que sólo interesa la ganancia de la componente a frecuencia fundamental de las formas de onda de voltaje conmutado en los terminales del convertidor para el modelado y control del VSC.

Para un control de voltaje del convertidor eficaz considerando un sistema simétrico y balanceado. Entonces, mediante el principio de equilibrio de potencias en coordenadas dq se exige.

$$P_{ac} = P_{dc} + P_{carga} \quad (6.6)$$

$$\frac{3}{2}(v_{cd}i_{sd} + v_{cq}i_{sq}) = v_{dc}i_c + v_{dc}i_{carga} \quad (6.7)$$

Considerando $i_{sq} = 0$ y la potencia de carga como perturbación del sistema de control en lazo cerrado.

$$\frac{3}{2}v_{cd}i_{sd} = Cv_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (6.8)$$

Aplicando transformada de Laplace se obtiene la F. de T. de la planta del lazo externo.

$$h_v(s) = \frac{v_{dc}(s)}{i_{sd}(s)} = \frac{3}{2} \frac{v_{cd}}{sC} \quad (6.9)$$

Un control eficiente de voltaje DC es muy importante para aplicaciones como es el caso de variadores de velocidad, fuentes de energía renovables, sistemas UPS y sistemas back to back [18].

Obteniendo un diseño del controlador DC mediante el cálculo de los parámetros anteriores, se realiza el control en cascada para aislar problemas del sistema, con el sentido, que el lazo interno sea lo suficientemente rápido para que los problemas puedan corregirse antes de que afecten al lazo externo. El control de voltaje es el encargado de mantener la tensión en el enlace DC, este inicia con la diferencia entre el voltaje medido y de referencia que corresponde al Modelo de Batería Litio-Ion, observado en la Figura 6.3, esto genera una señal de error que entra al control PI, luego de operar, en su salida esta señal va aumentando producto de la acción integral, generando así la corriente i_d de referencia que es la corriente necesaria para alimentar el voltaje a la salida según determine el control externo, esta es la entrada del controlador de corriente que se compara con la corriente medida, de este segundo controlador PI, se obtiene a la salida las señales en coordenadas dq , que luego se transforman a coordenadas naturales abc generando las señales modulantes que ingresan a la etapa de modulación.

6.3. Análisis de Control del Convertidor

El análisis de control y modulación del sistema que es representado por la Figura 6.3. En este esquema se observa la sintonización del controlador PI y la comparación del error entre las señales alternas de corrientes trifásicas en coordenadas abc que se transforman a coordenadas rotatorias dq , donde las corrientes medidas i_{sd} e i_{sq} son comparadas con señales de referencia i_{sd}^* e i_{sq}^* . La señal de referencia i_{sd}^* será la salida de un controlador PI_{dc} de tensión, que debe ser capaz de mantener el voltaje en el capacitor en el enlace DC, cuya entrada de esta función de transferencia, es la comparación del voltaje DC medido y la referencia que para el Sistema Emulador es la dinámica de descarga del Modelo de Batería Litio-Ion. En este lazo de control del convertidor ingresan las señales de corrientes en coordenadas dq de referencia y se comparan con sus respectivas señales medidas, para así ser capaz de controlar la potencia activa y reactiva, de esta última es comparada con una corriente del eje de cuadratura q de referencia i_{sq}^* igual a cero, para asegurar que no entregue flujo de potencia reactivo hacia el lado AC del sistema, es decir cero VAR.

En los controles PI de corrientes de coordenadas rotatorias dq , en su entrada se analiza el error en estado estacionario sea cero entre las señales de medida y referencia para el control eficaz del sistema. Luego a la salida de los controladores PI, se producen los índices de modulación en coordenadas dq , que serán transformadas a coordenadas abc y generar los índices de modulación que ingresan a la etapa de modulación SPWM, para finalmente, activar el proceso de los estados de conmutación hacia los semiconductores. Para diseñar el controlador PI, es necesario sintonizarlo a la planta del sistema, donde la corriente que se va a generar va a depender del índice de modulación de amplitud, que representa el voltaje que debe generar el convertidor AFE.

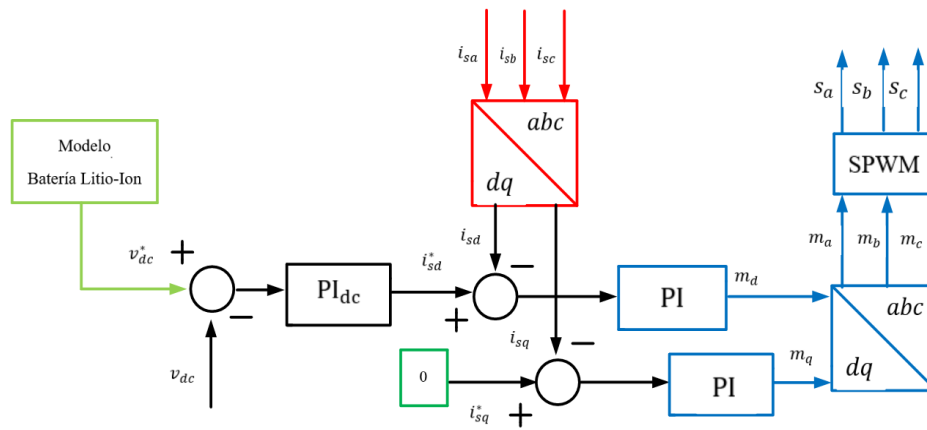


Figura 6.3 Control en Cascada, Cambio de Coordenadas y Modulación del Sistema Emulador de Baterías

6.4. Diseño de Controladores

En esta sección se muestran los diseños de los controladores de conexión en cascada para los tres tipos de bancos de baterías de litio, tales como Powerwall 2 AC Tesla de 100 V, EV Tesla S 400 V y EV Porsche Taycan 800 V, que el Sistema Emulador de Baterías es capaz de replicar sus respuestas de descarga, cuyos resultados de la correcta operación se demuestra en el capítulo 7.

6.4.1 Control Interno de Corriente Batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V

De la expresión (5.70) describe la función de transferencia de la planta para diseñar el lazo cerrado de corriente de las baterías a simular, la F. de T. de lazo cerrado para esta batería se observa en la Figura 6.4 y la expresión (6.9) que describe la función de transferencia de la planta DC para diseñar el lazo cerrado de voltaje de las baterías a simular, la F. de T. de lazo cerrado para esta batería se ilustra en la Figura 6.5.

También se utilizan las expresiones anteriormente mencionadas para el diseño de controladores para las siguientes baterías. Para diseñar los controladores de ambos lazos de control se usa el método del Lugar Geométrico de las Raíces (LGR), usando el comando *control system designer* de Matlab.

La Figura 6.4, contiene el LGR de la planta de lazo de corriente y el diseño del control PI. El lazo opera a 313 Hz de frecuencia natural y un factor de amortiguamiento $\xi = \sqrt{2}/2$.

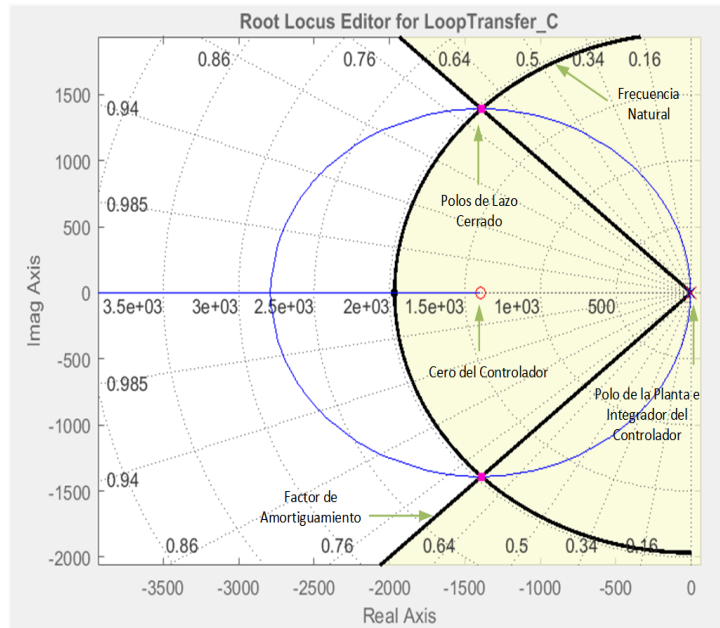


Figura 6.4 LGR Lazo Cerrado de Corriente para Batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V

De este modo, el controlador diseñado para el lazo de corriente para una batería de 100 V es:

$$C_{i-I}(s) = -0.55652 \frac{(s + 1400)}{s} \quad (6.10)$$

6.4.2 Control Externo de Voltaje Batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V

El lazo cerrado externo de voltaje opera a 2.26 Hz de frecuencia natural, una respuesta lenta efecto de la ubicación de los polos en lazo cerrado y el cero del controlador, este diseño se debe a las oscilaciones por la carga y la variación en el tiempo del voltaje continuo inherente en las dinámicas de las baterías de litio, se implementa con un factor de amortiguamiento de $\sqrt{2}/2$. El LGR para la F. de T. de lazo cerrado externo de voltaje lo contiene la Figura 6.5.

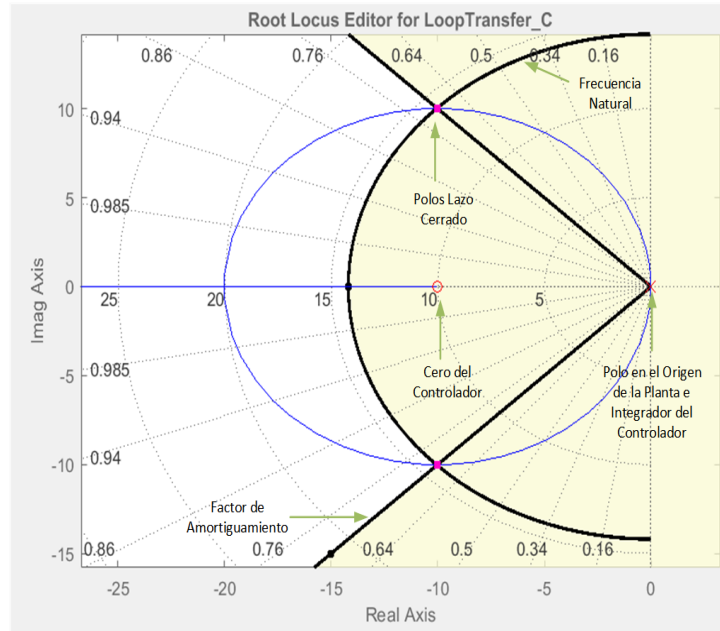


Figura 6.5 LGR Lazo Cerrado de Voltaje para Batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V

El controlador diseñado para este lazo de voltaje es:

$$C_{v-I}(s) = \frac{(s + 10)}{s} \quad (6.11)$$

6.4.3 Control Interno de Corriente Batería Tesla Model S 400 V

El LGR para la F. de T. de lazo cerrado interno de corriente para el banco de baterías con un voltaje nominal de 400 V lo contiene la Figura 6.6. El lazo opera a 392 Hz de frecuencia natural y con un factor de amortiguamiento de $\sqrt{2}/2$.

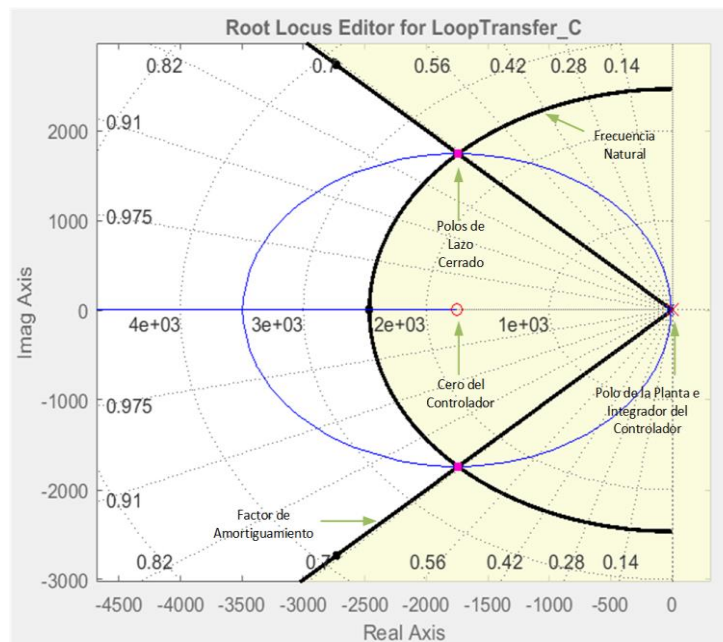


Figura 6.6 LGR Lazo Cerrado de Corriente para Batería Tesla Model S 400 V

El control diseñado para el lazo cerrado de corriente es el siguiente:

$$C_{i-II}(s) = -0.51434 \frac{(s + 1752)}{s} \quad (6.12)$$

6.4.4 Control Externo de Voltaje Batería Tesla Model S 400 V

El LGR para la F. de T. de lazo cerrado externo de voltaje se muestra en la Figura 6.7, para para el banco de baterías del Tesla modelo S de 400 V opera a 1.84 Hz de frecuencia natural, este diseño se debe a la dinámica intrínseca de las baterías de litio donde la magnitud de voltaje varía según el consumo eléctrico e impactos de carga, además se implementa con un factor de amortiguamiento de $\sqrt{2}/2$, se opta por este criterio de diseño para que la acción del lazo cerrado sea robusta ante condiciones de operación variantes en el tiempo.

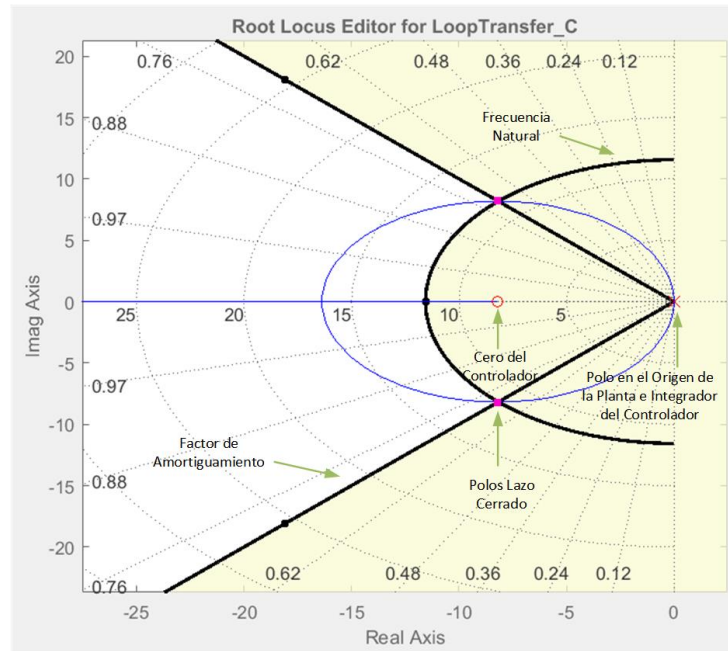


Figura 6.7 LGR Lazo Cerrado de Voltaje para Batería Tesla Model S 400 V

El controlador diseñado para este lazo de voltaje es:

$$C_{v-II}(s) = 0.97 \frac{(s + 8.1647)}{s} \quad (6.13)$$

6.4.5 Control Interno de Corriente Batería Porsche Taycan 800 V

La Figura 6.8, contiene el LGR de la F. de T. del lazo cerrado interno de corriente. Este lazo opera a 452 Hz de frecuencia natural y un factor de amortiguamiento $\xi = \sqrt{2}/2$.

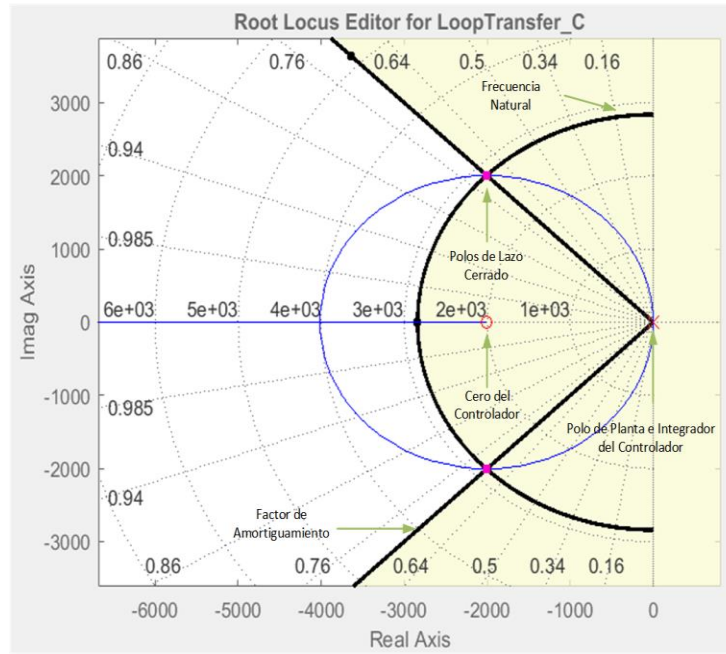


Figura 6.8 LGR Lazo Cerrado de Corriente para Batería Porsche Taycan 800 V

El control diseñado para este lazo de corriente de 800 V

$$C_{i-III}(s) = -0.39863 \frac{(s + 2011)}{s} \quad (6.14)$$

6.4.6 Control Externo de Voltaje Batería Porsche Taycan 800 V

El lazo cerrado externo de voltaje opera a 6.77 Hz de frecuencia natural, una respuesta lenta efecto de la ubicación del cero perteneciente al controlador y los polos en lazo cerrado, este diseño se debe a las oscilaciones por la carga y del voltaje continuo variante en el tiempo inherente en las dinámicas de la batería de litio, se implementa con un factor de amortiguamiento de $\sqrt{2}/2$. El LGR para la F. de T. del lazo cerrado externo de voltaje lo contiene la Figura 6.9.

Capítulo 7. Simulaciones y Resultados del Sistema

7.1. Introducción

En los capítulos anteriores, se indican los procedimientos que sustentan y desarrollan el Sistema Emulador de Descarga para Baterías de Litio. Se simulan los mismos escenarios de descarga tanto para el modelo de baterías de Matlab/Simulink como el Modelo de Batería Litio-Ion, que es la referencia del control de voltaje en el convertidor del Sistema Emulador. Este capítulo presenta, los bancos de baterías que pueden producirse mediante las CLI presentadas anteriormente, estos bancos son un arreglo de celdas individuales, conectados eléctricamente, que generan una batería equivalente con voltaje y capacidad de corriente nominales, generando un sistema almacenamiento de energía en forma de carga eléctrica continua, necesarias para operar en aplicaciones de modernos sistemas eléctricos. El Sistema Emulador para baterías de litio logra replicar la descarga de un banco de batería real, simulando los siguientes BESS utilizados en almacenamiento domiciliario y electromovilidad. Los bancos de baterías de litio a simular son, la Batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V, Batería Tesla Model S 400 V, Batería Porsche Taycan 800 V. Las pruebas a carga nominal son ejecutadas a un tiempo de simulación de 5 segundos y las de impacto de carga a un tiempo de simulación de 2 segundos.

