

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Leonardo Palma F.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Uso de almacenamiento de energía para mejorar la eficiencia de conversión de energía en sistemas FV-Electrolizador

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Leonardo Palma F.

Uso de almacenamiento de energía para mejorar la eficiencia de conversión de energía en sistemas FV-Electrolizador

Alejandro Nicolás Díaz Aedo

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Marzo 2023

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito la implementación de un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías para mejorar la eficiencia de conversión de energía en sistemas FV-Electrolizador. Para ello, primeramente, se caracterizan los requerimientos eléctricos del electrolizador y la generación fotovoltaica a lo largo del día, para lo cual se eligió la ubicación del proyecto minero “Quebrada Blanca Fase 2”, lugar con un alto potencial para la generación de hidrógeno verde al proveer de una gran planta desalinizadora.

En una primera etapa, se dimensionan y desarrollan los modelos matemáticos correspondientes al electrolizador y sistema de energización. En el sistema de energización se diseñan los convertidores que serán los encargados de dirigir el funcionamiento del sistema, para ello se implementan controladores PI que fueron sintonizados bajo criterios de ancho de banda y amortiguamiento. Y para conectar el electrolizador (carga) al sistema de energización, se diseña un convertidor capaz de aislar y mantener al electrolizador trabajando en su punto óptimo, para ello se implementa un control en cascada. Adicionalmente, se incorpora un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia a fin de obtener un perfil de generación PV optimizado.

El sistema diseñado fue modelado en Matlab para evaluar su desempeño ante diferentes condiciones de operación.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que efectivamente el sistema FV-Electrolizador mejora sustancialmente su rendimiento al agregar un sistema de almacenamiento mediante baterías, ya que permite que el electrolizador trabaje en su punto óptimo durante todo el tiempo en que se encuentra operativo. Además, gracias a la implementación de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, se permite mejorar la eficiencia energética del arreglo FV a lo largo del día, lo cual también mejora el rendimiento en general del sistema propuesto.

*A mi familia, mis amigos
y
sobre todo, a Dios.*



Agradecimientos

A mi familia que siempre me ha apoyado en mi situación personal y educativa, que buscaban siempre mi bienestar para que rindiera al cien por ciento en la universidad. En particular, quiero destacar a mi madre Anyela Aedo que siempre me apoyo y preocupo por mí, siendo un pilar fundamental en mi etapa universitaria, sin ella no habría podido conseguir nada de lo que he logrado hasta ahora.

A mis amigos que hice en la universidad, que hicieron que mi vida tanto dentro como fuera de la universidad fuera más a mena. En particular, quisiera destacar a mi amigo y colega Guillermo Contreras, con el cual compartí gran parte de mi proceso universitario, siendo siempre alguien de confianza para compartir y realizar las distintas actividades universitarias.

A mis amigos del liceo, que, aunque no tuvimos un contacto tan estrecho en este proceso universitario siempre encontrábamos un poco de tiempo para reunirnos y distraernos. Así que gracias, Matías, Nicolas e Ismael por sus buenas vibras y siempre estar ahí.

A la profesora Patricia Llanos, que fue de gran apoyo en mi proceso de práctica profesional, contestando siempre mis dudas, lo que logro aumentar mis conocimientos y aptitudes para ser un mejor profesional.

A mi compañero de práctica profesional José Salgado, con el cual gracias a su entusiasmo logramos grandes logros durante mi último año de carrera universitaria.

Finalmente, agradezco a mi profesor patrocinante, Leonardo Palma, por siempre estar disponible para contestar mis dudas, tanto en los ramos de carrera que asistí con él como para confeccionar un informe de memoria de título que este al nivel de un profesional egresado de la carrera de Ingeniería civil eléctrica de la Universidad de Concepción.

A todos ellos y sobre todo a Dios, muchas gracias.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XII
ABREVIACIONES.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
1.2. TRABAJOS PREVIOS	15
1.2.1 Características y modelos del electrolizador	15
1.2.2 Modelo Matemático Panel Solar Fotovoltaico.....	16
1.2.3 Modelo Matemático Convertidores DC-DC.....	16
1.2.4 Discusión	18
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO	19
1.5. OBJETIVOS	19
1.5.1 Objetivo General	19
1.5.2 Objetivos Específicos.....	19
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	19
1.7. TEMARIO Y METODOLOGÍA	20
CAPÍTULO 2. MODELO MATEMÁTICO ELECTROLIZADOR.....	21
2.1. INTRODUCCIÓN	21
2.2. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO CELDA ELECTROLIZADORA	21
2.3. DESCRIPCIÓN Y CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL ELECTROLIZADOR.....	23
2.3.1 Descripción del electrolizador.....	23
2.3.2 Curvas características del Electrolizador	23
2.3.3 Comparación curvas características del Electrolizador	25
CAPÍTULO 3. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA.....	26
3.1. INTRODUCCIÓN	26
3.2. SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA PROPUESTO	26
3.3. DIMENSIONAMIENTO DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO	27
3.4. DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE BATERÍAS	29
CAPÍTULO 4. ETAPAS DEL SISTEMA PROPUESTO	31
4.1. INTRODUCCIÓN	31
4.2. MÓDULO FOTOVOLTAICO	31
4.1.1 Modelo Matemático.....	31
4.1.2 Curvas Características.....	33
4.3. CONVERTIDOR BOOST/ARREGLO FV	35
4.3.1 Modelo del Convertidor.....	35
4.3.2 Diseño del Convertidor.....	37
4.3.3 Algoritmo MPPT.....	38
4.3.4 Esquema de Control	39
4.4. CONVERTIDOR BUCK-BOOST/BATERÍA.....	42
4.4.1 Modelo del Convertidor.....	42
4.4.2 Diseño del Convertidor.....	44
4.4.3 Esquema de Control	45
4.5. CONVERTIDOR BUCK-BOOST/CARGA	50
4.5.1 Modelo Matemático.....	50
4.5.2 Diseño del Convertidor.....	52
4.5.3 Esquema de Control	53

CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA	58
5.1. INTRODUCCIÓN	58
5.2. MODELO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA PROPUESTO	58
5.3. SIMULACIONES	59
5.3.1 Comportamiento del sistema propuesto en un ciclo diario de irradiación.....	59
5.3.2 Eventos de cambios en la Carga.....	62
5.3.3 Eventos de cambios en el Arreglo FV.....	69
5.3.4 Eventos de cambios en las Baterías.....	73
5.3.5 Discusión de resultados.....	77
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	78
6.1. SUMARIO	78
6.2. CONCLUSIONES.....	78
6.3. TRABAJO FUTURO.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXO A 84	
ANEXO A.1	84
ANEXO A.2	86
<i>Anexo A.2.1</i>	86
<i>Anexo A.2.2</i>	87
<i>Anexo A.2.3</i>	89
<i>Anexo A.2.4</i>	90
ANEXO A.3	90
<i>Anexo A.3.1</i>	90
<i>Anexo A.3.2</i>	91
<i>Anexo A.3.3</i>	93
ANEXO A.4	93
<i>Anexo A.4.1</i>	93
<i>Anexo A.4.2</i>	94
<i>Anexo A.4.3</i>	96
ANEXO A.5	96
ANEXO B: SISTEMA PROPUESTO CONSIDERANDO PÉRDIDAS	99
ANEXO B.1. INTRODUCCIÓN	99
ANEXO B.2. SIMULACIONES.....	100
<i>Anexo B.2.1. Eventos de cambios en la Carga</i>	100
<i>Anexo B.2.2. Eventos de cambios en el Arreglo FV</i>	107
<i>Anexo B.2.3. Eventos de cambios en las Baterías</i>	111
<i>Anexo B.2.4. Discusión de resultados</i>	115

Lista de Tablas

Tabla 2-1: Parámetros de la celda electrolizadora.	22
Tabla 2-2: Especificaciones técnicas del electrolizador.....	23
Tabla 3-1: Especificaciones técnicas del panel FV seleccionado.	29
Tabla 3-2: Especificaciones eléctricas de la batería seleccionada.	30
Tabla 4-1: Valores de los parámetros utilizados en el convertidor Boost de la Figura 4-7.	37
Tabla 4-2: Valores de los parámetros utilizados en el convertidor Buck-Boost de la Figura 4-11. ..	44
Tabla 4-3: Valores de los parámetros utilizados en el convertidor Buck-Boost de la Figura 4-17. ..	52
Tabla A-0-1: Puntos utilizados para ajustar el parámetro <i>dRt</i>	84
Tabla B-0-1: Valores característicos de los elementos utilizados para el Sistema de la Figura 5-1..	99



Lista de Figuras

Figura 2-1: Circuito equivalente de una celda electrolizadora [1].	21
Figura 2-2: Curvas I-V Celda Electrolizadora a distintas Temperaturas.	24
Figura 2-3: Curvas I-V Electrolizador a distintas Temperaturas.	24
Figura 2-4: Curvas I-V Electrolizador obtenida del modelo matemático.	25
Figura 2-5: Curvas I-V Electrolizador dadas por el fabricante [2].	25
Figura 3-1: Representación en diagrama en bloques del sistema propuesto a diseñar.	26
Figura 3-2: Datos del recurso solar en el lugar seleccionado [15].	27
Figura 3-3: Curvas I-V y P-V del panel FV seleccionado dadas por el fabricante [4].	28
Figura 4-1: Topología del panel FV utilizada por Simulink [14].	31
Figura 4-2: Parámetros utilizados para el modelo del arreglo FV a través del bloque “PV Array” de Simulink.	32
Figura 4-3: Curvas I-V y P-V de un módulo FV a distintos niveles de temperatura.	33
Figura 4-4: Curvas I-V y P-V de un módulo FV a distintos niveles de irradiación.	33
Figura 4-5: Curvas I-V y P-V del arreglo FV a distintos niveles de irradiación.	34
Figura 4-6: Curvas I-V y P-V del arreglo FV a distintos niveles de temperatura.	34
Figura 4-7: Topología de modelo arreglo FV linealizado conectado a un convertidor tipo Boost.	35
Figura 4-8: Algoritmo MPPT de control de Vref.	39
Figura 4-9: Resultado de comparación de las funciones de transferencia del circuito y modelo realizada en Psim.	40
Figura 4-10: Resultados del ajuste del sistema del control de voltaje del convertidor Boost.	41
Figura 4-11: Topología de un convertidor tipo Buck-Boost conectado a una fuente de corriente ideal.	42
Figura 4-12: Resultado de comparación de las funciones de transferencia del circuito y modelo realizada en Psim.	46
Figura 4-13: Resultados del ajuste del sistema del control de corriente del convertidor Buck-Boost.	46
Figura 4-14: Modelo Matemático simplificado obtenido a partir de la Figura 4-11.	47
Figura 4-15: Diagrama de bode obtenido a partir de la FT <i>GLC, is</i> .	48
Figura 4-16: Resultados del ajuste del sistema del control de voltaje del convertidor Buck-Boost.	49
Figura 4-17: Topología de un convertidor tipo Buck-Boost conectado a una resistencia.	50
Figura 4-18: Resultado de comparación de las funciones de transferencia del circuito y modelo realizada en Psim.	54
Figura 4-19: Resultados del ajuste del sistema del control de corriente del convertidor Buck-Boost.	54
Figura 4-20: Diagrama de bode obtenido a partir de la FT <i>GLC, i – loads</i> .	56
Figura 4-21: Resultados del ajuste del sistema del control de voltaje del convertidor Buck-Boost.	57
Figura 5-1: Implementación en bloques del sistema propuesto realizado en Simulink.	58
Figura 5-4: Gráficas de las baterías del comportamiento diario del sistema.	60
Figura 5-3: Gráficas de carga del comportamiento diario del sistema.	60
Figura 5-2: Graficas del arreglo FV del comportamiento diario del sistema.	60
Figura 5-5: Gráficas de carga ante el evento de conexión y desconexión de carga.	62
Figura 5-6: Gráficas del arreglo FV ante el evento de conexión y desconexión de carga.	63
Figura 5-7: Gráficas de las baterías ante el evento de conexión y desconexión de carga.	63
Figura 5-8: Gráficas de carga ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.	65
Figura 5-10: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.	66