7.2. Batería de Litio Powerwall 2 AC Tesla 100 V

El Sistema Emulador debe replicar la operación en descarga de un banco de litio de 100 V, mediante CLI Panasonic NCR20700A. Los parámetros de ambos sistemas se muestran a continuación:

Tabla 7.1. Parámetros del Sistema para Banco de 100 V

Parámetro	Valor
Voltaje de Fase (V_s)	47 [$V_{m,L-N}$]
Frecuencia de Red (f_s)	50 [Hz]
r_s	0.1 [Ω]
L_s	10 [mH]
R_{dc}	30 [Ω]
C_{dc}	3000 [μ F]
Frecuencia Portadora f_{tri}	2500 [Hz]
Tiempo de Muestreo Simulación	1 [μ s]

Tabla 7.2. Parámetros del Banco de Batería Powerwall 2 AC Tesla.

Parámetro	Valor
Voltaje CLI Panasonic NCR20700A	3.6 [V]
Capacidad CLI Panasonic NCR20700A	3.1 [Ah]
Voltaje Nominal Banco	100 [V]
Capacidad de Corriente Banco	135 [Ah]
Capacidad de Energía Banco	13.5 [kWh]
Cantidad de CLI	1232
CLI Conectadas en Serie	$27.78 \approx 28$ S
CLI Conectadas en Paralelo	$43.6 \approx 44$ P
A	8.3976 [V]
B	$0.4523 [\text{Ah}^{-1}]$
E_0	108.4359 [V]
R_{int}	$0.0074074 [\Omega]$
K	$0.0055495 [\text{V}]$

Se presenta en la Tabla 7.3, los parámetros utilizados para la sintonización de los controladores PI mediante el Lugar Geométrico de las Raíces para todas las simulaciones del capítulo 7 de esta Habilitación Profesional con los modelos de planta para el lazo de corriente h_i (5.70) y lazo de voltaje h_v (6.3), para el control de conexión en cascada voltaje-corriente. Ambos lazos cerrados de control se diseñan con un factor de amortiguamiento ξ de $\sqrt{2}/2$. Se opta por la elección de este criterio de diseño, ya que frente a estas condiciones el sistema es más robusto a las variaciones en los parámetros de la planta o actuador [40].

Tabla 7.3. Parámetros de Control en Cascada del Sistema para Banco de Batería Powerwall 2 AC Tesla.

Parámetros	Valor
$K_{p,v}$	1
$K_{i,v}$	1/10
$K_{p,i}$	-0.55652
$K_{i,i}$	1/1400

Las ecuaciones y parámetros del sistema de conversión en energía eléctrica y del banco de baterías son los siguientes:

El balance de potencias de ambos sistemas es expresado a continuación.

$$P_{ac} = P_{dc} \quad (7.1)$$

Por lo tanto, considerando un factor de potencia unitario $fp = 1$ en el lado AC, la corriente máxima de línea I_d en coordenadas de ejes rotatorios es:

$$I_d = \frac{2 \cdot (V_{dc})^2}{3 \cdot R_L \cdot V_s} = 4.728 \text{ A} \quad (7.2)$$

La corriente de saturación del controlador PI_{dc} , se incrementa en un 41 %.

$$I_{sat} = I_d \cdot 1.41 = 6.667 \text{ A} \quad (7.3)$$

En la potencia máxima del sistema, se obtiene mediante la siguiente expresión

$$P_{m\acute{a}x} = V_{banco} \cdot I_d = 472.8 \text{ W} \quad (7.4)$$

La resistencia mínima ante un impacto de carga, se muestra a continuación.

$$R_{min} = \frac{(V_{banco})^2}{P_{m\acute{a}x}} = 21.15 \text{ } \Omega \quad (7.5)$$

Al realizar la prueba de Impacto de carga se le agrega una resistencia en paralelo, cuya resistencia equivalente debe superar la resistencia mínima. La saturación del PI_i de corriente, es evaluado con un valor unitario en todas las pruebas a ejecutar.

7.2.1 Prueba Carga Nominal Batería 100 V

En esta prueba el Sistema Emulador de Baterías logra conseguir la respuesta dinámica de descarga de un banco de batería Powerwall 2 AC de Tesla, conectado a una carga de $30\ \Omega$.

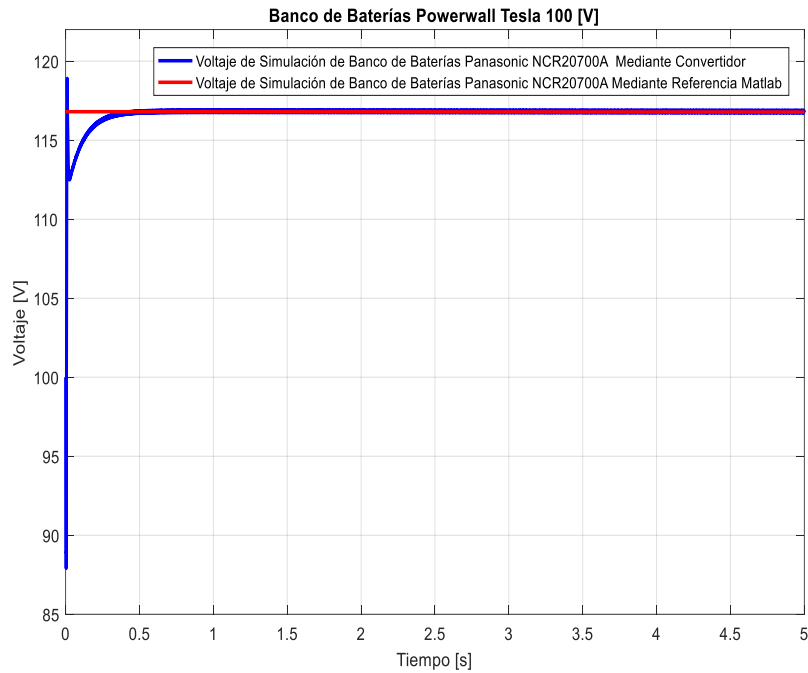


Figura 7.1 Voltajes Banco de Baterías Powerwall AC 2 Tesla 100 V, CLI Panasonic NCR20700A

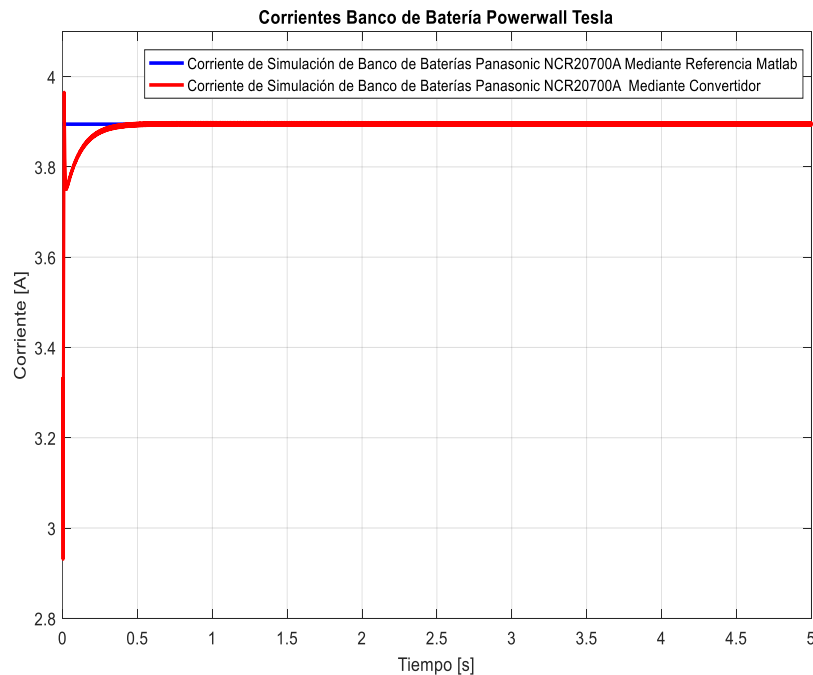


Figura 7.2 Corrientes Banco Baterías Powerwall AC 2 Tesla 100 V, CLI Panasonic NCR20700A

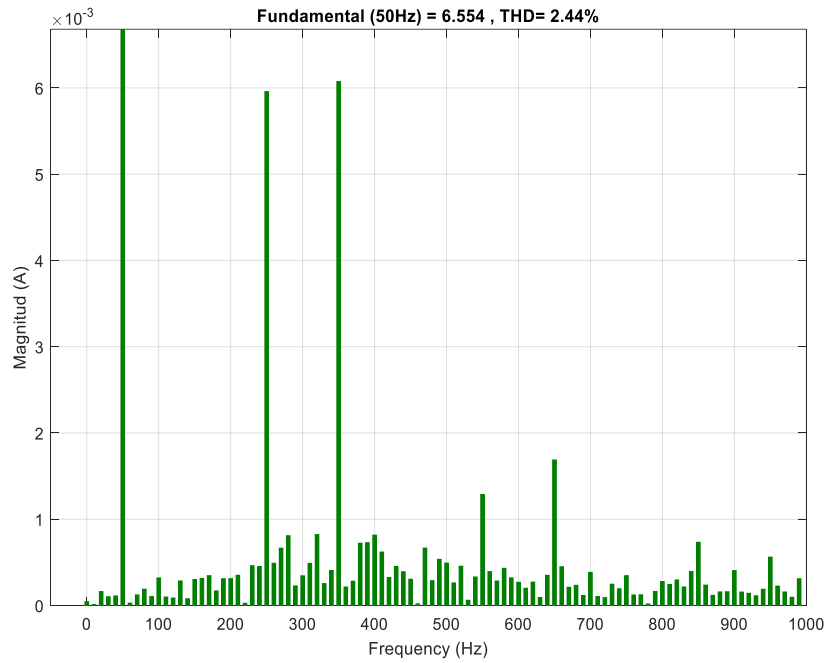


Figura 7.3 Espectro Armónico Corrientes de Línea del Sistema Emulador para Powerwall 2 AC Tesla 100 V

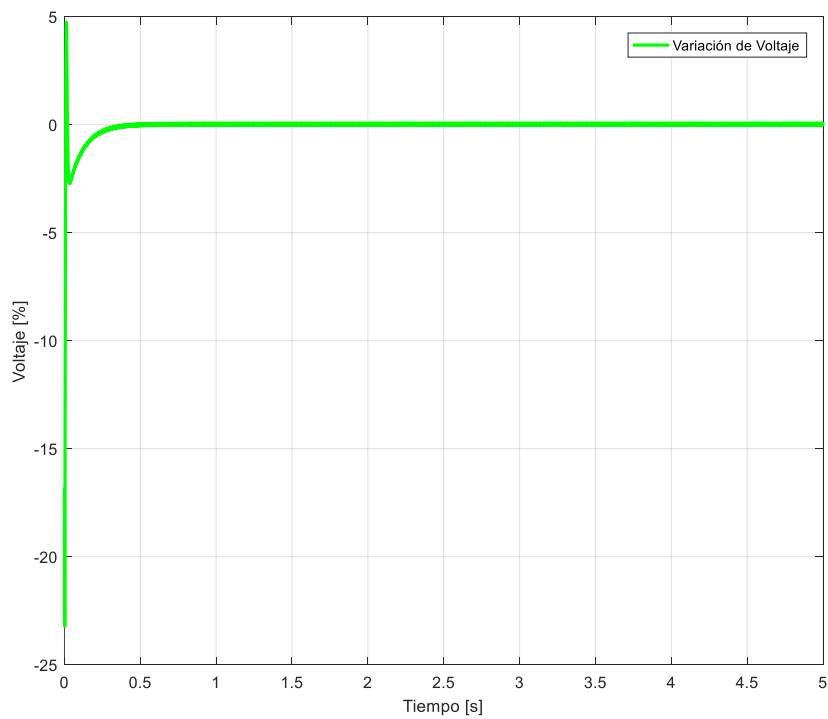


Figura 7.4 Variación entre los Voltajes de Referencia de Matlab y Sistema Emulador de Baterías Litio-Ion, Powerwall 2AC Tesla 100 V

7.2.2 Prueba Impacto de Carga Batería 100 V

Durante las condiciones de un impacto de carga se aplica a los 0.6 s y una resistencia en paralelo de 71.7Ω , Obteniendo los siguientes resultados.

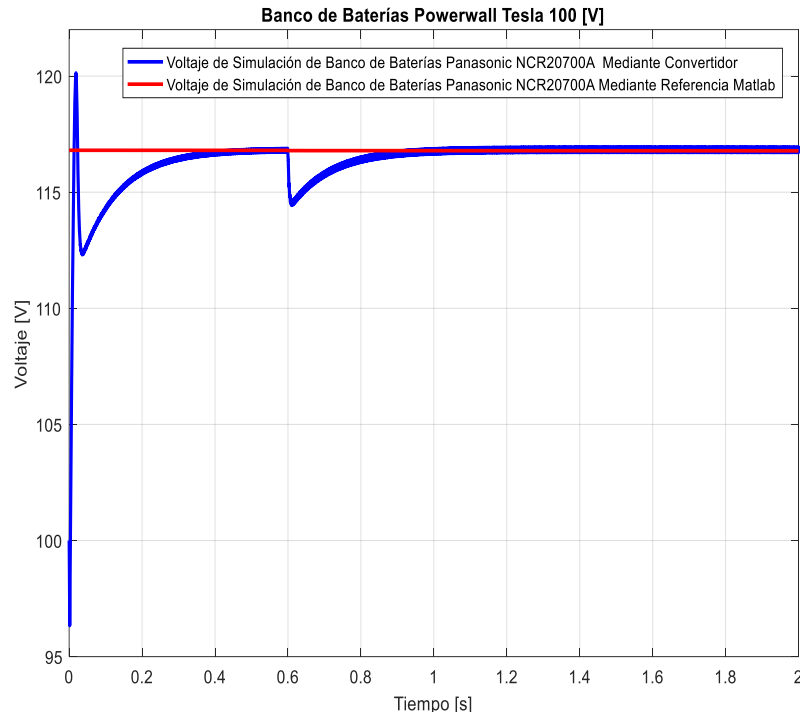


Figura 7.5 Banco de Baterías Powerwall 2 AC Tesla 100 V, Impacto de Carga

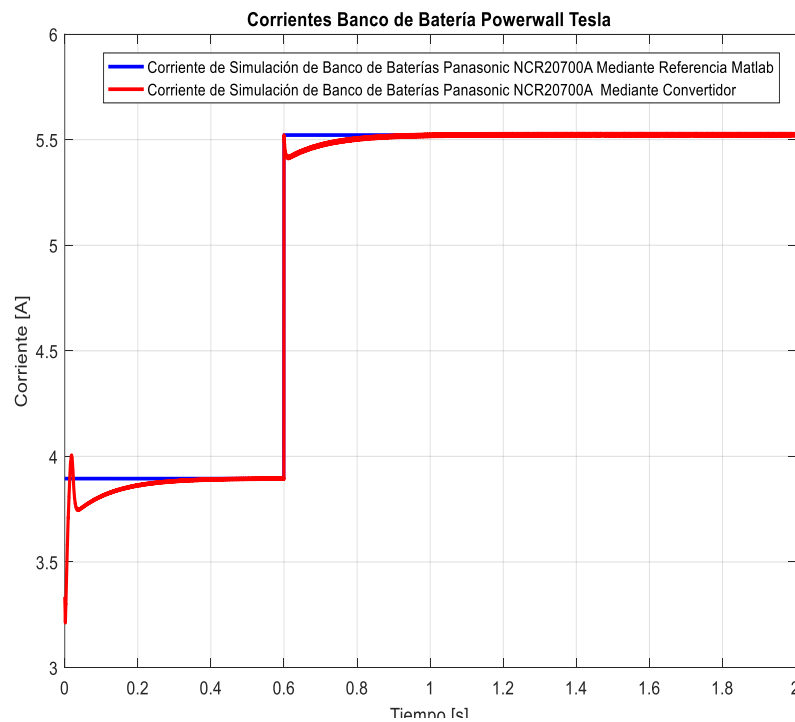


Figura 7.6 Corrientes Banco de Baterías Powerwall 2 AC Tesla 100 V, Impacto de Carga

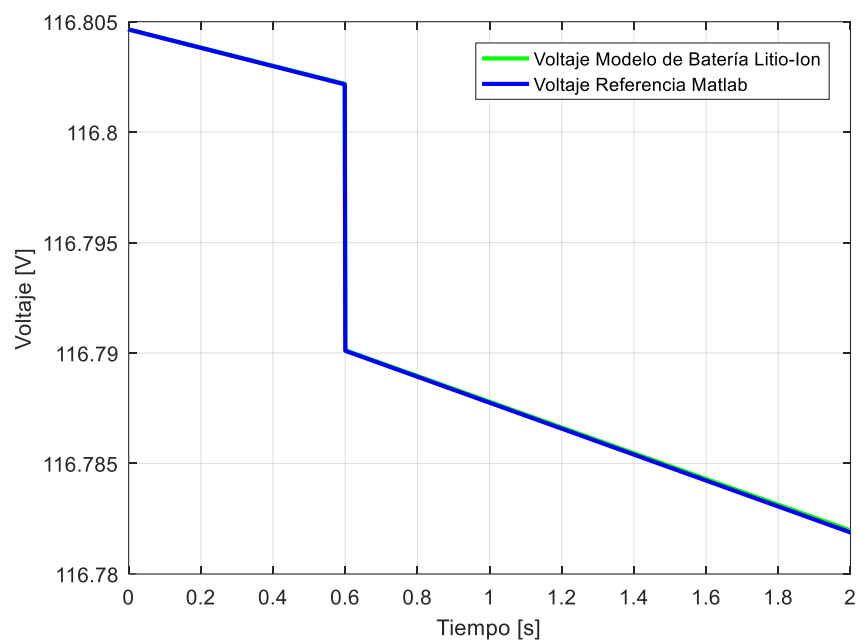


Figura 7.7 Voltajes Modelo Batería Litio-Ion y Referencia Matlab, Powerwall 2 AC Tesla 100 V

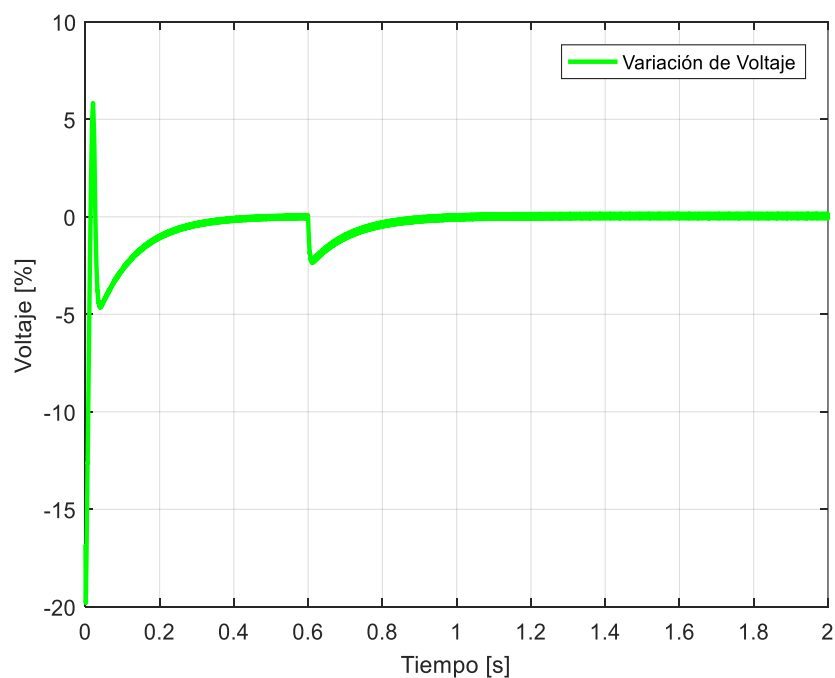


Figura 7.8 Variación entre los Voltajes, Sistema Emulador Batería Litio-Ion y Referencia Matlab, Powerwall 2 AC Tesla 100 V, Impacto de Carga

7.2.3 Prueba Máximo Impacto de Carga Batería 100 V

En esta prueba, se logra ejecutar el máximo impacto de carga, que puede operar el Sistema Emulador para Baterías de Litio, con las condiciones de diseño ya establecidas anteriormente, los parámetros a considerar en esta prueba se muestran en la siguiente Tabla 7.4. Se efectúa un impacto de carga a los 0.6 s de simulación.

Tabla 7.4. Parámetros del Sistema, Impacto de Carga Máximo Banco de Batería Powerwall 2 AC Tesla

Parámetro	Valor
Voltaje de Fase (V_s)	47 [$V_{m,L-N}$]
Frecuencia de Red (f_s)	50 [Hz]
r_s	0.1 [Ω]
L_s	10 [mH]
R_L	50 [Ω]
R_{L2}	14 [Ω]
C_{dc}	3000 [μ F]
Frecuencia Portadora f_{tri}	2500 [Hz]
Tiempo de Muestreo Simulación	1 [μ s]

La resistencia equivalente entre las dos resistencias de carga R_L y la generada por el impacto de carga en el sistema R_{L2} es el siguiente:

$$R_{eq} = \frac{R_L \cdot R_{L2}}{R_L + R_{L2}} = 10.93 \Omega \quad (7.6)$$

Por lo tanto, la potencia entregada por el sistema ante un máximo impacto de carga es:

$$P_{m\acute{a}x} = V_{banco} \cdot I_d = 1.3 \text{ kW} \quad (7.7)$$

La corriente de saturación del controlador de tensión, se incrementa al 71 % de la corriente de eje directo d máxima de impacto.

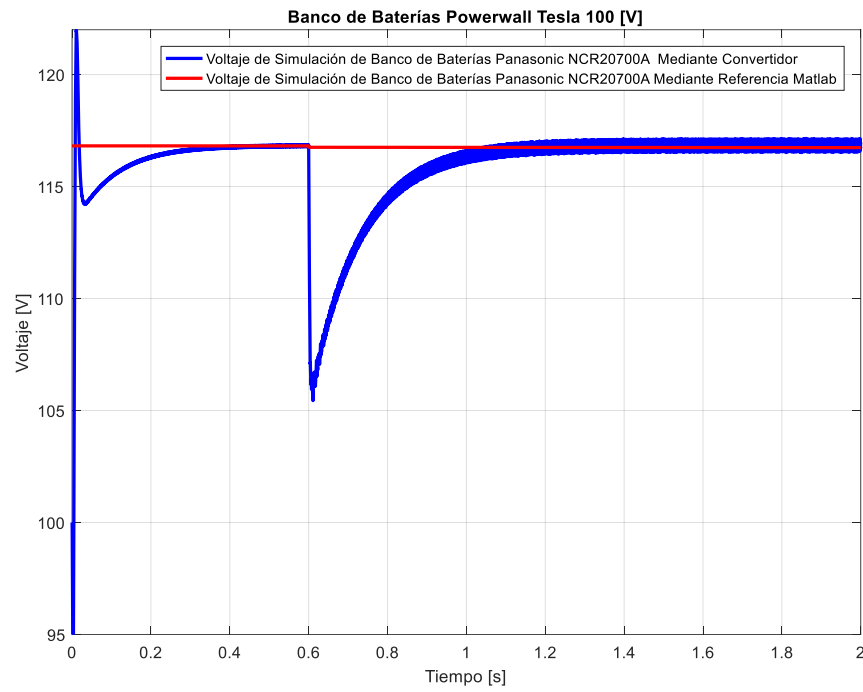


Figura 7.9 Banco de Baterías Powerwall 2 AC Tesla 100 V, Máximo Impacto de Carga

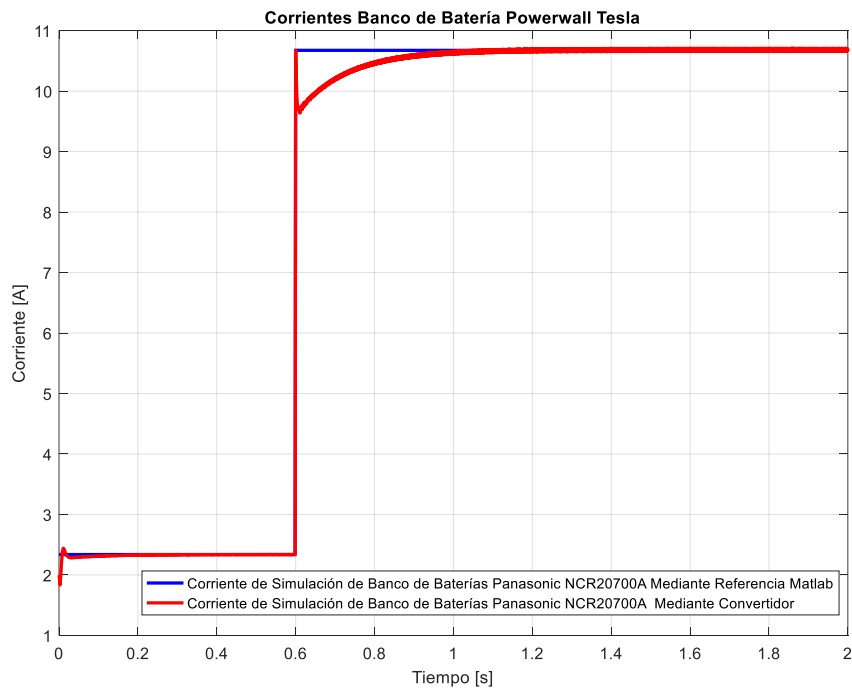
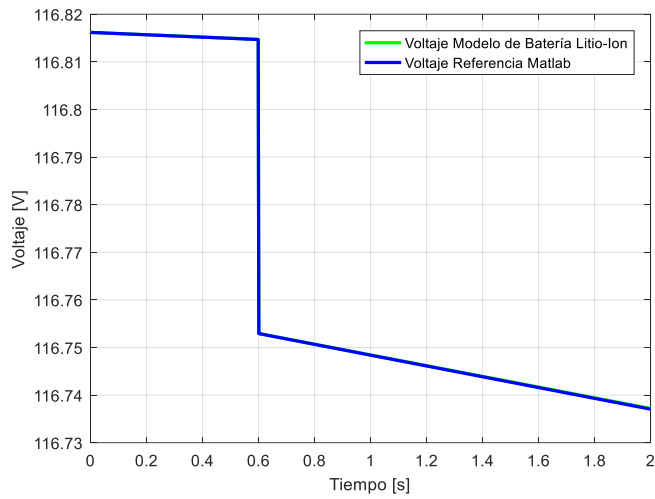
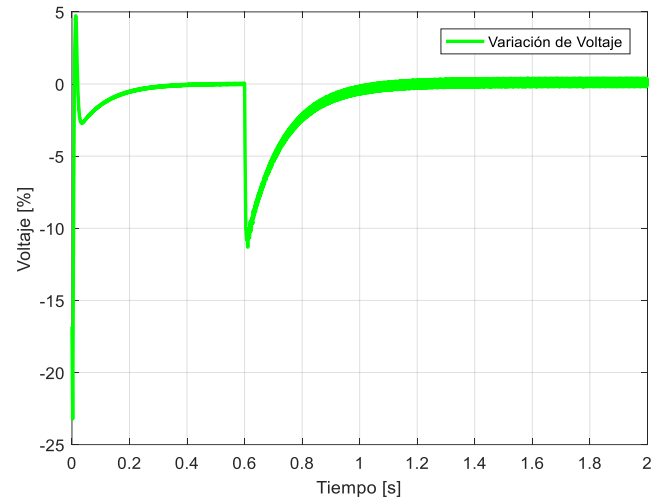


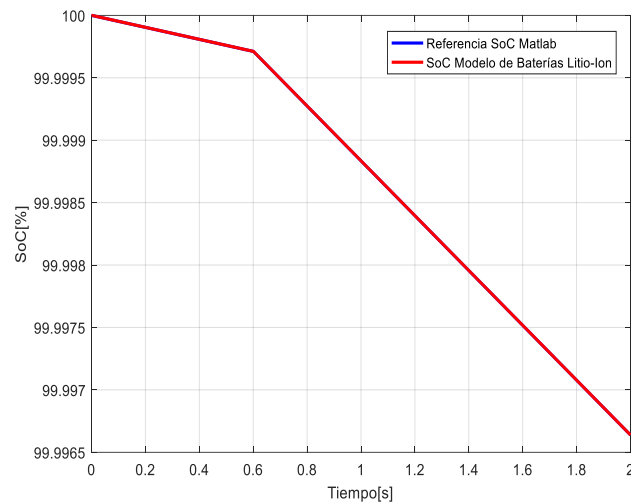
Figura 7.10 Corrientes Banco de Baterías Powerwall 2 AC Tesla 100 V, Máximo Impacto de Carga



(a)



(b)



(c)

Figura 7.11 Voltajes y Estado de Carga Modelo Batería Litio-Ion y Referencia Matlab Powerwall 2 AC Tesla 100 V, Máximo Impacto de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería Litio-Ion, **(b)** Variación Entre los Voltajes, Sistema Emulador para Baterías de Litio y Referencia Matlab, **(c)** Medidor SoC entre la Referencia de Matlab y Modelo de Baterías.

El Sistema Emulador para Baterías de Litio logra replicar las descargas del banco de litio Powerwall 2 AC Tesla de 100 V, destinada al almacenamiento de energía domiciliario con una capacidad de corriente de 135 Ah que opera a una corriente de descarga nominal de 135 A durante una hora con una carga resistiva de 0.74Ω . Se prueba con una carga nominal aleatoria de 30Ω , luego con el voltaje nominal y la carga resistiva mediante ley de Ohm se consigue la corriente de descarga que corresponde a 3.3 A, por lo tanto, la batería puede operar por más de una hora ya que esta carga tiene una resistencia mayor a la nominal, suministrando una potencia hacia la carga de 330 W. En la Figura 7.1 se ilustra la simulación del voltaje de descarga del banco de baterías, que se componen por las señales de referencia de Matlab y del Sistema Emulador, ambos se sometieron a las mismas condiciones de operación en todas las pruebas propuestas.

Iniciando este escenario de simulación, el enlace DC del Sistema Emulador, en su transiente el comportamiento dinámico de descarga tiende a seguir la referencia de Matlab hasta alcanzarlo en su totalidad antes de los 0.5 s, logrando un seguimiento de correcto de la referencia mediante los controladores PI diseñados, donde se demuestra que en la Figura 7.4, la variación porcentual entre los voltajes de descarga de la señal de referencia de Matlab y del Sistema Emulador de Baterías corresponde a un 0 % en estado estacionario. En la Figura 7.2, se ilustran las corrientes de descarga en donde también se aprecia un seguimiento correcto de la referencia, el comportamiento dinámico de las corrientes de descarga en su inicio es mayor en magnitud durante los cinco segundos de simulación, avanzado el tiempo su dinámica cambia hasta alcanzar su valor nominal de corriente conforme a la descarga de voltaje inherente de la batería de litio. El Sistema Emulador con los parámetros implementados en la Tabla 7.1, en el lado AC del sistema, las corrientes de línea alcanzaron una distorsión armónica de un 2.44 % como se puede observar en la Figura 7.3, con predominancia en la quinta y séptima armónica perteneciente a la banda de baja frecuencia producto de los interruptores de potencia del convertidor originando armónicos impares del orden $6n \pm 1$ con n un entero positivo.

En la prueba de impacto, se aplica una conexión en paralelo de una resistencia aleatoria a la simulación de 71.7Ω , consiguiendo una resistencia equivalente de 21.5Ω que demanda una corriente de 4.65 A, suministrando una potencia de 465 W. Los controladores PI en conexión cascada logran que el voltaje del Sistema Emulador sea igual a la referencia después de los 0.4 s como se observa en la Figura 7.5, luego de avanzada la simulación, se hace un impacto a los 0.6 s, tanto la referencia como el Sistema Emulador solicitan más corriente hacia la carga, como se puede observar en la Figura 7.6, en consecuencia de esto, el voltaje de referencia de Matlab como el Modelo de Baterías de Litio-Ion

sufren una baja de tensión en la simulación del banco durante los 0.6 s al realizarse el impacto de carga, como se ilustra en la Figura 7.7, esto ocasiona que el capacitor del Sistema Emulador se descargue hasta que la dinámica del lazo restablece el control en un tiempo aproximado de 0.85 s observado en la Figura 7.5, siguiendo a la dinámica de voltaje de ambos modelos de baterías exitosamente, volviendo a obtener un valor de cero error en estado estacionario, como se ilustra en la Figura 7.8. Como la potencia entregada por la batería es de 465 W luego del impacto, según los parámetros nominales de este BESS tiene la capacidad de proporcionar una energía de 13.5 kWh, es decir, entrega 13.5 kW en una hora. En consecuencia, esta batería opera por más de una hora ya que suministra una potencia menor a la nominal. Para la prueba de máximo impacto de carga para el banco de batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V, se utilizan dos resistencias aleatorias, para observar el comportamiento dinámico del sistema con la referencia de voltaje de Matlab, hasta que lazo de control diseñado sea capaz de generar una respuesta eficaz ante la demanda de corriente de la carga. En este escenario de simulación, cuando se aplica un impacto los 0.6 s, como se puede observar en la Figura 7.9, el capacitor del Sistema Emulador inicia su dinámica de seguimiento de voltaje a la referencia de Matlab hasta alcanzarla aproximadamente a los 0.45 s, luego de implementado el impacto, el capacitor del enlace DC se descarga considerablemente, hasta que el lazo diseñado de control restablece su respuesta ante la baja de voltaje en la dinámica por efecto del impacto de carga siguiendo la referencia con éxito, esto también se ve reflejado en la Figura 7.11 (a), donde se observa las dinámicas de descarga de voltaje de las referencia de Matlab y del Modelo de Batería Litio-Ion, ambas señales obtienen respuestas similares durante los 2 s de la simulación del banco, esto demanda hasta 4.5 veces la corriente solicitada por la carga inicial, mostrado en la Figura 7.10, este impacto de carga genera una resistencia de carga equivalente de 10.93Ω a una corriente de 9.15 A, como la potencia es igual al voltaje multiplicado por la corriente, es decir, la batería suministra una potencia de 915 W. En consecuencia, el banco de baterías opera por más de una hora, pero tendrá menor carga eléctrica para suministrar que la prueba anterior de impacto de carga. Además, en la Figura 7.11 (b), la prueba alcanzó en la descarga de voltaje entre la referencia de Matlab y del Sistema Emulador un error de un 0 % en estado estacionario. En la Figura 7.11 (c), se observa el medidor de estado de carga del escenario propuesto para el banco de baterías Powerwall 2 AC Tesla ante un máximo impacto de carga a los 0.6 s de simulación, ambas señales son similares en su dinámica cuya variación entre los SoC que corresponde a un valor ínfimo que está relacionada con la resistencia de carga, y el impacto de carga provoca una disminución de electricidad en la batería producto de la demanda de corriente que suministra hacia la carga resistiva.

7.3. Batería de Litio Tesla Model S 400 V

El Sistema Emulador debe replicar la descarga de un banco de litio del EV Tesla S de 400 V, conformado por la CLI Panasonic NCR18650PF. Los parámetros de ambos sistemas se presentan a continuación:

Tabla 7.5. Parámetros del Sistema para Banco de 400 V

Parámetro	Valor
Voltaje de Fase (V_s)	188.76 [$V_{m,L-N}$]
Frecuencia de Red (f_s)	50 [Hz]
r_s	0.6 [Ω]
L_s	30 [mH]
R_{dc}	95 [Ω]
C_{dc}	3000 [μ F]
Frecuencia Portadora f_{tri}	2500 [Hz]
Tiempo de Muestreo Simulación	1 [μ s]

Tabla 7.6. Parámetros del Banco de Batería Tesla Model S 400 V

Parámetro	Valor
Voltaje CLI Panasonic NCR18650PF	3.6 [V]
Capacidad CLI Panasonic NCR18650PF	2.7 [Ah]
Voltaje Nominal Banco	400 [V]
Capacidad de Corriente Banco	250 [Ah]
Capacidad de Energía Banco	100 [kWh]
Cantidad de CLI	10416
CLI Conectadas en Serie	111.11 $\approx$ 112 S
CLI Conectadas en Paralelo	92.7 $\approx$ 93 P
A	33.5904 [V]
B	0.2443 [Ah^{-1}]
E_0	433.7436 [V]
R_{int}	0.016 [Ω]
K	0.011987 [V]

Los parámetros K_p y K_i de los controladores obtenidos para la conexión en cascada voltaje-corriente, se presentan en la Tabla 7.7, donde se diseña con un factor de amortiguamiento ξ de $\sqrt{2}/2$.