Figura 5-9: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador. .	66
Figura 5-11: Rizado de corriente de carga con la carga conectada.	68
Figura 5-12: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga conectada.	68
Figura 5-13: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga desconectada.	68
Figura 5-16: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.	70
Figura 5-14: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada. ..	70
Figura 5-15: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.	70
Figura 5-19: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.	72
Figura 5-18: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.	72
Figura 5-17: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.	72
Figura 5-22: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías con dos baterías.	74
Figura 5-21: Gráficas de carga ante el evento de baterías con dos baterías.	74
Figura 5-20: Gráficas del arreglo FV ante el evento de baterías con dos baterías.	74
Figura 5-23: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías solo con la carga conectada.	76
Figura 5-24: Gráficas de carga ante el evento de baterías solo con la carga conectada.	76
Figura A-0-1: Resultado dado por la herramienta “Curve Fitting” de Matlab.	85
Figura A-0-2: Circuito diseñado en Psim para obtener la Figura 4-9.	90
Figura A-0-3: Circuito diseñado en Psim para obtener la Figura 4-12.	93
Figura A-0-4: Circuito diseñado en Psim para obtener la Figura 4-18.	96
Figura A-0-5: Bloque Sistema FV expandido.	96
Figura A-0-6: Bloque Batería 1 expandido.	97
Figura A-0-7: Bloque Sistema de Baterías expandido.	97
Figura A-0-8: Bloque Filtro RC 1 expandido.	98
Figura A-0-9: Bloque Convertidor Buck-Boost expandido.	98
Figura A-0-10: Bloque Convertidor Buck-Boost 1 expandido.	98
Figura A-0-11: Bloque Electrolizador expandido.	98
Figura B-0-1: Gráficas de carga ante el evento de conexión y desconexión de carga.	101
Figura B-0-2: Gráficas de las baterías ante el evento de conexión y desconexión de carga.	101
Figura B-0-3: Gráficas del arreglo FV ante el evento de conexión y desconexión de carga.	102
Figura B-0-4: Gráficas de carga ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.	103
Figura B-0-6: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.	104
Figura B-0-5: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.	104
Figura B-0-7: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga desconectada.	105
Figura B-0-8: Rizado de corriente de carga con la carga conectada.	106
Figura B-0-9: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga conectada.	106
Figura B-0-12: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.	108
Figura B-0-11: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.	108
Figura B-0-10: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.	108

Figura B-0-15: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada. 110

Figura B-0-13: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada. . 110

Figura B-0-14: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada. 110

Figura B-0-18: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías con dos baterías..... 112

Figura B-0-16: Gráficas de carga ante el evento de baterías con dos baterías..... 112

Figura B-0-17: Gráficas del arreglo FV ante el evento de baterías con dos baterías..... 112

Figura B-0-19: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías solo con la carga conectada. 114

Figura B-0-20: Gráficas de carga ante el evento de baterías solo con la carga conectada..... 114



Nomenclatura

T	: Temperatura (en °C).
p	: Presión (en bar).
G	: Irradiación (en W/m ²).
T_{op}	: Tiempo de operación.
f_{sw}	: Frecuencia de conmutación.
$R_i(T, p)$: Resistencia de la celda electrolizadora en función de T y p .
$e_{rev}(T, p)$: voltaje reversible de la celda electrolizadora en función de T y p .
$I(T, p)$: Corriente de la celda electrolizadora en función de T y p .
P_{Elec}	: Potencia del electrolizador.
$R_{interna,bat}$: Resistencia interna de la batería.
N_{bat}	: Número de baterías.
$C_{nom,bat}$: Capacidad nominal de la batería.
$V_{nom,bat}$: Voltaje nominal de la batería.
Irr_{prom}	: Irradiancia promedio.
P_{Arr-FV}	: Potencia instalada del arreglo fotovoltaico.
$P_{FV,prom}$: Potencia del arreglo fotovoltaico en base a una irradiación promedio.
S_{FV}	: Superficie del módulo fotovoltaico.
η_{PV}	: Factor de eficiencia del módulo fotovoltaico.
N_{PV}	: Numero de módulos fotovoltaicos.
R_{PV}	: Resistencia equivalente del arreglo FV.
V_{MPPT}	: Voltaje de MPPT del módulo o arreglo fotovoltaico.
I_{MPPT}	: Corriente de MPPT del módulo o arreglo fotovoltaico.
V_{oc}	: Voltaje de circuito abierto del módulo o arreglo fotovoltaico.
I_{sc}	: Corriente de cortocircuito del módulo o arreglo fotovoltaico.
$N_{p,PV}$: Numero de módulos conectados en paralelo.
$N_{s,PV}$: Numero de cadenas de paneles fotovoltaicos conectadas en serie.
V_{ref}	: Voltaje de referencia.
I_{nom}	: Corriente nominal.
ξ	: Criterio de amortiguamiento.
P_{ent}	: Potencia de entrada.
P_{sal}	: Potencia de salida.
$G_{vdx-y}(s)$: Función de transferencia que relaciona el voltaje con la variable “x” del convertidor “y”.
$G_{idx-y}(s)$: Función de transferencia que relaciona la corriente con la variable “x” del convertidor “y”.

Abreviaciones

Mayúsculas

ERNC	: Energía Renovable No Convencionales.
MPPT	: Seguimiento de punto de máxima potencia (en inglés, Maximum Power Point Tracking).
FV	: Fotovoltaico.
PV	: Fotovoltaico (en inglés, Photovoltaic).
MG	: Microred (en inglés, Microgrid).
ESD	: Dispositivos de almacenamiento de energía (en inglés, Energy Storage Devices)
SMC	: Controlador de modo deslizante (en inglés, Sliding-Mode Controller)
IGBT	: Transistor bipolar de puerta aislada (en inglés, Insulated Gate Bipolar Transistor).
PWM	: Modulación por ancho de pulsos (en inglés, Pulse-Width Modulation).
H2V	: Hidrógeno verde.
DC	: Corriente directa (en inglés, Direct Current).
FT	: Función de Transferencia.
PI	: Proporcional-Integral.
MCC	: Modo de Conducción Continua.
STC	: Condiciones de prueba estándar (en inglés, Standard Test Conditions).
ELEC	: Electrolizador.
BW	: Ancho de banda (en inglés, Bandwidth).



Minúsculas

max	: máximo.
min	: mínimo.
nom	: nominal.
bat	: batería.
prom	: promedio.
ent	: entrada.
sal	: salida.
ref	: referencia.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

El hidrógeno es el elemento químico más abundante del planeta, asimismo, este constituye aproximadamente el 75% de la materia del universo. Sin embargo, en la Tierra lo encontramos combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua, o al carbono, formando compuestos orgánicos.

Este elemento hace mucho tiempo que es utilizado como materia prima y combustible, pero como no se puede tomar directamente de la naturaleza en estado puro, se necesita “fabricarlo”. El H2V se consigue mediante un proceso de electrólisis impulsado a partir de energías renovables como la eólica o la solar. La electrólisis consiste en utilizar una corriente eléctrica para descomponer mediante electrodos la molécula del agua en oxígeno e hidrógeno [18].

El H2V ya aspira ser el vector energético clave para alcanzar la descarbonización del planeta y cumplir con los compromisos señalados para 2050 en la lucha contra el cambio climático.

Chile se encuentra actualmente en las primeras fases de desarrollo del sector del hidrógeno verde y sus derivados, enfocado a abastecer tanto el mercado nacional como el de exportación. El país, tiene mucho potencial como productor de bajo costo debido a su abundancia de recursos energéticos renovables [19]. Por lo anterior, Chile ha sido identificado como uno de los países donde se puede producir el H2V más económico del mundo. Sin embargo, según el reporte de la EIA (2019) el costo de producción del H2V a partir de energías renovables está entre 3,0 y 7,5 USD/Kg, considerablemente mayor al del gas natural (entre 0,9 y 3,2 USD/Kg) o el carbón (entre 1,2 y 2,2 UDS/Kg).