Tabla 7.7. Parámetros de Control en Cascada del Sistema para Banco de Baterías Tesla Model S.

Parámetros	Valor
$K_{p,v}$	0.97
$K_{i,v}$	1/8.1647
$K_{p,i}$	-0.51434
$K_{i,i}$	1/1752

El balance de potencias de ambos sistemas se expresa por la ecuación (7.1), por lo tanto, la corriente máxima de línea I_d en coordenadas rotatorias es:

$$I_d = \frac{2 \cdot (V_{dc})^2}{3 \cdot R_L \cdot V_s} = 5.95 \text{ A} \quad (7.8)$$

En la corriente de saturación del controlador PI_{dc} , se incrementa en un 47 %.

$$I_{sat} = I_d \cdot 1.47 = 8.74 \text{ A} \quad (7.9)$$

La potencia máxima del sistema, se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$P_{m\acute{a}x} = V_{banco} \cdot I_d = 2.38 \text{ kW} \quad (7.10)$$

En la resistencia mínima, ante un impacto de carga, se presenta a continuación.

$$R_{min} = \frac{(V_{banco})^2}{P_{m\acute{a}x}} = 67.24 \text{ } \Omega \quad (7.11)$$

Al realizar la prueba de Impacto de carga se le agrega una resistencia en paralelo, cuya resistencia equivalente debe superar la resistencia mínima. La saturación del PI_i de corriente, es evaluado con un valor unitario en todas las pruebas a ejecutar.

7.3.1 Prueba Carga Nominal Batería 400 V

En esta prueba el Sistema Emulador de Baterías logra conseguir la respuesta dinámica de descarga de un banco de baterías Li-Ion Tesla Model S 400 V, conectado a una carga de 95Ω .

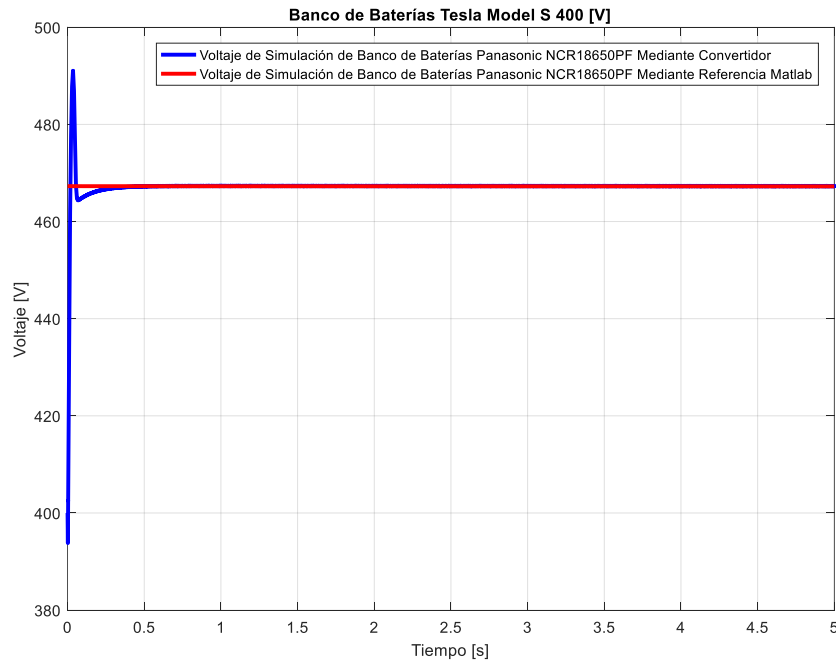


Figura 7.12 Voltajes Banco de Baterías Tesla Model S 400 V, CLI Panasonic NCR18650PF

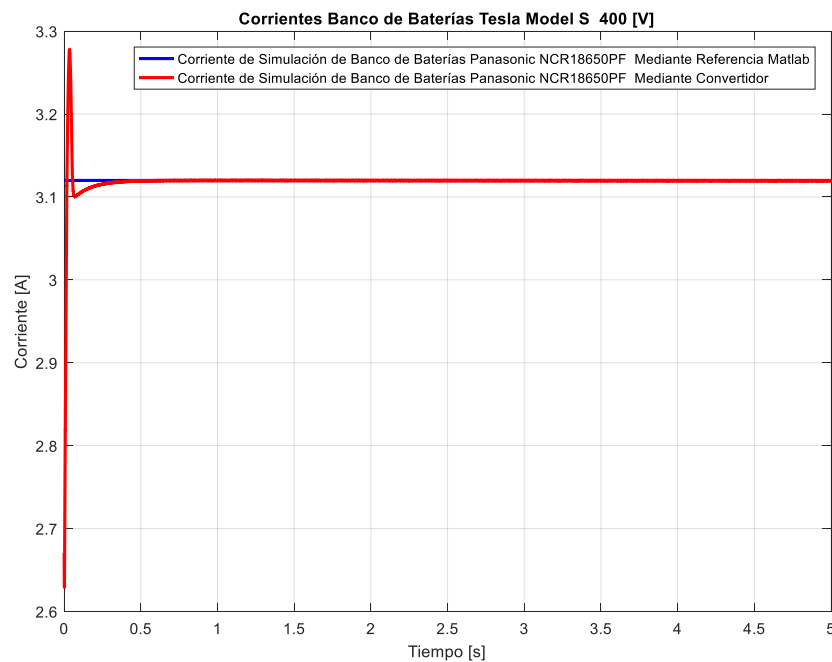


Figura 7.13 Corrientes Banco Baterías Tesla Model S 400 V, CLI Panasonic NCR18650PF

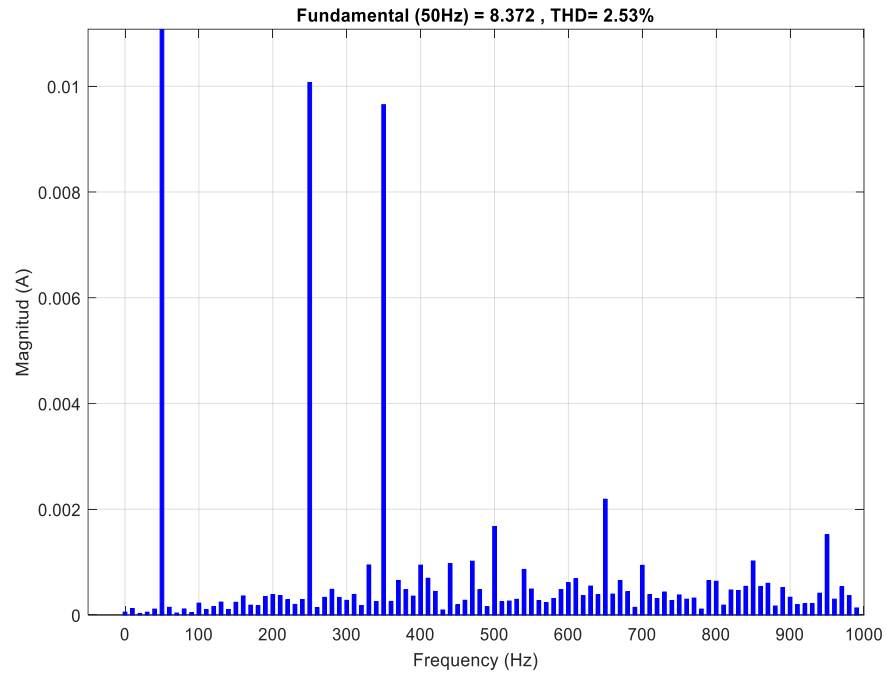


Figura 7.14 Espectro Armónico Corrientes de Línea del Sistema Emulador para Banco de Baterías Tesla Model S 400 V

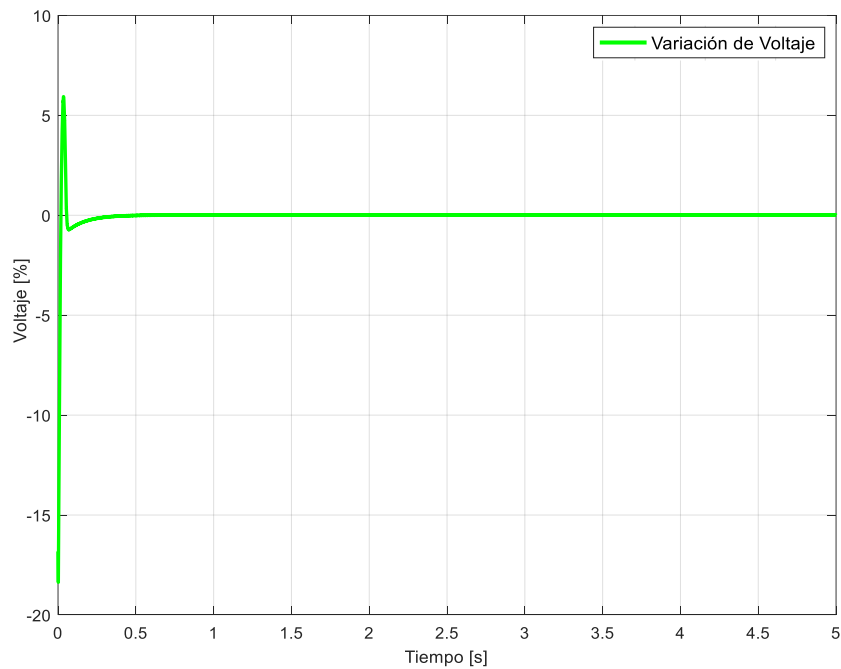


Figura 7.15 Variación Entre los Voltajes, Sistema Emulador para Baterías de Litio y Referencia Matlab, Tesla Model S 400 V

7.3.2 Prueba Impacto de Carga Batería 400 V

Ahora se aplica a los 0.6 s un impacto de carga al sistema incorporando una resistencia en paralelo de 250 Ω . Obteniendo los siguientes resultados.

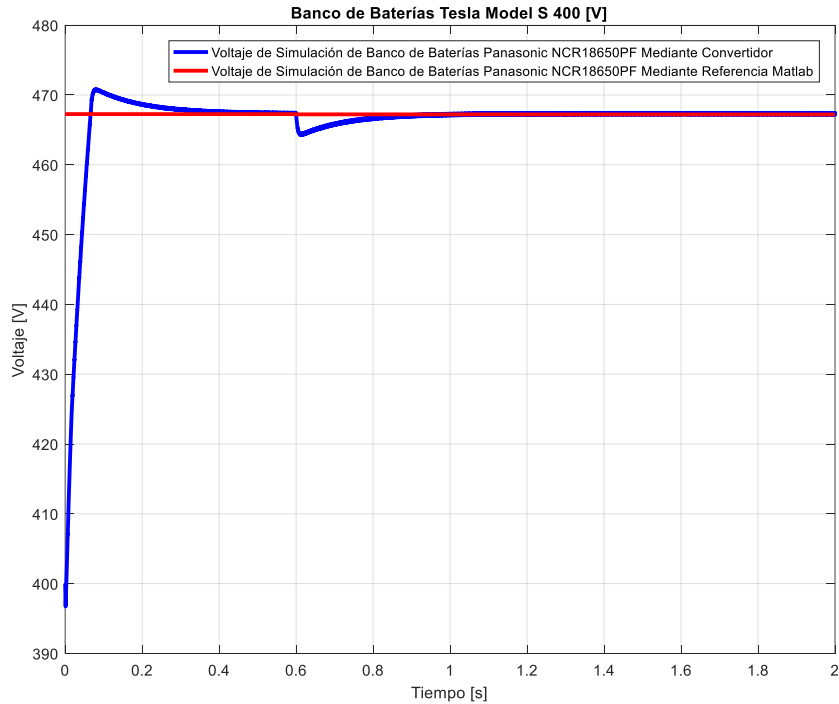


Figura 7.16 Banco de Baterías Tesla Model S 400 V, Impacto de Carga

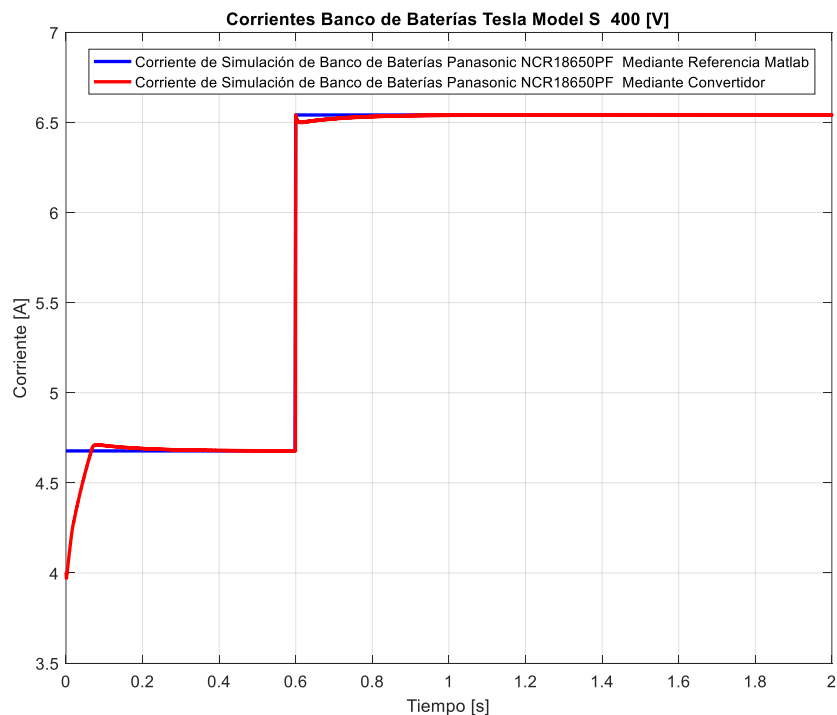


Figura 7.17 Corrientes Banco de Baterías Tesla Model S 400 V, Impacto de Carga

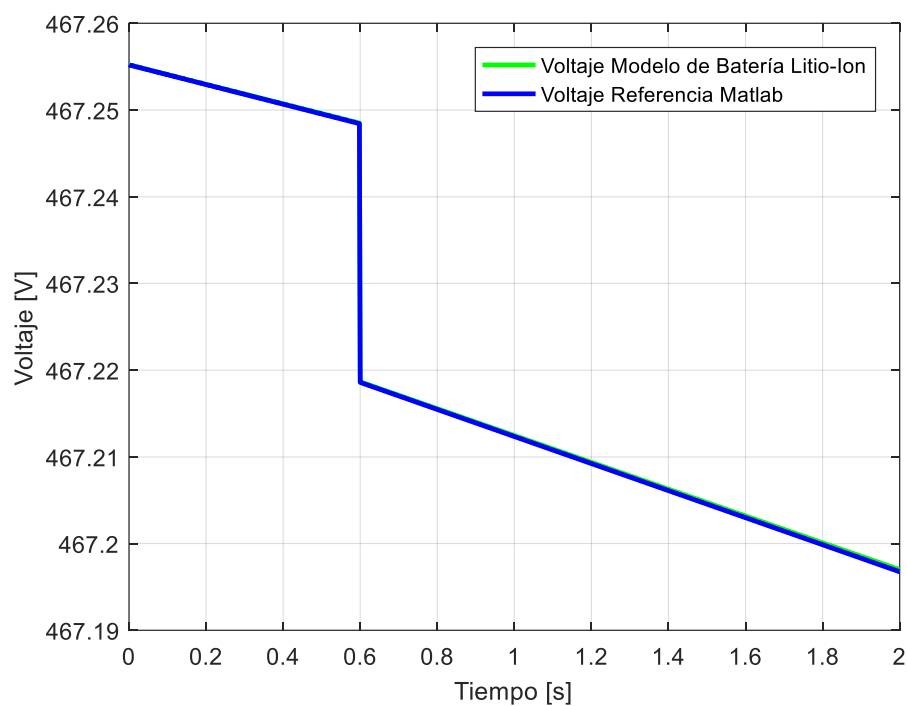


Figura 7.18 Voltajes Modelo Batería Litio-Ion y Referencia Matlab, Tesla Model S 400 V

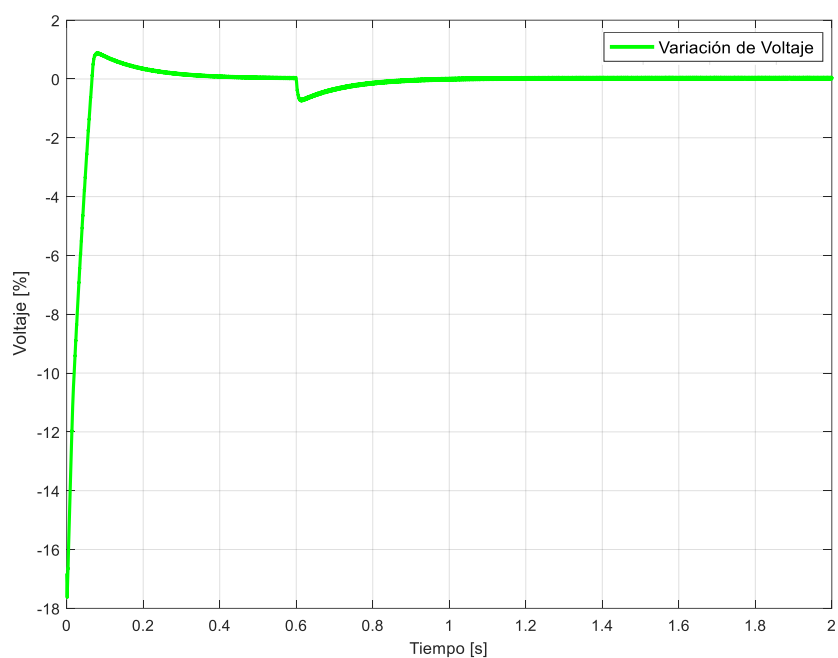


Figura 7.19 Variación entre los Voltajes, Sistema Emulador para Baterías de Litio y Referencia Matlab, Banco de Baterías Tesla Model S 400 V, Impacto de Carga

7.3.3 Prueba Impacto de Carga Máximo Batería 400 V

En esta prueba, se logra ejecutar el máximo impacto de carga que puede operar el Sistema Emulador para Baterías de Litio, con las condiciones de diseño ya establecidas anteriormente, los parámetros a considerar en esta prueba se muestran en la siguiente Tabla 7.8. Se efectúa un impacto de carga a los 0.6 s en la simulación.

Tabla 7.8. Parámetros del Sistema, Impacto de Carga Máximo Banco de Baterías Tesla Model S 400 V

Parámetro	Valor
Voltaje de Fase (V_s)	188.76 [$V_{m,L-N}$]
Frecuencia de Red (f_s)	50 [Hz]
r_s	0.6 [Ω]
L_s	30 [mH]
R_L	150 [Ω]
R_{L2}	50 [Ω]
C_{dc}	3000 [μ F]
Frecuencia Portadora f_{tri}	2500 [Hz]
Tiempo de Muestreo Simulación	1 [μ s]

La resistencia equivalente entre las dos resistencias de carga R_L y la generada por el impacto de carga en el sistema R_{L2} , es el siguiente:

$$R_{eq} = \frac{R_L \cdot R_{L2}}{R_L + R_{L2}} = 37.5 \Omega \quad (7.12)$$

Entonces, la potencia entregada por el sistema ante un máximo impacto de carga es:

$$P_{m\acute{a}x} = V_{banco} \cdot I_d = 6.03 \text{ kW} \quad (7.13)$$

La corriente de saturación del controlador de tensión, se incrementa al 47 % de la corriente de eje directo d máxima de impacto.

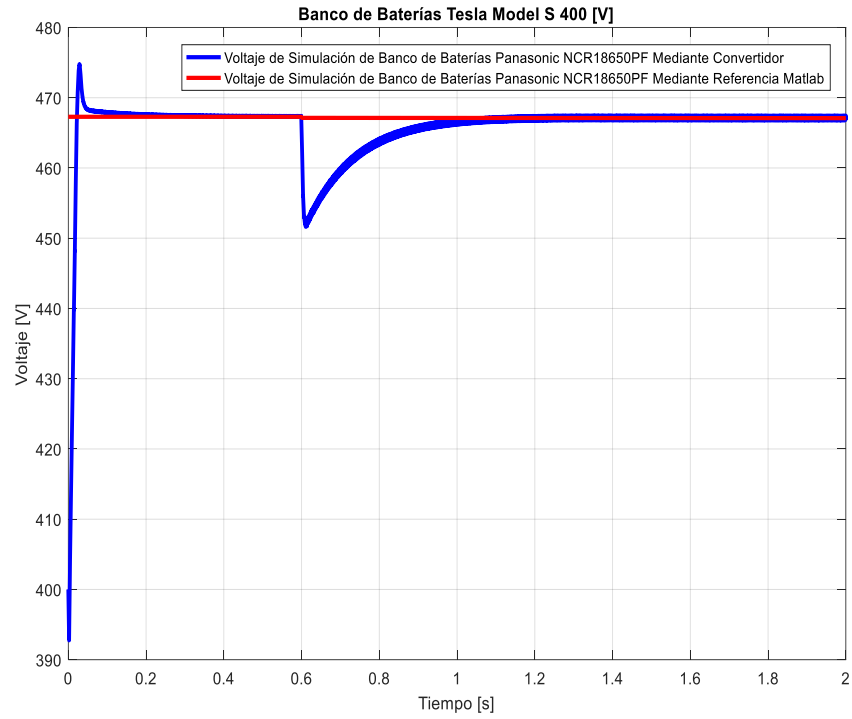


Figura 7.20 Banco de Batería Tesla Model S 400 V, Máximo Impacto de Carga

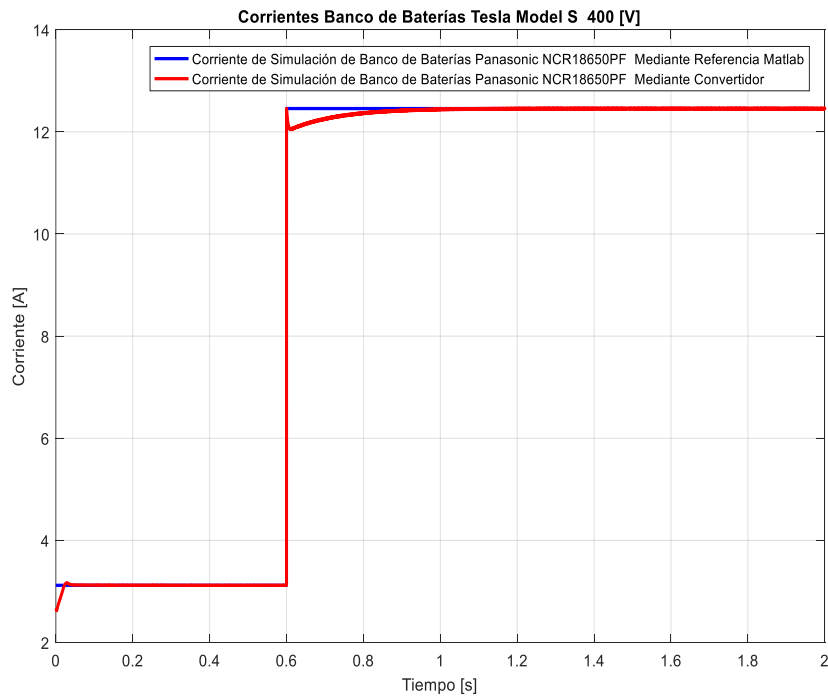
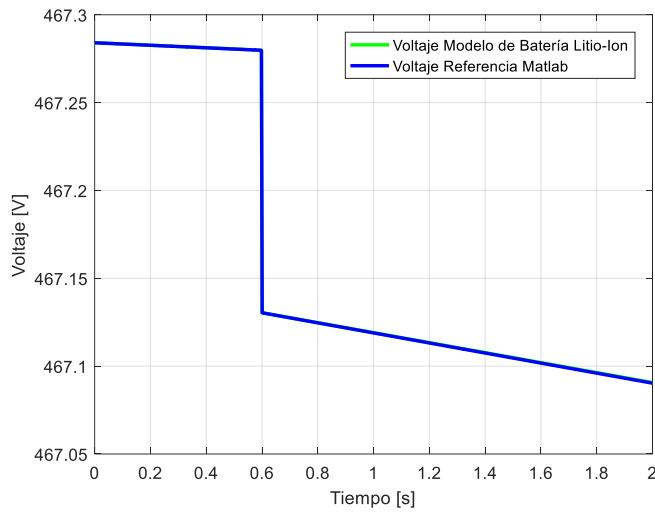
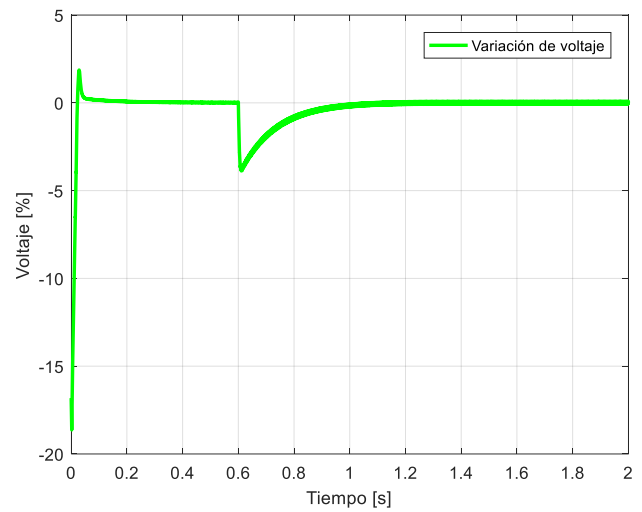


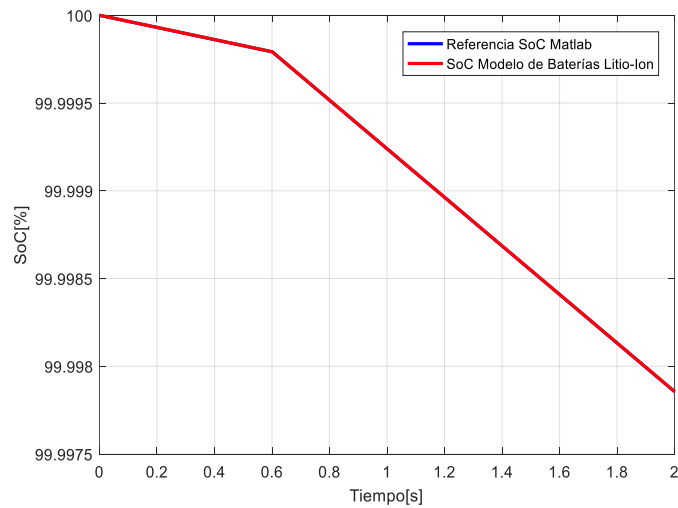
Figura 7.21 Corrientes Banco de Batería Tesla Model S 400 V, Máximo Impacto de Carga



(a)



(b)



(c)

Figura 7.22 Voltajes y Estado de Carga Modelo Batería Litio-Ion y Referencia Matlab Banco de Baterías Tesla Model S 400 V, Máximo Impacto de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería Litio-Ion, **(b)** Variación Entre los Voltajes, Sistema Emulador para Baterías de Litio y Referencia Matlab, **(c)** Medidor SoC entre la Referencia de Matlab y Modelo de Baterías.

El Sistema Emulador para Baterías de Litio logra replicar el banco de baterías de litio del EV Tesla Model S 400 V con una capacidad de corriente de 250 Ah que a condiciones nominales opera a una corriente de descarga de 250 A durante una hora con una carga resistiva de 1.6Ω . Se prueba con una carga nominal aleatoria de 95Ω , luego con el voltaje nominal y la carga resistiva mediante ley de Ohm se consigue la corriente de descarga de 4.2 A, por tanto, la batería puede operar por más de una hora ya que esta carga tiene una resistencia mayor a la nominal, suministrando una potencia hacia la carga de 1.68 kW. En la Figura 7.12, se ilustra las señales representan los voltajes de descarga de la referencia de Matlab y del Sistema Emulador en su enlace DC, al iniciar la simulación el comportamiento dinámico tiende al seguimiento de la referencia, hasta que aproximadamente alcanza la consigna a los 0.25 s exitosamente mediante el diseño correcto del lazo de control, como se puede observar en la Figura 7.15, la variación de voltaje entre la referencia de Matlab y del Sistema Emulador alcanza un valor de 0 % en estado estacionario.

En la Figura 7.13, se ilustra la corriente de descarga del Sistema Emulador, de esta última presenta un seguimiento exitoso de la referencia de Matlab, el comportamiento dinámico de las corrientes de descarga en su inicio es mayor en magnitud durante los cinco segundos de simulación, avanzado el tiempo su dinámica cambia hasta alcanzar su valor nominal de corriente conforme a la descarga de voltaje inherente de la batería de litio. El Sistema Emulador con los parámetros implementados en la Tabla 7.5, consigue una distorsión armónica de corrientes de línea en el lado AC de 2.53 % como se observa en la Figura 7.14, siendo el quinto y séptimo los armónicos más preponderantes en la banda de baja frecuencia generados por los interruptores de potencia del convertidor originando armónicos impares del orden $6n \pm 1$ con n un entero positivo. En la prueba de impacto para el banco de baterías del EV Tesla S, consiste en agregar una resistencia aleatoria en paralelo de 250Ω , consiguiendo una resistencia equivalente de 68.8Ω que demanda una corriente de 5.8 A, suministrando una potencia de 2.3 kW. Los controladores PI en conexión en cascada logran un seguimiento exitoso de la referencia de descarga de Matlab, aproximadamente a los 0.45 s, luego se aplica el impacto de carga a los 0.6 s, como se ilustra en la Figura 7.16, ocasionando que el capacitor del Sistema Emulador se descargue, pero la dinámica del lazo restablece el control en un tiempo aproximado de 0.85 s, volviendo a obtener un valor de error cero en estado estacionario, como se muestra en la Figura 7.19. Ambos sistemas deben compensar los requerimientos de corriente por el impacto, como se muestra en la Figura 7.17, donde la corriente del Sistema Emulador tiene el mismo comportamiento en estado estacionario con la referencia, y al producirse el impacto, la corriente aumenta aproximadamente en 1.4 veces en comparación con la carga inicial.

En la Figura 7.18, se ilustra en detalle las dinámicas de descarga de la referencia de Matlab y del Modelo de Batería Litio-Ion del Sistema Emulador, ambas señales obtienen respuestas similares durante los 2 segundos de la simulación del banco. Como la potencia entregada por la batería es de 2.3 kW luego del impacto, según los parámetros nominales de este BESS tiene la capacidad de proporcionar una energía de 100 kWh, es decir, entrega 100 kW en una hora de descarga. En consecuencia, esta batería opera por más de una hora ya que suministra una potencia menor a la nominal.

En la prueba de máximo impacto de carga para la simulación del banco de batería del EV Tesla S 400 V, se utilizan dos resistencias aleatorias en este escenario, para observar hasta donde es capaz de operar adecuadamente el lazo de control diseñado. En la Figura 7.20, se muestra como el capacitor del Sistema Emulador empieza a cargarse para seguir la referencia de voltaje de Matlab de manera correcta, aproximadamente a los 0.21 s, luego del impacto, el capacitor se descarga considerablemente hasta que el diseño del lazo restablece el seguimiento correcto de la referencia del voltaje de Matlab, este impacto se ilustra en la Figura 7.22 (a), en donde se encuentran los voltajes de descarga tanto de la referencia de Matlab como del Modelo de Baterías Litio-Ion del Sistema Emulador, ambas señales son similares en su dinámica durante los 2 s de simulación del banco. El cambio de carga en la Figura 7.21, produjo un aumento aproximado de 4.1 veces en la demanda de corriente en comparación a la entregada a la carga inicial, este impacto genera una resistencia de carga equivalente de 37.5Ω a una corriente de 10.6 A, como la potencia es igual al voltaje multiplicado por la corriente, es decir, la batería suministra una potencia de 4.2 kW. En consecuencia, el banco de baterías entrega esta potencia por más de una hora, pero tiene menor carga eléctrica para suministrar que la prueba anterior de impacto de carga.

Además, en la Figura 7.22 (b), la prueba de máximo impacto de carga alcanza en la descarga de voltaje entre la referencia de Matlab y del Sistema Emulador un error de un 0 % en estado estacionario. En la Figura 7.22 (c), se observa el medidor de estado de carga del escenario propuesto para el banco de baterías del EV Tesla S 400 V ante un impacto de carga a los 0.6 s de simulación, ambas señales son similares en su dinámica cuya variación entre los SoC corresponde a un valor ínfimo que está relacionada con la resistencia, y el impacto de carga provoca una disminución de electricidad en la batería producto de la demanda de corriente que suministra hacia la carga resistiva.

7.4. Batería de Litio Porsche Taycan 800 V

El Sistema Emulador debe replicar la descarga de un banco Li-Ion del EV Porsche Taycan 800 V, conformado por la CLI LG Chem E66A. Los parámetros de ambos sistemas se muestran a continuación:

Tabla 7.9. Parámetros del Sistema para Banco de 800 V

Parámetro	Valor
Voltaje de Fase (V_s)	390 [$V_{m,L-N}$]
Frecuencia de Red (f_s)	50 [Hz]
r_s	0.2 [Ω]
L_s	45 [mH]
R_{dc}	100 [Ω]
C_{dc}	3000 [μ F]
Frecuencia Portadora f_{tri}	2500 [Hz]
Tiempo de Muestreo Simulación	1 [μ s]

Tabla 7.10. Parámetros del Banco de Batería Porsche Taycan 800 V

Parámetro	Valor
Voltaje CLI LG Chem E66A	3.657 [V]
Capacidad CLI LG Chem E66A	65 [Ah]
Voltaje Nominal Banco	800 [V]
Capacidad de Corriente Banco	116.8 [Ah]
Capacidad de Energía Banco	93.4 [kWh]
Cantidad de CLI	396
CLI Conectadas en Serie	218.7585 $\approx$ 219 S
CLI Conectadas en Paralelo	1.8102 $\approx$ 2 P
A	67.1808 [V]
B	0.5228 [Ah ⁻¹]
E_0	867.4872 [V]
R_{int}	0.068493 [Ω]
K	0.051314 [V]

Los parámetros K_p y K_i de los controladores obtenidos para la conexión en cascada voltaje-corriente, se presentan en la Tabla 7.11, donde se diseña con un factor de amortiguamiento ξ de $\sqrt{2}/2$.

Tabla 7.11. Parámetros de Control en Cascada del Sistema para Banco de Batería Porsche Taycan.

Parámetros	Valor
$K_{p,v}$	1
$K_{i,v}$	1/30
$K_{p,i}$	-0.39863
$K_{i,i}$	1/2011

El balance de potencias de ambos sistemas se expresa por la ecuación (7.1), la corriente máxima de línea I_d en coordenadas rotatorias es:

$$I_d = \frac{2 \cdot (V_{dc})^2}{3 \cdot R_L \cdot V_s} = 10.94 \text{ A} \quad (7.14)$$

La corriente de saturación del controlador PI_{dc} , se incrementa en un 47 %.

$$I_{sat} = I_d \cdot 1.47 = 16.1 \text{ A} \quad (7.15)$$

En la potencia máxima del sistema, se obtiene mediante la siguiente expresión

$$P_{m\acute{a}x} = V_{banco} \cdot I_d = 8.75 \text{ kW} \quad (7.16)$$

La resistencia mínima ante un impacto de carga, se muestra a continuación.

$$R_{min} = \frac{(V_{banco})^2}{P_{m\acute{a}x}} = 73.12 \text{ } \Omega \quad (7.17)$$

Al realizar la prueba de Impacto de carga se le agrega una resistencia en paralelo, cuya resistencia equivalente debe superar la resistencia mínima. La saturación del PI_i de corriente, es evaluado con un valor de 1.104 en todas las pruebas a ejecutar.

7.4.1 Prueba Carga Nominal Batería de 800 V

En esta prueba el Sistema Emulador logra conseguir la respuesta dinámica de descarga de un banco de baterías Li-Ion del EV Porsche Taycan 800 V, conectado a una carga de 100 Ω .