En la Conferencia Internacional “Green Hydrogen Summit-Chile 2020” se dio a conocer la estrategia nacional de hidrógeno verde de Chile, la cual tiene 3 objetivos principales: Contar con 5 GW de capacidad de electrólisis en desarrollo al 2025; Producir el hidrógeno verde más económico en el año 2030; Estar entre los 3 principales exportadores para 2040 [20].

Una de las principales desventajas del hidrógeno verde es su alto costo de producción, reducirlo es uno de los desafíos más grandes que tiene el mundo hoy, dada la importancia que toma el hidrógeno en la reducción de emisiones. Actualmente, Chile está buscando proyectos de optimización de producción de H2V, donde se busca mejorar la eficiencia de conversión de energía entre una planta solar fotovoltaica y una unidad electrolizadora, lo cual permitirá reducir la energía requerida y los costos de producción, habilitando así a una mayor eficiencia en aplicaciones de H2V fuera de red [21].

1.2. Trabajos Previos

A continuación, se realiza el estudio y revisión de distintas publicaciones en relación con sistemas de generación de Hidrogeno Verde a partir de ERNC, Paneles Fotovoltaicos, Electrolizadores y convertidores DC/DC.

Para la revisión bibliográfica se consideran tres aspectos fundamentales en el desarrollo del trabajo:

- Características y modelos del electrolizador: En este apartado se revisan dos artículos para obtener un modelo matemático de la celda electrolizadora y las características eléctricas del electrolizador.
- Modelo Matemático Panel Solar Fotovoltaico: En este apartado se detalla un modelo matemático para el panel FV, el cual es el mismo modelo que utiliza Simulink en su bloque “PV Array”.
- Modelo Matemático Convertidores DC-DC: En este apartado se revisan cuatro artículos, los cuales permiten obtener los modelos matemáticos y ecuaciones características para cada convertidor utilizado en este trabajo.

1.2.1 Características y modelos del electrolizador

[1] *Ozcan Atlam, Mohan Kolhe, “Equivalent electrical model for a proton exchange membrane (PEM) electrolyser”, Energy Conversion and Management, Volume 52, Issues 8–9, 2011, Pages 2952-2957.*

En este artículo se presenta una manera de obtener un modelo matemático para la celda electrolizadora, en específico el modelo mostrado es dependiente de los valores de temperatura y presión en la celda.

El modelo que fue desarrollado en el artículo fue probado experimentalmente, dando buenos resultados.

Para este trabajo, este artículo fue de gran importancia para la obtención de un modelo matemático del electrolizador simple de implementar y que representará de manera correcta las curvas del electrolizador.

[2] B. Guzmán, C. Spinsati, “Producción de Hidrogeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica”, *Proyecto Final, Catedra Integración IV, 2018.*

En este documento se presentó un proyecto basado en hidrógeno verde en la ciudad de Salta, Argentina, donde se dieron a conocer las características de todos los elementos que formarán parte del proyecto, para luego dar un evaluación técnica-económica del mismo.

Lo que se rescata de este documento es el electrolizador que se utilizó, ya que se muestran las curvas características de la celda electrolizadora y del electrolizador, además de las especificaciones técnicas dadas por el fabricante para su correcta operación.

1.2.2 Modelo Matemático Panel Solar Fotovoltaico

[5] S. Shongwe, Member, IEEE, M. Hanif, Member, IEEE, “Gauss-Seidel Iteration Based Parameter Estimation for a Single Diode Model of a PV Module”, *Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, Rondebosch, 7701, South Africa.*

En este artículo se muestra el procedimiento para obtener las ecuaciones que describen el modelo matemático de un circuito equivalente para modelo de diodo único de un panel solar fotovoltaico.

Para este trabajo, este artículo es de ayuda para entender como Simulink calcula los parámetros para el modelo matemático de diodo único de un panel solar fotovoltaico, ya que es el modelo matemático que utiliza el bloque “PV Array” en Simulink.



1.2.3 Modelo Matemático Convertidores DC-DC

[6] Freddy Fernando Valderrama, Henry Moreno C. y Héctor Manuel Vega, “Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost”, *Ingenium, vol. 12, N°. 24, 2011, págs. 44-55.*

En este artículo se describe el comportamiento de un pulsador elevador (Boost), se obtienen y simulan las ecuaciones diferenciales no lineales que describen el comportamiento del circuito con Simulink/Matlab mediante el algoritmo de Runge Kutta. Seleccionando los valores de los parámetros, se linealiza con el punto de operación obtenido y junto con el Jacobiano se obtiene un modelo lineal. Con el modelo lineal se sintoniza un controlador PID y un controlador de realimentación de estado, y se comparan realizando el análisis de sensibilidad y de la respuesta transitoria.

Para este trabajo, este artículo ayuda a obtener las ecuaciones del convertidor Boost considerando pérdidas en este.

[7] D' Alessio, L. A., González, L. G., & Cáceres, R. O. (2014). *Diseño y Construcción de un Convertidor Boost de Pequeña Potencia, con Propósitos Educativos y de Investigación*. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 6(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v6i2.183>

Este artículo presenta el diseño y construcción de un convertidor DC-DC Boost, para unos parámetros dados y basándose en un análisis teórico se diseña y determinan todos los componentes asociados al convertidor. Además, se diseña un sistema de control por retroalimentación de voltaje con un controlador PI, sintonizado mediante la asignación de polos, además de un modulador PWM para la conmutación de un IGBT. Finalmente, el desempeño del convertidor se verifica a través de simulación computacional y pruebas experimentales.

Para este trabajo, este artículo ayuda a obtener las ecuaciones del convertidor Boost y entender mejor su comportamiento dinámico.

[8] Carlos Victoriano Gutiérrez, Ignacio Rosales San Martín, “Estudio de convertidores DC-DC e implementación de un convertidor Boost (Elevador)”, Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Concepción, 2019.

En este documento, se estudió y analizó de forma general los Convertidores DC-DC no aislados, los cuales son el convertidor Buck, Convertidor Boost y, por último, el Convertidor Buck-Boost. Esto con el propósito de comprender sus funcionamientos respectivos y lograr diseñar un Convertidor Boost e implementarlo para la realización de pruebas.

Para este trabajo, solo interesa la parte del Convertidor Buck-Boost, donde se pueden obtener las ecuaciones dinámicas de este.