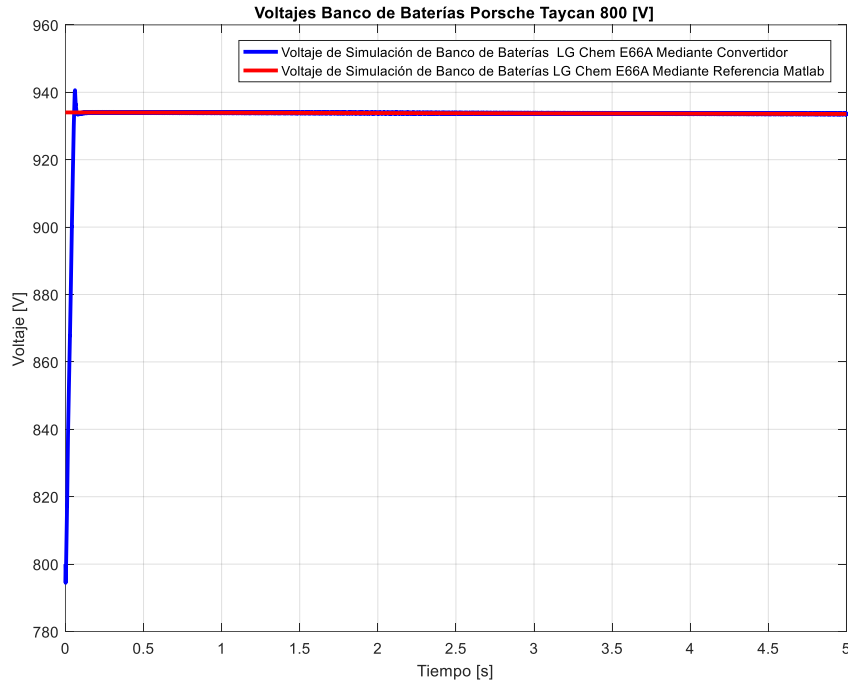


Figura 7.23 Voltajes Banco de Batería Porsche Taycan 800 V, CLI LG Chem E66A

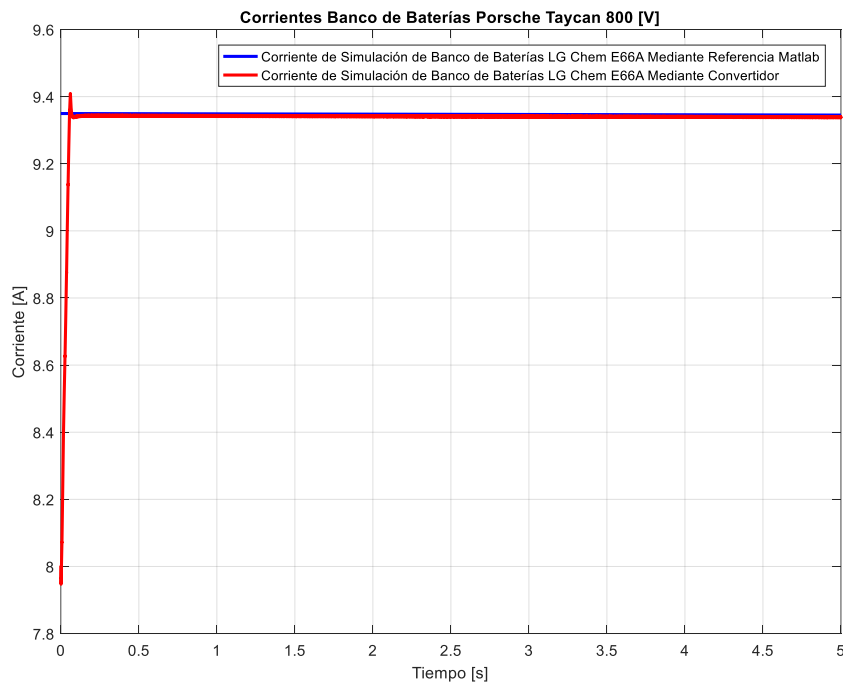


Figura 7.24 Corrientes Banco Batería Porsche Taycan 800 V, CLI LG Chem E66A

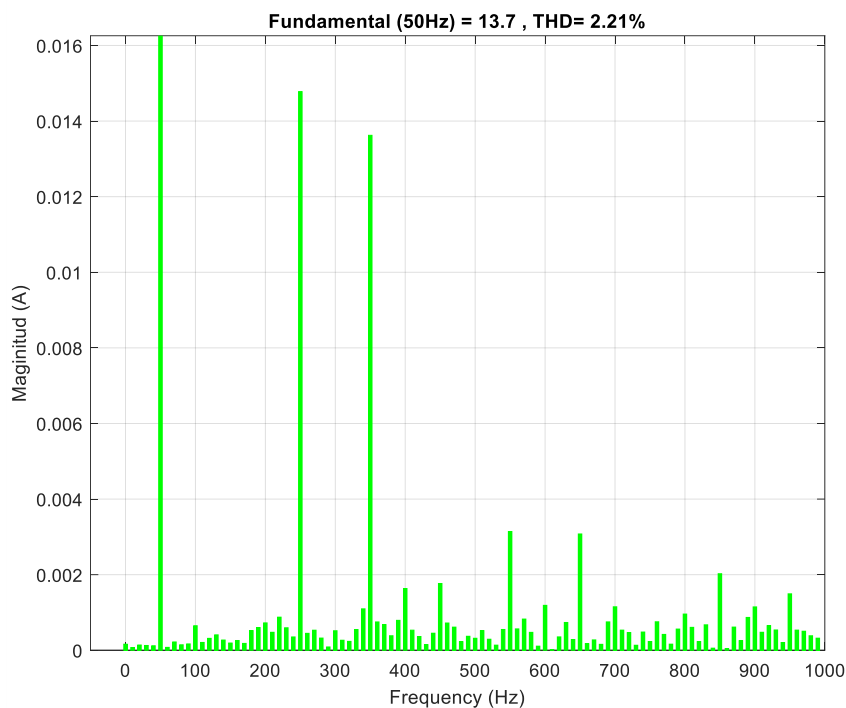


Figura 7.25 Espectro Armónico Corrientes de Línea del Sistema Emulador para Banco de Batería Porsche Taycan 800 V

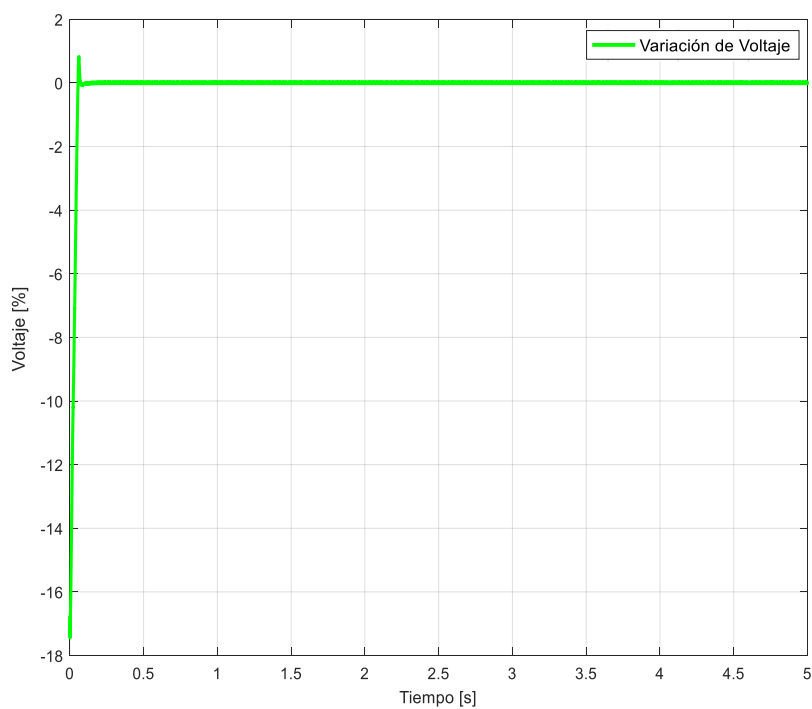


Figura 7.26 Variación Entre los Voltajes, Sistema Emulador Batería Litio-Ion y Referencia Matlab, Porsche Taycan 800 V

7.4.2 Prueba Impacto de Carga Batería de 800 V

Ahora se aplica a los 0.6 segundos un impacto de carga al sistema, incorporando una resistencia en paralelo de 200 Ω . Obteniendo los siguientes resultados.

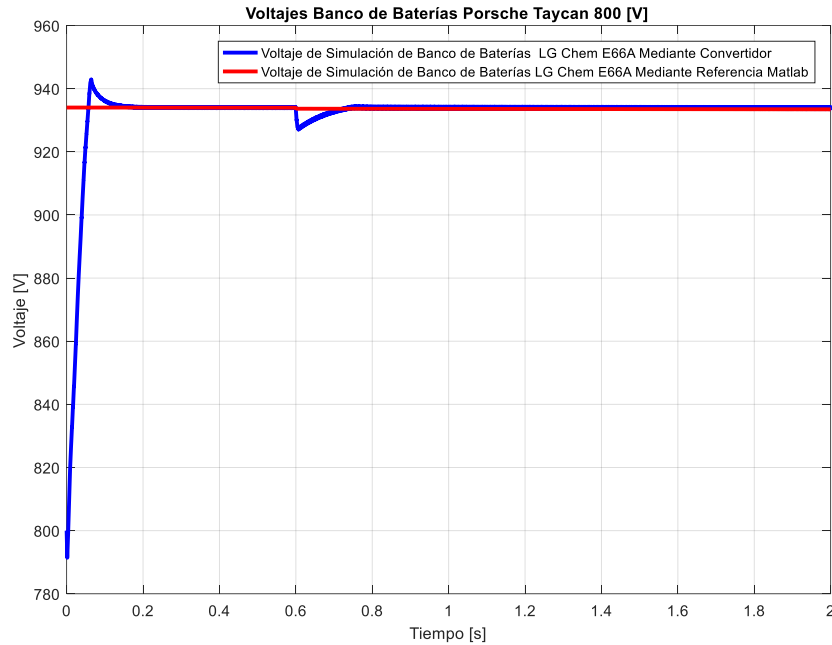


Figura 7.27 Banco de Batería Porsche Taycan 800 V, Impacto de Carga

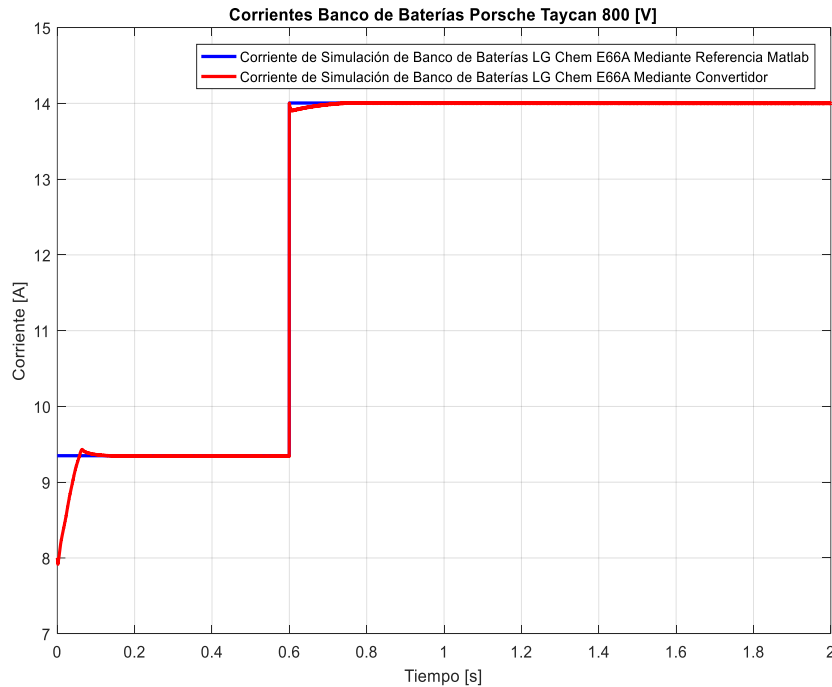


Figura 7.28 Corrientes Banco de Batería Porsche Taycan 800 V, Impacto de Carga

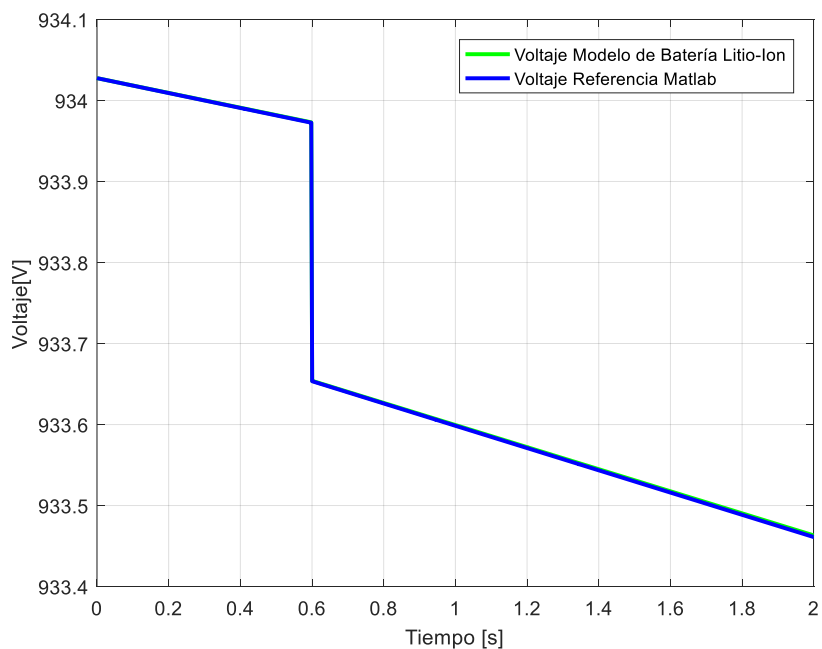


Figura 7.29 Voltajes Modelo Batería Litio-Ion y Referencia Matlab, Porsche Taycan 800 V

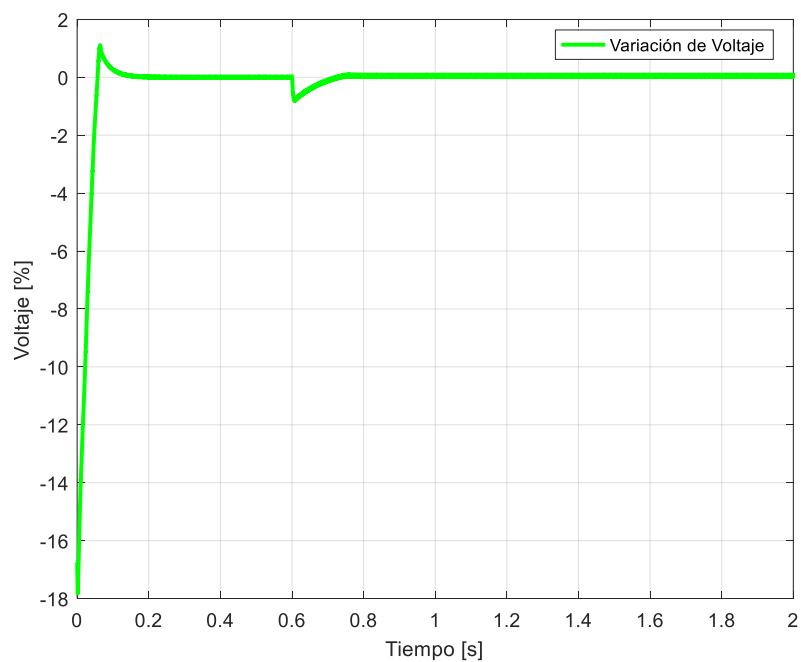


Figura 7.30 Variación Entre los Voltajes, Sistema Emulador para Baterías de Litio y Referencia Matlab, Banco de Batería Porsche Taycan 800 V, Impacto de Carga

7.4.3 Prueba Impacto de Carga Máximo Batería 800 V

En esta prueba, se logra ejecutar el máximo impacto de carga que puede operar el Sistema Emulador para Baterías de Litio, con las condiciones de diseño ya establecidas anteriormente para los controladores, los parámetros a considerar en esta prueba se muestran en la siguiente Tabla 7.12.

Tabla 7.12. Parámetros del Sistema, Impacto de Carga Máximo Banco de Batería Porsche Taycan 800 V

Parámetro	Valor
Voltaje de Fase (V_s)	390 [$V_{m,L-N}$]
Frecuencia de Red (f_s)	50 [Hz]
r_s	0.2 [Ω]
L_s	45 [mH]
R_L	100 [Ω]
R_{L2}	85 [Ω]
C_{dc}	3000 [μ F]
Frecuencia Portadora f_{tri}	2500 [Hz]
Tiempo de Muestreo Simulación	1 [μ s]

La resistencia equivalente entre las dos resistencias de carga R_L y la generada por el impacto de carga en el sistema R_{L2} , es el siguiente:

$$R_{eq} = \frac{R_L \cdot R_{L2}}{R_L + R_{L2}} = 45.945 \Omega \quad (7.18)$$

Por lo tanto, la potencia entregada por el sistema ante un máximo impacto de carga es:

$$P_{m\acute{a}x} = V_{banco} \cdot I_d = 19 \text{ kW} \quad (7.19)$$

La corriente de saturación del controlador de tensión, se incrementa un 38.8 % de la corriente de eje directo d máxima de impacto.

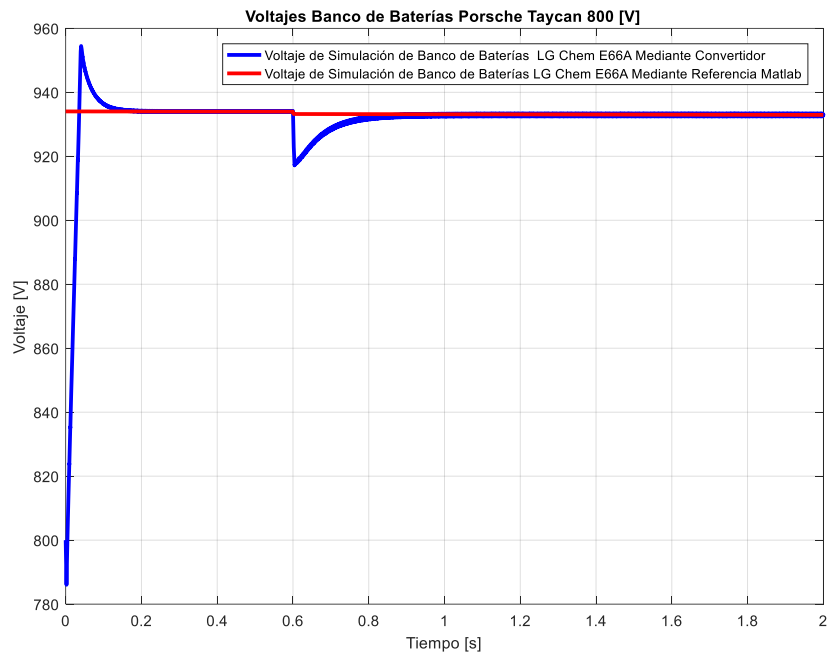


Figura 7.31 Banco de Batería Porsche Taycan 800 V, Máximo Impacto de Carga

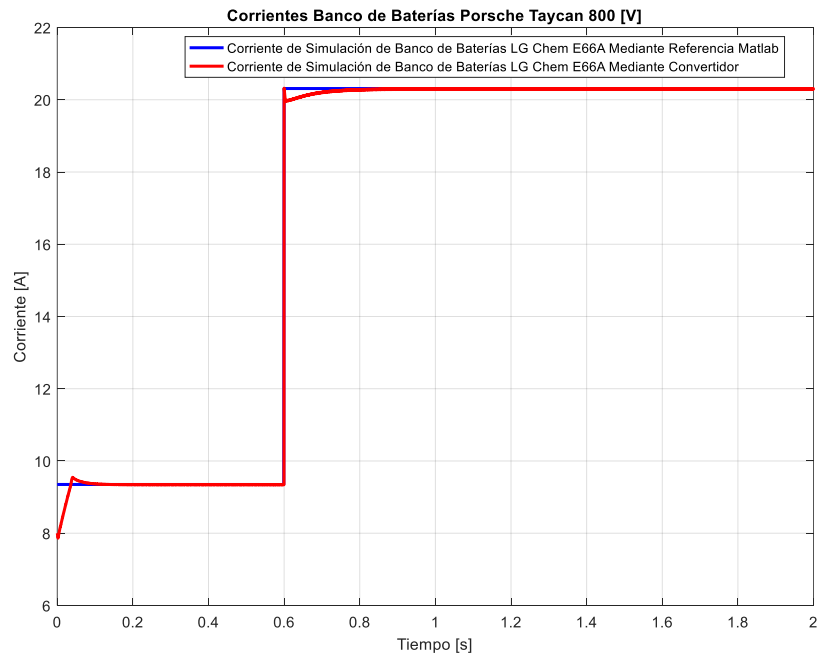
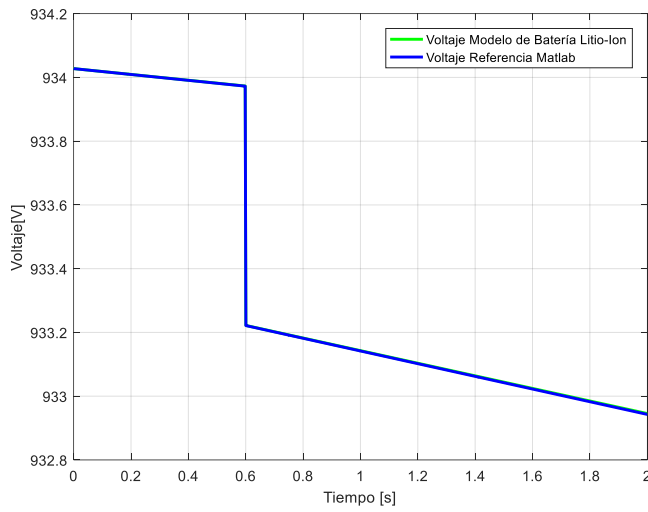
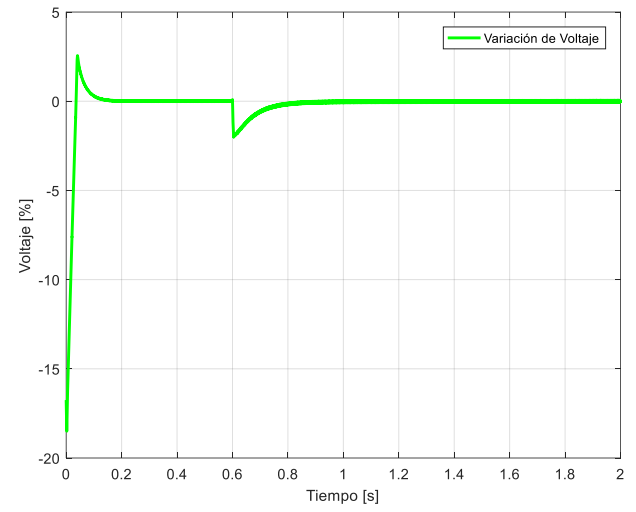


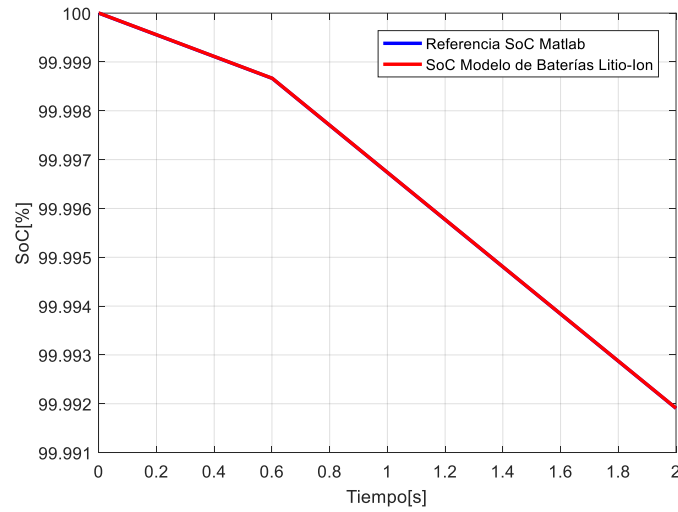
Figura 7.32 Corrientes Banco de Batería Porsche Taycan 800 V, Máximo Impacto de Carga



(a)



(b)



(c)

Figura 7.33 Voltajes y Estado de Carga Modelo Batería Litio-Ion y Referencia Matlab Banco de Baterías Porsche Taycan 800 V, Máximo Impacto de Carga

(a) Voltaje de la Referencia Mediante la Batería de Matlab y Voltaje Modelo de Batería Litio-Ion, (b) Variación Entre los Voltajes, Sistema Emulador para Baterías de Litio y Referencia Matlab, (c) Medidor SoC entre la Referencia de Matlab y Modelo de Baterías.

El Sistema Emulador para Baterías de Litio logra replicar las descargas del banco de litio para el EV Porsche Taycan de 800V con una capacidad de corriente nominal de 116.8 Ah que opera a una corriente de descarga nominal de 116.8 A durante una hora con una carga resistiva de 6.85Ω . Se prueba con una carga nominal aleatoria de 100Ω , luego con el voltaje nominal y la carga resistiva mediante ley de Ohm se consigue la corriente de descarga de 8 A, por lo tanto, la batería puede operar por más de una hora ya que la carga tiene una resistencia mayor a la nominal, suministrando una potencia hacia la carga de 6.4 kW. En la Figura 7.23, se ilustra las señales representan los voltajes de descarga de la referencia de Matlab y del Sistema Emulador en su enlace DC, al iniciar la simulación el comportamiento dinámico tiende al seguimiento de la referencia, hasta que aproximadamente alcanza la consigna antes de los 0.2 s exitosamente mediante el diseño del lazo de control, como se puede observar en la Figura 7.26, la variación de voltaje entre la referencia de Matlab y del Sistema Emulador alcanza un valor de 0 % en estado estacionario.

En la Figura 7.24, se ilustra la corriente de descarga del Sistema Emulador, de esta última presenta un seguimiento exitoso de la referencia de Matlab, el comportamiento dinámico de las corrientes de descarga en su inicio es mayor en magnitud durante los cinco segundos de simulación, avanzado el tiempo su dinámica cambia hasta alcanzar su valor nominal de corriente conforme a la descarga de voltaje inherente de la batería de litio. El Sistema Emulador con los parámetros implementados en la Tabla 7.9, consigue una distorsión armónica de corrientes de línea en el lado AC de 2.21 % como se ilustra en la Figura 7.25, siendo el quinto y séptimo los armónicos más preponderantes en la banda de baja frecuencia generados por los interruptores de potencia del convertidor originando armónicos impares del orden $6n \pm 1$, con n un entero positivo.

En la prueba de impacto para el banco de baterías para el EV Porsche Taycan, consiste en agregar una resistencia aleatoria en paralelo de 200Ω , consiguiendo una resistencia equivalente de 66.6Ω que demanda una corriente de 12 A, suministrando una potencia de 9.6 kW. Los controladores PI en conexión en cascada logran un seguimiento exitoso de la referencia de descarga de Matlab aproximadamente antes de los 0.2 s, luego se aplica el impacto de carga, como se ilustra en la Figura 7.27, luego se aplica el impacto de carga a los 0.6 s, ocasionando que el capacitor del Sistema Emulador se descargue, pero la dinámica del lazo restablece el control en un tiempo aproximado de 0.75 s, volviendo a obtener un valor de error cero en estado estacionario, como se ilustra en la Figura 7.30, donde la corriente del Sistema Emulador tiene el mismo comportamiento en estado estacionario con su referencia, y al producirse el impacto, la corriente aumenta aproximadamente de 1.5 veces en comparación a la carga inicial.

En la Figura 7.29, se ilustra en detalle las dinámicas de la referencia de Matlab y del Modelo de Batería Litio-Ion del Sistema Emulador, ambas señales obtienen respuestas similares durante los 2 segundos de la simulación del banco. Como la potencia entregada por la batería es de 9.6 kW luego del impacto, según los parámetros nominales de este BESS tiene la capacidad de proporcionar una energía de 93.4 kWh, es decir, entrega 93.4 kW en una hora de descarga. En consecuencia, esta batería opera por más de una hora ya que suministra una potencia menor a la nominal.

En la prueba de máximo impacto de carga para la simulación del banco del EV Porsche Taycan 800 V, se utilizan dos resistencias aleatorias en este escenario, para observar hasta donde es capaz de operar adecuadamente el lazo de control diseñado. En la Figura 7.31, se muestra como el capacitor del Sistema Emulador empieza a cargarse para seguir la referencia del voltaje de Matlab, este impacto ilustra en la Figura 7.33 (a), en donde se encuentran los voltajes de descarga tanto de la referencia de Matlab como el Modelo de Batería Litio-Ion del Sistema Emulador, ambas señales son similares en su dinámica durante los 2 s de simulación del banco. El cambio de carga en la Figura 7.32, produjo un aumento aproximado de 2.26 veces en la demanda de corriente en comparación a la entregada a la carga inicial, este impacto genera una resistencia de carga equivalente de 45.9Ω a una corriente de 17.4 A, como la potencia es igual al voltaje multiplicado por la corriente, es decir, la batería suministra una potencia de 13.9 kW. En consecuencia, el banco de baterías entrega esta potencia por más de una hora, pero tiene menor carga eléctrica para suministrar que la prueba anterior de impacto de carga.

Además, en la Figura 7.33 (b), la prueba de máximo impacto de carga alcanza en la descarga de voltaje entre la referencia de Matlab y del Sistema Emulador un error de 0 % en estado estacionario. En la Figura 7.33 (c), se observa el medidor de estado de carga del escenario propuesto para el banco de baterías del EV Porsche Taycan 800 V ante un impacto de carga a los 0.6 s de simulación, ambas señales son similares en su dinámica cuya variación entre los SoC corresponde a un valor ínfimo que está relacionada con la resistencia, y el impacto de carga provoca una disminución de electricidad en la batería producto de la demanda de corriente que suministra hacia la carga resistiva.

7.5. Análisis de Resultados

Las baterías de litio son indispensables para los sistemas eléctricos modernos, es por esto que el desarrollo del Sistema Emulador impulsa a conocer el comportamiento dinámico en la descarga en cualquier sistema eléctrico donde sean capaces de suplir demandas de energía en su operación, permitiendo sustituir las baterías reales para la realización de pruebas y conocer cual ofrece las prestaciones apropiadas para la correcta operación del sistema eléctrico. Se logran replicar tres tipos de baterías que se utilizan en modernos sistemas eléctricos, tales como la batería Powerwall Tesla de 100 V para sistemas eléctricos domiciliarios y las baterías para electromovilidad del EV Tesla S 400 V y el EV Porsche Taycan 800 V. Posteriormente, se muestra en la Tabla 7.13 los resultados de las pruebas nominales, en la Tabla 7.14 los resultados de pruebas de impacto, y en la Tabla 7.15 los resultados de máximo impacto.

Tabla 7.13. Prueba Nominal

Parámetro	Batería de 100 V	Batería de 400 V	Batería de 800 V
Resistencia de Carga	30 Ω	95 Ω	100 Ω
Corriente de Descarga	3.3 A	4.2 A	8 A
Potencia	330 W	1.68 kW	6.4 kW

Tabla 7.14. Prueba Impacto de Carga

Parámetro	Batería de 100 V	Batería de 400 V	Batería de 800 V
Resistencia Equivalente	21.5 Ω	68.8 Ω	66.6 Ω
Corriente de Descarga	4.65 A	5.8 A	12 A
Potencia	465 W	2.3 kW	9.6 kW

Tabla 7.15. Prueba Máximo Impacto de Carga

Parámetro	Batería de 100 V	Batería de 400 V	Batería de 800 V
Resistencia Equivalente	10.93 Ω	37.5 Ω	45.9 Ω
Corriente de Descarga	9.15 A	10.6 A	17.4 A
Potencia	915 W	4.2 kW	13.9 kW

De los resultados presentados anteriormente, se analizan distintas prestaciones a las que se someten los bancos de baterías simulados mediante el Sistema Emulador que logra alcanzar la referencia de Matlab en todas las pruebas. De la batería Powerwall 2 AC Tesla 100 V se presenta ante diversos tipos de consumo eléctricos. Sin embargo, la batería no alcanza a ofrecer sus condiciones nominales de operación.

Este BESS domiciliario es útil para suministrar energía y cubrir determinadas aplicaciones operando como unidad de respaldo, ofreciendo una acción continua de suministro eléctrico y variadas tasas de descarga como en estas pruebas que fueron menores a 1C, que operan por más de una hora debido que el suministro de potencia hacia la carga es menor a la nominal del banco.

Mediante un análisis comparativo entre los dos BESS para electromovilidad, la batería de 400 V para el EV Tesla S y la batería de 800 V para el EV Porsche Taycan, es fundamental para conocer cómo se comporta los BESS ante los requerimientos en la dinámica de los sistemas eléctricos para los EV, estos deben ofrecer mayor autonomía, eficiencia y peso más ligero.

La batería para el EV Tesla S de 400 V y para el EV Porsche Taycan ofrecen sus prestaciones de descarga durante las tres pruebas ejecutadas, y cabe señalar que las baterías suministraron potencias menores a la nominal, por lo tanto, sus tasas de descarga fueron menores a 1C alcanzando condiciones de operación por más de una hora. De la Tabla 7.13 y 7.14, ambas baterías presentan resistencias de carga similares pero el suministro de potencia es distinto, para el EV Tesla de 400 V entrega una potencia menor a las prestaciones del EV Porsche Taycan 800 V, esto comprende que la batería de 400 V puede entregar mayores descargas de corriente durante más tiempo, debido a su mayor capacidad y menores resistencias de carga en la operación, debido a la arquitectura de 400 V en la batería, logrando ofrecer una mayor autonomía a la aplicación. La batería del EV Porsche Taycan 800V opera con mayores resistencias de carga debido al incremento de tensión de la batería, pero reduce la intensidad de corriente ofreciendo la misma potencia hacia la carga que una la batería de 400 V, pero esta última aumenta su intensidad de corriente. Es decir, si la carga necesita una potencia de 90 kW, en virtud de la ecuación de la potencia que es igual al voltaje multiplicado por corriente se obtiene una corriente reducida para la batería de alto voltaje de 800 V, esto ofrece a la aplicación tener un sistema eléctrico con conductores de menor sección transversal para así aportar en disminuir pérdidas resistivas y reducir el peso del EV.

El Sistema Emulador de Descarga para Baterías de Litio replicó tres tipos de arquitecturas de baterías a distintos tipos de escenarios en descarga, ofreciendo prestaciones versátiles para la simulación de dinámicas de descargas.

Capítulo 8. Conclusiones

8.1. Sumario

En este trabajo se realizó una revisión de los tipos de modelo que sirven para caracterizar una batería de litio real, este análisis se llevó a cabo con el fin de determinar la mejor alternativa para sustentar el Modelo de Baterías Litio-Ion que será la referencia de control para el Sistema Emulador de descarga, se utiliza del contador de Coulomb para calcular el estado de carga de la batería y las características de operación similares al propuesto por el software de simulación Matlab, se tomó la determinación de optar por el modelo de Thevenin-Shepherd para caracterizar la dinámica de descarga de una batería de litio.

Posterior a los descrito anteriormente, cabe señalar que el estudio de las ecuaciones del modelo de Thevenin-Shepherd y el cálculo de parámetros, hacen posible conseguir los voltajes de descarga de tres celdas de litio reales, cuya producción está destinada para sistemas de almacenamientos de energía domiciliarios y para la industria automotriz. El modelo fue capaz de replicar las dinámicas de descarga con errores mínimos en comparación con la referencia de Matlab, sometiendo el comportamiento dinámico de las celdas a distintos escenarios de prueba.

Es preciso mencionar que luego del análisis de las simulaciones del Modelo de Batería Litio-Ion, se llevó a cabo el estudio del convertidor fuente de voltaje de dos niveles, este dispositivo de electrónica de potencia se utilizó para sustentar el Sistema Emulador de Descarga, para esto se comprendió el análisis matemático que rigen el comportamiento del convertidor que contienen el sistema alterno y continuo, con el fin de poder diseñar el control del convertidor para aplicar la referencia del Modelo de Batería Litio-Ion, y que el Sistema Emulador de Descarga sea capaz de seguir la consigna de control para replicar las descargas de bancos de batería mediante las celdas de litio propuestas.

En el último capítulo de este trabajo, se simularon las descargas de tres bancos de baterías que se sometieron a distintos escenarios de carga, y se logró comprobar que el diseño de control del convertidor tuvo un seguimiento exitoso de la referencia de Matlab, ya que el enlace DC del Sistema Emulador pudo replicar la descarga de bancos de batería reales.

8.2. Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo.