[9] Ramos-Paja, C.A.; Bastidas-Rodríguez, J.D.; González, D.; Acevedo, S.; Peláez-Restrepo, J. “Design and Control of a Buck–Boost Charger–Discharger for DC–Bus Regulation in Microgrids”. *Energies* 2017, 10, 1847. <https://doi.org/10.3390/en10111847>

Este artículo propone un sistema para regular el voltaje del bus de DC de una MG teniendo en cuenta cualquier voltaje entre la ESD y la tensión del bus de DC. El sistema que se propone está formado por un ESD conectado a un bus de DC a través de un convertidor Buck-Boost bidireccional, que está regulado por un controlador de modo deslizante (SMC) para garantizar la estabilidad del sistema en todo el rango de operación. El SMC impulsa el cargador-descargador Buck-Boost para regular el voltaje del bus de DC, en la referencia deseada valor, cargando o descargando el ESD. Este documento

también proporciona procedimientos detallados para diseñar los parámetros tanto del SMC como del cargador-descargador. Finalmente, se realiza simulación y experimentación.

Para este trabajo, este artículo sirve para realizar el modelo matemático y un correcto control que comprendía el sistema de baterías, convertidor Buck-Boost y el bus DC.

1.2.4 Discusión

De la revisión bibliográfica, se puede destacar el proyecto de producción de hidrógeno mostrado en [2], donde se puede observar que el arreglo FV va conectado al electrolizador a través de un panel de control sin utilizar algún componente de almacenamiento de energía. Aunque en el documento no se muestren resultados de simulaciones realizadas del sistema, se da indicios de que la conversión de energía en el sistema FV-Electrolizador no es eficiente. Primero, se puede identificar que el arreglo FV no entrega la máxima potencia al sistema, ya que no existe un algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia. Y segundo, se dice que el panel de control utilizado es para mantener al electrolizador funcionando en rangos admisibles por este y además podrá variar la estructura del electrolizador, pudiendo conectar y desconectar celdas electrolizadoras según la corriente que se esté entregando por el arreglo FV.

Por lo anterior, se puede concluir que la conversión de energía del sistema FV-Electrolizador del proyecto mostrado en [2] es ineficiente, ya que el punto de operación del electrolizador quedará definido por la potencia entregada en el arreglo FV, el cual tampoco entregará su potencia máxima por lo comentado anteriormente.

1.3. Definición del problema

En sistemas basados en electrolizadores para producir hidrógeno a partir de energía obtenida desde arreglos fotovoltaicos se producen a lo largo del día diferencias entre la corriente necesaria para operar el electrolizador a máxima eficiencia y la corriente disponible desde el arreglo fotovoltaico, lo que hace que el sistema sea ineficiente. Para enfrentar esta problemática se agrega un elemento almacenador de energía entre estos dos elementos, para así poder siempre entregar la corriente necesaria para que el electrolizador funcione a su máxima capacidad. Este elemento almacenador de energía corresponderá a un sistema de baterías.

1.4. Hipótesis de Trabajo

Es posible mejorar la eficiencia en el uso de la energía para producir hidrógeno en sistemas FV-Electrolizador mediante la incorporación de un sistema de baterías, el cual permitirá que tanto el sistema FV como el electrolizador puedan operar en sus puntos de máxima eficiencia de conversión de energía.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Caracterizar y dimensionar el sistema eléctrico (compuesto por un sistema de energización, electrolizador y convertidores DC/DC), para luego diseñar e implementar las estrategias de control que permitan optimizar la conversión de energía y la producción de hidrógeno.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el arreglo FV y requerimientos eléctricos del electrolizador.
- Dimensionar el sistema de energización (sistema FV y de baterías).
- Desarrollar un modelo matemático de la celda electrolizadora y del sistema de energización.
- Diseñar los convertidores DC/DC y controladores que dirijan el comportamiento del sistema propuesto.
- Propuesta y simulación de un sistema de conversión de energía.

1.6. Alcances y Limitaciones

- La propuesta se realiza en base a modelos obtenidos de la literatura estándar.
- La información la celda electrolizadora y electrolizador utilizados en este informe son proporcionados por [2].
- El desarrollo de los modelos matemáticos y controladores serán realizados en Matlab.
- Las simulaciones del sistema propuesto diseñado en este informe son realizadas en la herramienta Simulink de Matlab.
- Se hace uso de Psim para la obtención de los diagramas de Bode para las funciones de transferencia del sistema propuesto.
- Se hace uso de modelos matemáticos sencillos para el caso de las baterías y celda electrolizadora, obteniendo así una menor carga computacional.

- Dadas las características del sistema a simular y el marco de tiempo correspondiente, el sistema se modela y evalúa en Simulink.
- Simulink permite trabajar con un modelo más complejo de una batería, pero al implementarlo en el sistema propuesto los tiempos de simulación se elevan demasiado. Por lo tanto, se toma la decisión de utilizar un modelo más sencillo.

1.7. Temario y Metodología

A continuación, se presenta el temario y metodología utilizada en los capítulos que corresponden al desarrollo del presente trabajo, empezando por el Capítulo 2 y terminando por el Capítulo 5.

En el Capítulo 2, se desarrolla el modelo matemático del electrolizador, donde primeramente se realiza el modelo para una celda electrolizadora, de la cual se deriva luego el modelo que representa al electrolizador. Luego, se dan a conocer las curvas características del electrolizador obtenidas a partir del modelo matemático desarrollado.

En el Capítulo 3, se dimensiona el sistema de conversión de energía, donde primeramente se muestra un diagrama en bloques que representa el sistema propuesto a diseñar, para luego proceder a dimensionar el arreglo FV y el banco de baterías.

En el Capítulo 4, se desarrollan las etapas que componen el sistema propuesto. En particular, se muestra el modelo matemático del panel FV, se diseñan los convertidores DC/DC que compondrán al sistema y se sintonizan los lazos de control asociados a cada convertidor DC/DC.

En el Capítulo 5, se muestra, simula y analiza el sistema propuesto diseñado con los capítulos anteriores, donde este sistema representa un caso para el cual no existen pérdidas. El análisis se hace a partir de distintos eventos que son definidos a lo largo de este capítulo.

Capítulo 2. Modelo Matemático Electrolizador

2.1. Introducción

En este capítulo, se muestra un modelo matemático para el electrolizador de forma de poder aplicarlo en posteriores simulaciones. Para ello, se hace uso de lo expuesto en [1] donde se obtienen sus ecuaciones matemáticas y [2] del cual se obtienen los parámetros del electrolizador que se utilizará como carga en el sistema. Luego, de obtenido el modelo matemático y verificación de este, se dan a conocer las curvas características del electrolizador ante distintas condiciones de operación.

2.2. Desarrollo del Modelo Matemático Celda Electrolizadora

Para el desarrollo del modelo matemático de la celda electrolizadora, se analiza la información expuesta en [1], a partir del cual se obtienen la **Figura 2-1** y las ecuaciones mostradas en (2.1), (2.2) y (2.3), donde se muestran la relación entre la resistencia interna, voltaje y corriente en una celda electrolizadora.