- Se planteó el estudio del Modelo de Baterías Litio-Ion, que se basa en el modelo de Thevenin-Shepherd, que inicialmente se logra la estimación del estado de carga mediante la integración de corriente de descarga, utilizando el método contador de Coulomb. La variación entre las señales de SoC entre la referencia de Matlab y del Modelo de Batería Litio-Ion son valores ínfimos y depende de la resistencia de carga.
- Los parámetros de la ecuación de voltaje de circuito abierto del modelo Thevenin-Shepherd son obtenidos de la curva de descarga real con una tasa de carga/descarga de 1C para mejorar la precisión que se consiguen los parámetros, se podrá obtener una respuesta adecuada de voltaje ante los escenarios de carga que se someten las celdas a estudiar.
- El Modelo de Baterías Litio-Ion, no toma en consideración efectos térmicos en comparación con la referencia del modelo de batería de Matlab, tampoco considera efectos de salud. Este modelo ofrece comportamiento eléctrico de una batería de litio.
- En la dinámica de descarga de tensión ambas señales tanto la referencia de Matlab y el Modelo de Batería Litio-Ion, presentan una variación mínima en la simulación de las celdas de litio, sin embargo, este error es provocado por el efecto de temperatura que contiene el modelo de referencia de Matlab, pero se mitiga el efecto según la capacidad de corriente que puede ser extraída de la celda o banco de baterías, si la capacidad es mayor, la variación será menor entre la descarga de voltaje de la referencia de Matlab y del Modelo de Batería Litio-Ion.
- El convertidor fuente de voltaje trifásico dos niveles, ofrece las prestaciones necesarias para la emulación de descarga de voltaje de un banco de litio que entrega el Modelo de Batería Litio-Ion como referencia, cuya representación del sistema se presenta en la Figura 2.5, para su funcionamiento se necesitó conocer sobre transformación de coordenadas de Park y Clarke, seguimiento de fase, modulación y lazos de control mediante controladores PI.

- El método de control en ejes dq es una estrategia apropiada para el control en conexión en cascada (voltaje-corriente), se sintoniza al convertidor del Sistema Emulador con controladores PI, cuyo diseño se realiza para conocer el comportamiento de tres baterías de litio con distintas arquitecturas de tensión. El sistema de control responde de manera adecuada al seguimiento y ante impactos de carga en el Modelo de Baterías Litio-Ion, que se usa de referencia de control.
- Se logra replicar la dinámica de descarga de tres arquitecturas de baterías de litio, gracias al desarrollo del lazo de control del Sistema Emulador de Baterías, este logra el seguimiento correcto del Modelo de Baterías Litio-Ion en el voltaje DC y restablece la respuesta ante impactos de carga por la acción de control. Se garantiza ante los perfiles de descarga que se utilizaron para validar los resultados obtenidos, que los tres bancos de baterías simulados obtienen una variación de voltaje de un 0 % en estado estacionario con la referencia del Modelo de Baterías Litio-Ion, la respuesta de este último es similar a la respuesta de Matlab ya que tienen una variación mínima de voltaje entre sí, en consecuencia, de la alta capacidad de corriente de los bancos en comparación con las celdas de litio.

8.3. Trabajo Futuro

Realización del montaje el Sistema Emulador para Baterías de Litio e implementar al Modelo de Litio-Ion, la dinámica de carga, parámetros térmicos y de salud que ayuden a aumentar las prestaciones y la precisión del modelo.

Bibliografía

- [1] Y. Wu. “Non-Invasive Aging Detection Methods of Lithium-Ion Batteries”, Título Académico Doctorado en Ingeniería, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Technische Universität München, Múnich, 5 – 19, 2018.
- [2] Fundamentals and Application of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles – J. Jiang, C. Zhang – Wiley, 2015.
- [3] R. Arunachala. “Influence of Cell Size on Performance and Lifetime of Lithium-ion Batteries”, Título Académico Doctorado en Ingeniería, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, Múnich, 29 – 31, 2017.
- [4] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeus, P. Le Moigne (2013), “Li-Ion Battery Emulator for Electric Vehicle Applications” in IEEE Vehicle Power and propulsion Conference.
- [5] R. Hidalgo León, “Simulación de Emulador de Descarga para Baterías Litio-Ion Basado en Circuitos Equivalentes Eléctricos Obtenidos con las Técnicas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica y Extracción de Parámetros en el Dominio del Tiempo,” Tesis Grado Magister en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2017.
- [6] O. Tremblay, L. Dessaint, A. Dekkiche (2012), “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles”, in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.
- [7] C. Burgos Mellado, “Estimación del Estado de Carga para un Banco de Baterías Basado en Modelación Difusa y Filtro Extendido de Kalman,” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Electricista y Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2013.
- [8] N. Rebolledo Ruiz. “Balance de SOCs de Baterías por Medio del MMSPC con Transferencia de Energía del Tipo Inductor Conmutado”, Habilitación Profesional para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico, Departamento de Medio Ambiente y Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, 28:71–72, 2019.

- [9] H. Ferreira Estrada, “Convertidor de Potencia Parcial Bidireccional para Sistema de Almacenamiento Híbrido de Vehículo Eléctrico” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Electrónico y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso. 2021.
- [10] Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications – A. Yazdani, R. Iravani – IEEE Press/ Wiley, 2010.
- [11] M. Pérez, R. Lizana Fuentes, J. Rodríguez, “Predictive Control of DC-Link Voltage in an Active-Front-End Rectifier” in IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2011.
- [12] PID and Predictive Control of Electrical Drives and Power Converters Using Matlab Simulink – L. Wang, S. Chai, D. Yoo, L. Gan, K. Ng. – 1st edition Wiley IEEE Press, 2015.
- [13] A. Thapa, M Sudhan Chinthavali, “Dynamic Model of Active Front-End Converters with 2DOF-PI Controllers for DC Bus Voltage Control” Electrical Energy System Integration Group, Oak Ridge National Lab, IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2020.
- [14] High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids – D. Jovcic – 2nd Edition Wiley, 2020.
- [15] J. Osorio Paveri, “Implementación Experimental de Sistema de Carga Rotatoria con Control de Torque y Capacidad de Regeneración” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Electricista, Universidad Técnica Federico Santa María. Santiago de Chile. 2018.
- [16] G. Cruz Pinto, “Desarrollo de un Sistema de Almacenamiento de Baterías con Conexión Flexible a Micro Redes” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2018.
- [17] D. Lee, G. Lee, K. Lee (2000), “DC-Bus Voltage Control of Three-Phase AC/DC PWM Converters Using Feedback Linearization” in IEEE Transactions on Industry Applications.
- [18] M. Merai, M. Wissem Naouar, S. Belkhodja, (2017), “An Improved DC-Link Voltage Control Strategy for Grid Connected Converters” in IEEE Transactions on Power Electronics.

- [19] C. Mendoza Robles, “Enlaces HVDC-VSC para Otorgar Flexibilidad y Mejorar la Respuesta Dinámica en Interconexiones Regionales,” Tesis Grado Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2018.
- [20] J. Boles, Y. Ma, W. Cao, L. Tolbert, F. Wang, “Battery Energy Storage Emulation in a Converter-Based Power System Emulation”, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC, 2017.
- [21] S. Martínez Lizana, “Análisis de Sistemas de Transmisión VSC-HVDC en Condición de Contingencia DC” Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, 2019.
- [22] M. Michalczyk, L. M Grzesiak, and B. Ufnalski. “Experimental Parameter Identification of Battery-Ultracapacitor Energy Storage System”. in IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pages 1260–1265. 2015.
- [23] S. Thale, R. Wandhare, and V. Agarwal. “A Novel Low-Cost Portable Integrated Solar PV, Fuel Cell and Battery Emulator with Fast Tracking Algorithm”. In Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th, pages 3138–3143, June 2014.
- [24] T Richard Jow, Kang Xu, Oleg Borodin, Ue Makoto. “Electrolytes for Lithium and Lithium-Ion Batteries”– Springer, 2014.
- [25] K. Ozawa, “Lithium-Ion Rechargeable Batteries: Materials, Technology, and New Applications”. – Wiley, 2012.
- [26] S.S. Zhang, “A Review on the Separators of Liquid Electrolyte Li-Ion Batteries”, Journal of Power Sources 164, 351-364, 2007.
- [27] Power Electronics. Circuit Analysis and Desing. – I. Batarseh, A. Harb, ed. Springer, 2018.
- [28] I. Polanco Lobos, “Diseño e Implementación de un Controlador de Potencia para Tracción y Conexión V2μG de un Vehículo Eléctrico Utilitario” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Electricista y Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Eléctrica. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2014.

- [29] M. Sánchez Yáñez, “Estudio y Simulación de Convertidores Modulares Multinivel” Tesis para optar al Título de Ingeniería Civil Eléctrico. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso. 2019.
- [30] A. Pérez Ramos, E. Martínez Aragón, S. Villarreal Reyes, “Baterías que Dan Vida a un Nanosatélite”, *Revista Ciencia*, 35–36, 2020.
- [31] M. Molina, “Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid”, Article in *Proceedings of the IEEE*, 2017.
- [32] J. Gomez Aravire, “Análisis de las Modulaciones SPWM y SHE en Convertidores Fuente de Corriente Multinivel y Control de Corriente DC” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Electrónico. Universidad de Concepción, Concepción. 2014.
- [33] Reijedo, F. D., Doval-Gandoy, J., Lopez, O., & Acha, E. “Tuning of Phase-Locked Loops for Power Converters Under Distorted Utility Conditions”. in *IEEE Transactions on Industry Applications* 2009
- [34] Power Electronic – W. Hart Daniel – 1st edition Mc Graw-Hill, 2010.
- [35] Goodenough, “Electrochemical Energy Storage in a Sustainable Modern Society”, in *The Royal Society of Chemistry*, 2014.
- [36] P. Roy, S.K. Srivastava, “Nanostructured Anode Materials for Lithium-Ion Batteries”, *Journal of Materials Chemistry A* 00, 1-27, 2014.
- [37] K. Divya and J. Østergaard. “Battery Energy Storage Technology for Power Systems an Overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4):511–520, 2009.
- [38] N. Ferry, S. Ducloyer, N. Julien, D. Jutel. “Fast Electrical Battery Model Builder for Embedded Systems”. In *Faible Tension Faible Consommation (FTFC)*, 2011.
- [39] S. Thanagasundram, R. Arumachala, K. Makinejad, T. Teutsch, A. Jossen (2012). “A Cell Level Model for Battery Simulation,” *European Electric Vehicle Congress*, Technische Universität München, München. 2012.
- [40] R. Cárdenas Dobson, “Sistemas de Segundo Orden” Apuntes del Curso de Control Automático, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, 2012.

- [41] R. Marom, S.F. Amalraj, N. Leifer, D. Jacob, D. Aurbach, A Review of Advanced and Practical Lithium Battery Materials, *Journal of Materials Chemistry* 21, 2011
- [42] J. Warner, *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design Chemistry, Components*, 2015.
- [43] P. B. Balbuena and Y. Wang. Lithium-Ion batteries. “Solid-Electrolyte Interphase”, 2004.
- [44] A. Thanheiser, T.P. Kohler, C. Bertram, and H. Herzog. Battery emulation considering thermal behavior. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011 IEEE, Sept 2011.
- [45] C. Hernández Carimán, “Control de un Filtro Activo Paralelo Basado en un Conversor Fuente de Voltaje de 4-Piernas Aplicado a Sistemas de Distribución de 4-Hilos” Tesis Grado Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile. 2016.
- [46] C. Torrealba Orellana, “Estudio Comparativo de Batería de Ion-Litio y Celdas de Combustible Regenerativas como Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica en una Planta Fotovoltaica del Norte de Chile” Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Químico, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile. 2020.
- [47] Electromagnetismo – Joseph A. Edminister – Shaum – 2013.
- [48] F. Dupouy Cortés, “Metodologías para la Evaluación Caracterización y Reutilización de Baterías de Litio en Formato 18650 para Aplicaciones de Segunda Vida” Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile. 2021.
- [49] Dennis W Dees, Vincent S Battaglia, and André Bélanger. Electrochemical Modeling of Lithium Polymer Batteries. *Journal of Power Sources*, 110(2):310-320, 2002.
- [50] *Electric Vehicles: Modern Technologies and Trends* – N. Patel, A. Kumar Bhoi, S. Padmanaban, J. B. Holm-Nielsen – Springer – 2021.

Anexo A. Cálculo de Parámetros Banco de Baterías

Para el cálculo de un banco de baterías se debe conocer los parámetros de voltaje nominal y capacidad de corriente de la celda que está constituida el banco. Luego se calcula el número de celdas en serie que se necesita para el diseño del banco, y conseguir el voltaje nominal de este.

$$N_s = \frac{V_{nom,banco}}{V_{nom,celda}} \quad (A.1)$$

Para el cálculo del número de caldas en paralelo necesarias para obtener la capacidad de corriente del banco de baterías se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$N_p = \frac{Q_{banco}}{Q_{celda}} \quad (A.2)$$

La capacidad de energía para del banco de baterías se calcula mediante la siguiente expresión.

$$E_{banco} = V_{nom,banco} \cdot Q_{banco} \quad (A.3)$$

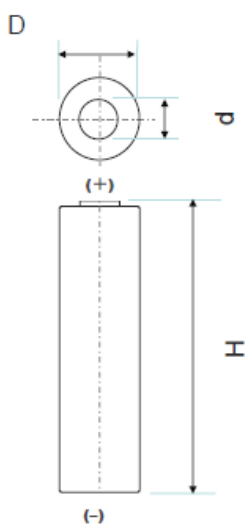
Finalmente, el número total de celdas de baterías es el siguiente.

$$N_T = N_s \cdot N_p \quad (A.4)$$

Anexo B. Datos Técnicos

B.1. CLI Panasonic NCR20700A

Specifications for NCR20700A

Specifications			Dimensions		
Rated capacity ⁽¹⁾		3100mAh			
Capacity ⁽²⁾	Minimum	3150mAh			
	Typical	3300mAh			
Nominal voltage		3.6V			
Charging	Method	CC-CV			
	Voltage	4.20V			
	Current	Std. 2200mA			
	Time	Std. 180min.			
Weight (max.)		60.0g			
Temperature	Charge	10 to +45° C			
	Discharge	-20 to +60° C			
	Storage	-20 to +50° C			
Energy density ⁽³⁾	Volumetric	512 Wh/l	With tube	H	Max. 70.3mm
	Gravimetric	192 Wh/kg		D	Max. 20.35mm
d				Max. 10.5mm	

⁽¹⁾ At 20° C ⁽²⁾ At 25° C
⁽³⁾ Energy density is calculated using bare cell dimensions (without tube).

When designing a pack, refer to the cell's mechanical drawing for precise dimensions.

<Remark> These values are not guaranteed values.



Figura B.1. Datos Técnicos CLI Panasonic NCR20700A

B.2. CLI Panasonic NCR18650PF

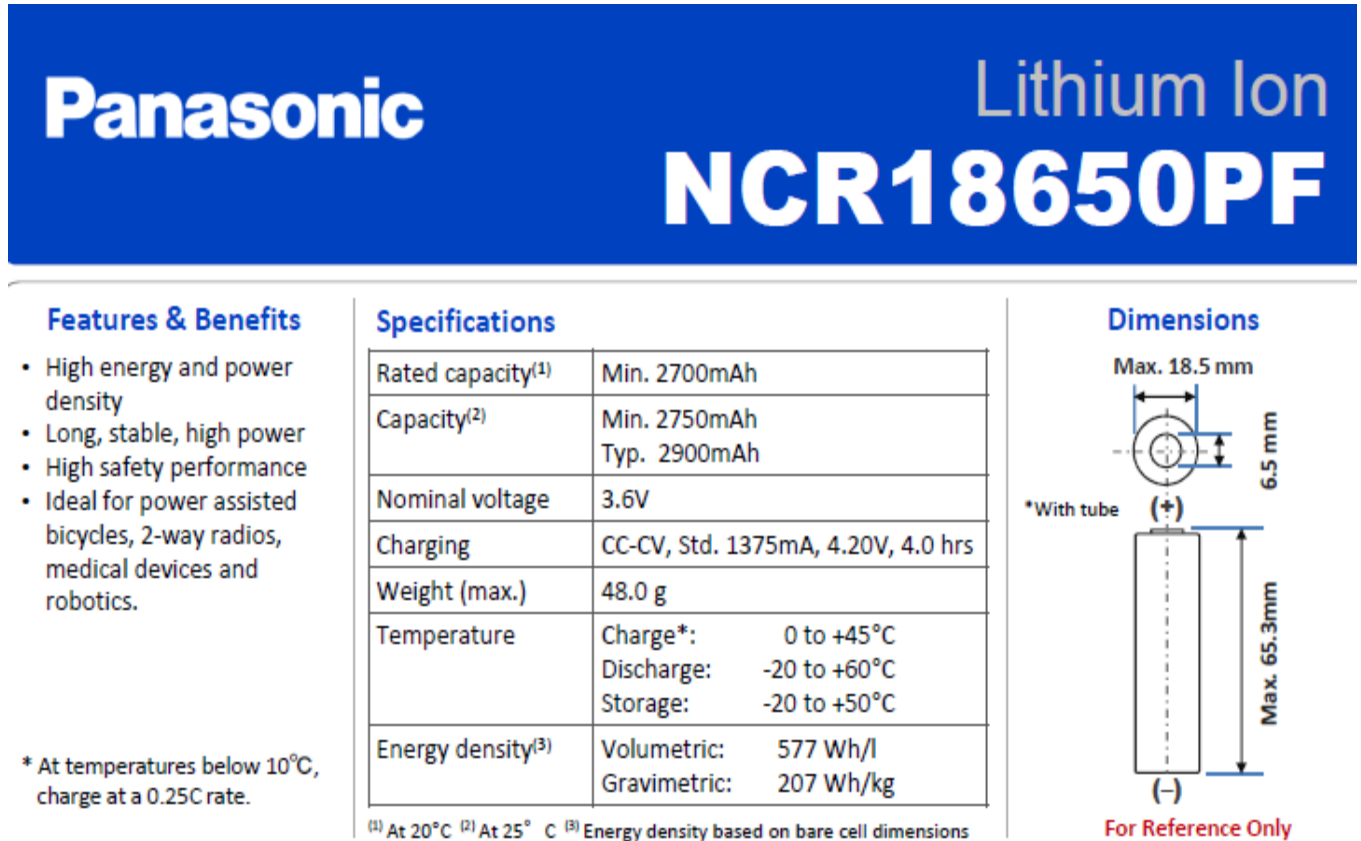


Figura B.2. CLI Panasonic NCR18650PF

B.3. CLI LG Chem E66A

Los datos técnicos de la CLI LG Chem E66A, se obtuvieron de la empresa alemana Batemo, especializada en software de simulación de alta precisión para baterías de litio.

Tabla B.3. Especificaciones Técnicas CLI LG Chem E66A

Parámetros	Valor
Capacidad Nominal	65 [Ah]
Capacidad Mínima	63.5 [Ah]
Tensión Nominal	3.667 [V]
Energía Nominal	237.7 [Wh]
Espesor	11.7 [mm]
Ancho	104 [mm]
Altura	350 [mm]
Volumen	0.425880 [L]
Masa	867 [g]
Densidad de Energía Volumétrica	648 [Wh/L]
Densidad de Energía Gravimétrica	259 [Wh/kg]
Química	NCM 712