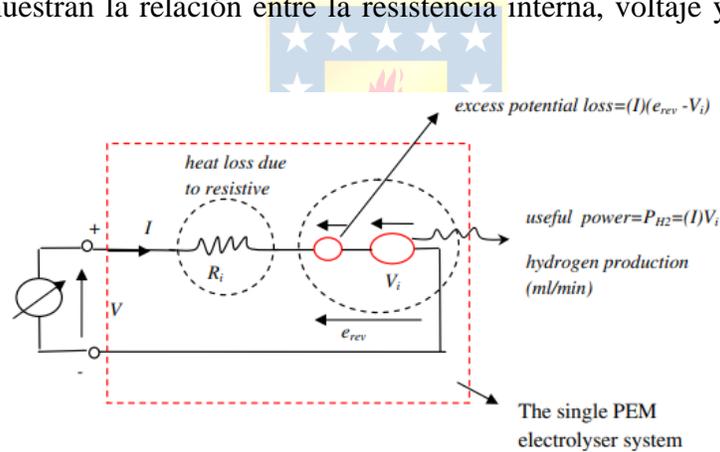


Figura 2-1: Circuito equivalente de una celda electrolizadora [1].

$$R_i(T, p) = R_{i0} + k \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + dR_t(T - T_0) \dots (2.1)$$

$$e_{rev}(T, p) = e_{rev_0} + \frac{R(273 + T)}{2F} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \dots (2.2)$$

$$I(T, p) = \begin{cases} 0 & V \leq e_{rev}(T, p) \\ \frac{1}{R_i(T, p)} (V - e_{rev}(T, p)) & V > e_{rev}(T, p) \end{cases} \dots (2.3)$$

Donde:

- T, p : Temperatura y presión en la celda electrolizadora, respectivamente.
- R_{i0}, p_0 y T_0 : Resistencia, presión y temperatura de referencia, respectivamente.

- k : Parámetro de ajuste de la curva expresado en $[VA^{-1}]$.
- dR_t : Coeficiente de resistencia de temperatura.
- e_{rev_0} : Tensión inversa de referencia a temperatura y presión de referencia.
- R : Constante ideal de los gases ($0.082 \frac{L*atm}{K*mol}$).
- F : Constante de Faraday ($96.487 \frac{C}{mol}$).

Notar que, las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) son las ecuaciones que modelan la celda electrolizadora de la **Figura 2-1**, pero en este caso se tienen varias de estas celdas conectadas en serie, por lo tanto, se deben modificar estas ecuaciones para agregar un nuevo parámetro “ n_s ”, que representa las celdas conectadas en serie.

Tomando en cuenta lo anterior y utilizando las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3), se obtienen las ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6), las cuales son las ecuaciones matemáticas que modelan el comportamiento del electrolizador que se utilizará en los próximos capítulos.

$$R_i(T, p) = n_s \left(R_{i0} + k \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + dR_t (T - T_0) \right) \dots (2.4)$$

$$e_{rev}(T, p) = n_s \left(e_{rev_0} + \frac{R(273 + T)}{2F} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \right) \dots (2.5)$$

$$I(T, p) = \begin{cases} 0 & V \leq e_{rev}(T, p) \\ \frac{1}{R_i(T, p)} (V - e_{rev}(T, p)) & V > e_{rev}(T, p) \end{cases} \dots (2.6)$$

Donde R_i modela la resistencia inicial del sistema, e_{rev} modela el voltaje reversible e I modela la corriente de entrada del electrolizador.

A fin de evaluar las ecuaciones de este modelo, se utilizan los parámetros indicados en la **Tabla 2-1**, los que fueron obtenidos en el Anexo A.1.

Tabla 2-1: Parámetros de la celda electrolizadora.

Parámetro	Valor
R_{i0}	2.3148[m Ω]
p_0	6[bar]
T_0	80[$^{\circ}C$]
e_{rev_0}	0.082[V]
dR_t	$-6.173e - 05 \left[\frac{\Omega}{^{\circ}C} \right]$
R	$0.082 \left[\frac{L*atm}{K*mol} \right]$
F	$96.487 \left[\frac{C}{mol} \right]$
n_s	24

2.3. Descripción y Curvas características del Electrolizador

A continuación, se muestran las características del electrolizador que se utiliza en el sistema de conversión de energía propuesto que se diseñará, el cual está basado en [2].

2.3.1 Descripción del electrolizador

Como se comentó anteriormente, la celda electrolizadora que se utiliza tiene las mismas características a la mostrada en [2], las cuales son conectadas en serie para así obtener un electrolizador alcalino de 5.2[kW].

En la **Tabla 2-2**, se muestran las características principales del electrolizador.

Tabla 2-2: Especificaciones técnicas del electrolizador.

Stack electrolítico	
Tipo de Celdas	Bipolares. Mod. ALYZER 0100
Numero de celdas en serie	24
Superficie del electrodo por celda	600[cm ²]
Intensidad de corriente máxima	120[A]
Activación de electrodos	Níquel Raney depositado
Materiales internos del stack	Níquel puro
Características eléctricas	
Voltaje en condiciones nominales	48[V]
Corriente en condiciones nominales	108[A]
Potencia en condiciones nominales	5.184[kW]
Otras características	
Presión máxima de operación	6[bar]
Temperatura máxima de operación	80[°C]
Producción de Hidrógeno en condiciones nominales	1.2[$\frac{Nm^3}{h}$]

2.3.2 Curvas características del Electrolizador

En base a las ecuaciones matemáticas obtenidas en 2.2, se obtienen las curvas características del electrolizador. Principalmente, se muestran las curvas I-V tanto de la celda electrolizadora como de un sistema compuesto por 24 celdas a distintas temperaturas.

En las **Figura 2-2** y **Figura 2-3** se muestran las curvas I-V de la celda electrolizadora y del electrolizador, respectivamente.

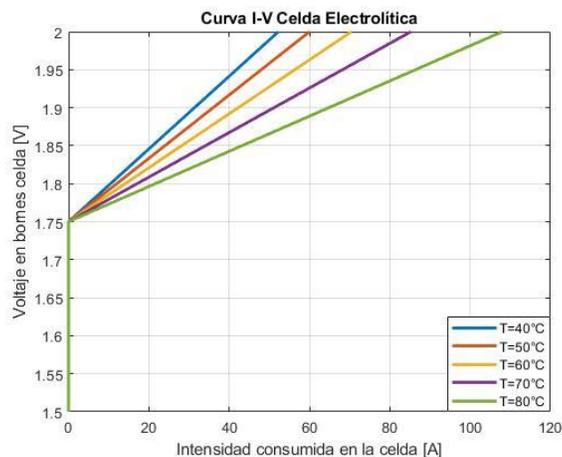


Figura 2-2: Curvas I-V Celda Electrolizadora a distintas Temperaturas [elaboración propia].

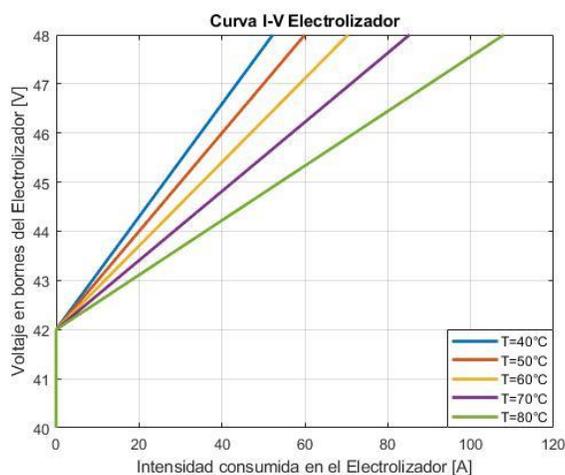


Figura 2-3: Curvas I-V de 24 celdas en serie a distintas Temperaturas [elaboración propia].

En la **Figura 2-2**, se puede observar que al variar la temperatura en la celda electrolizadora la curva cambia su pendiente, esto debido a las variaciones en el parámetro R_i . Esto implica que al aumentar la temperatura de operación del electrolizador se requiere de menor tensión para alcanzar el mismo nivel de corriente. Además, se puede observar que la conducción de corriente comienza a partir de los 1.75[V], que corresponde al valor de voltaje reversible de la celda electrolizadora.

En la **Figura 2-3**, se observa la curva que se obtiene al conectar 24 celdas en serie, aumentando la potencia requerida por el sistema al aumentar el voltaje que debe ser aplicado para obtener la misma cantidad de corriente que la mostrada en la **Figura 2-2**. Además de lo anterior, también aumentamos el volumen de producción de hidrógeno, ya que este se multiplica conforme se van conectando celdas en serie.

Finalmente, se puede observar que lo obtenido en las **Figura 2-2** y **Figura 2-3** son una buena aproximación para las curvas de la celda electrolizadora y electrolizador mostradas en [2].

2.3.3 Comparación curvas características del Electrolizador

A continuación, en las **Figura 2-4** y **Figura 2-5** se muestran la gráfica obtenida a partir del modelo matemático del electrolizador y la gráfica dada por el fabricante.

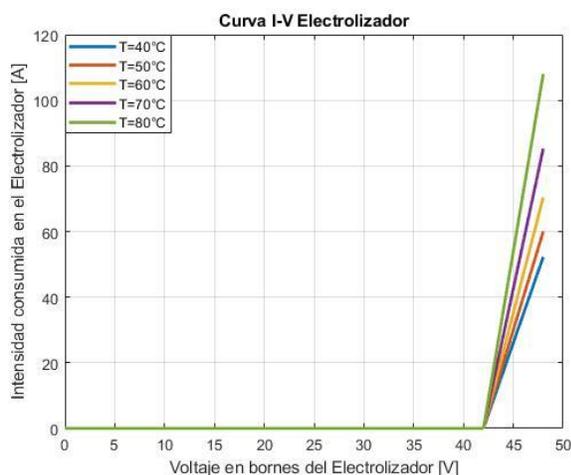


Figura 2-4: Curvas I-V Electrolizador obtenida del modelo matemático.

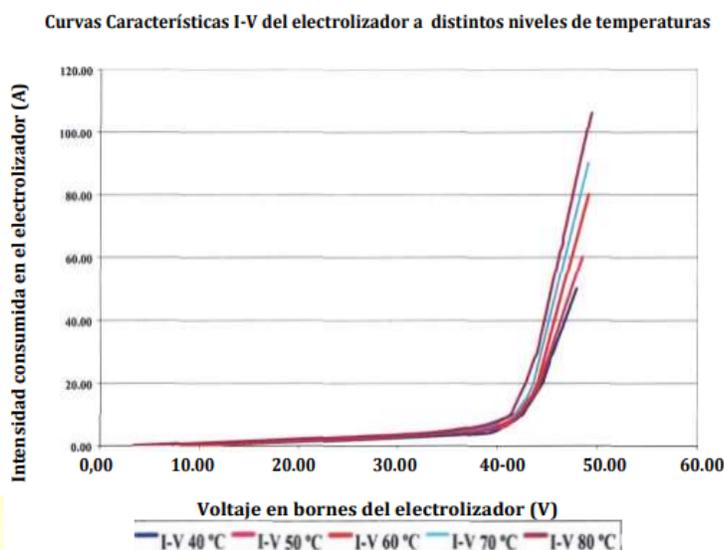


Figura 2-5: Curvas I-V Electrolizador dadas por el fabricante [2].

Al comparar la curva del electrolizador dada por el modelo matemático (**Figura 2-4**) y la curva del electrolizador dada por el fabricante (**Figura 2-5**), se puede apreciar que las curvas dadas a distintas temperaturas por el modelo matemático mostrado en la ecuación (2.6) representa correctamente a las curvas dadas por el fabricante. En particular, nos interesa que en las condiciones de operación nominales el error sea mínimo ($T=80^{\circ}\text{C}$), obteniendo efectivamente a $48[\text{V}]$ una corriente de $108[\text{A}]$, es decir que el error para este caso es del 0% tomando como referencia a lo que nos dice el fabricante. Para las demás temperaturas tenemos errores en la corriente entre 0-5% debido a que principalmente el modelo utilizado es relativamente sencillo y que el ajuste se hizo en base a las condiciones nominales de operación del electrolizador.

Por último, notar que en la gráfica dada por el fabricante cerca del voltaje reversible de $42[\text{V}]$ se observa que el electrolizador consume una cierta intensidad de corriente, lo cual no se observa en la gráfica obtenida por el modelo, pero ya que se está trabajando en la zona lineal de la curva podemos obviar esta diferencia.

Capítulo 3. Dimensionamiento del Sistema de Acondicionamiento de Potencia

3.1. Introducción

En este capítulo, se muestra en primera instancia el diagrama en bloques del sistema propuesto que se utiliza para el diseño. Además, se determina el tamaño relativo de las fuentes de energía, que en este caso son un arreglo de paneles FV y un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías.

3.2. Sistema de Acondicionamiento de Potencia propuesto

Para realizar la interfase del sistema FV con el electrolizador se propone el sistema de la **Figura 3-1**.

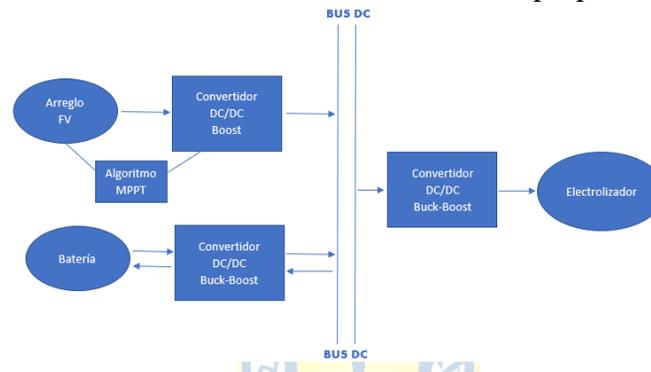


Figura 3-1: Representación en diagrama en bloques del sistema propuesto a diseñar.

Como puede verse el sistema se estructura en torno a un bus DC común, donde confluyen los diferentes componentes de este. Para asegurar un adecuado margen de operación para el algoritmo de seguimiento de MPPT del sistema FV se selecciona una tensión de operación mayor que la del arreglo FV para el bus DC. Con el objetivo de mantener la tensión constante, el nivel de voltaje de este bus DC debe ser regulado correctamente ante las perturbaciones a medida que el arreglo fotovoltaico cambie su punto de operación y/o las baterías cambien de tensión en sus momentos carga y descarga. Además, se hace uso de convertidores DC/DC entre los componentes del sistema propuesto, que además de aislarlos permitirán controlar tanto el voltaje del arreglo FV, bus DC, voltaje de entrada del electrolizador, como los flujos de potencia entre los diferentes componentes del sistema.

En particular se tienen los siguientes convertidores DC/DC:

- **Convertidor Boost:** Este convertidor está conectado entre el arreglo FV y el bus DC, y es el que a través de un algoritmo MPPT, mantiene al arreglo FV operando en su punto de máxima potencia. En particular, para el sistema propuesto se opta por utilizar el algoritmo de perturbar y observar para implementar el esquema MPPT.

- Convertidor Buck-Boost/Batería: Este convertidor está conectado entre el banco de baterías y el bus DC, y es el responsable de mantener la tensión en el bus DC a un valor constante, por lo que para ello se hace uso de un sistema de control PI que sigue una referencia constante.
- Convertidor Buck-Boost/Carga: Este convertidor está conectado entre el bus DC y el electrolizador, y es el responsable de mantener la salida del convertidor en un voltaje constante ante las distintas perturbaciones. Para ello, se hace uso de un sistema de control PI que sigue una referencia constante igual al voltaje de operación óptima del electrolizador.

3.3. Dimensionamiento del Arreglo Fotovoltaico

Para dimensionar el tamaño que deberá tener el arreglo de paneles FV se considerará como base el perfil de irradiación correspondiente a la zona donde se construirá el proyecto “Quebrada Blanca Fase 2”, ya que puede ser de gran interés la producción de hidrógeno verde en este sector aprovechando el gran sistema de desalinización de agua que se busca construir en el proyecto.

En la **Figura 3-2**, se muestra el régimen de irradiancia diario promedio obtenido a partir de la página web “Explorador Solar”.

El lugar escogido se encuentra en las coordenadas de Latitud $-21,09^\circ$ y Longitud $-68,88^\circ$, siendo aproximadamente las coordenadas donde se construirá este proyecto.



Figura 3-2: Datos del recurso solar en el lugar seleccionado [15].

A partir de la **Figura 3-2**, se puede obtener la magnitud del recurso solar disponible en ese lugar. Considerando que el arreglo de paneles se posicionará a un ángulo equivalente a la latitud, de acuerdo con el explorador solar la irradiancia promedio anual, es de: $7.47[\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}]$. Luego, las horas de sol equivalentes a STC, son:

$$h_{@sol_1} = \frac{7.47k}{1000} = 7.47[h]$$

Luego, considerando la irradiancia promedio anual y que el sistema opera en el punto de MPPT, se busca determinar la potencia requerida en el arreglo FV para cubrir aproximadamente un 100% de la demanda diaria del electrolizador, para lo cual se considera un tiempo diario de operación de 12[h] para el electrolizador ya que son las horas en las que existe radiación solar. Considerando lo anterior, se tiene:

$$P_{Arr-FV} = \frac{w_{demanda_dia}}{h_{@sol_1}} = \frac{5200[W] * 12[h]}{7.47} \approx 8.4[kW]$$

También de la **Figura 3-2**, podemos determinar la irradiancia promedio diaria del lugar, la cual se calcula tomando los valores mayores de radicación durante las horas de sol, obteniendo lo siguiente:

$$Irr_{prom} = \frac{93.89 + 346.33 + 613.37 + 825.89 + 974 + 1044.65 + 1035.71 + 948.47 + 795.76 + 589.9 + 344.39 + 63.72}{12} \approx 640 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

A continuación, se procede a seleccionar un panel FV comercial que permita configurar un arreglo a fin de suplir esta característica.

En [4] se muestran los datos técnicos del panel FV seleccionado, de donde se extraen las curvas características dadas por el fabricante (**Figura 3-3**) y especificaciones eléctricas en STC (**Tabla 3-1**). La razón principal por la que se escoge este modelo de panel FV es debido a que este se encuentra disponible comercialmente en la página chilena “Punto Solar”, por lo que obtenerlos desde Chile no es un problema.

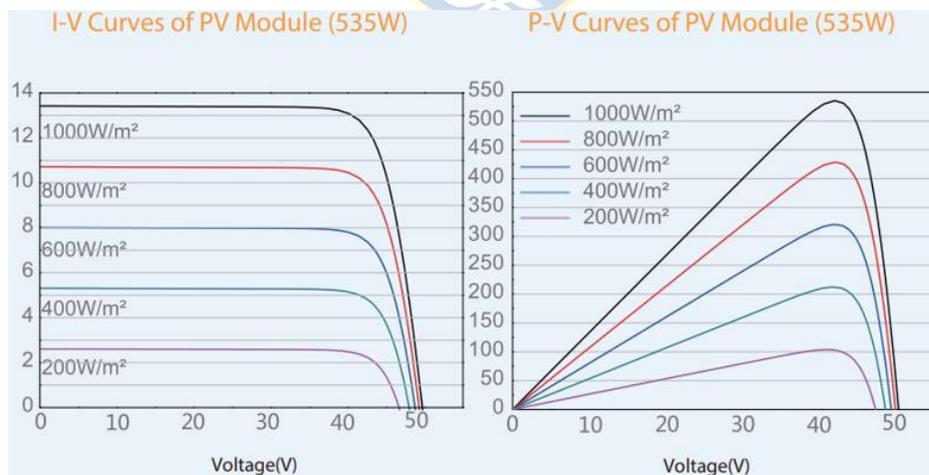


Figura 3-3: Curvas I-V y P-V del panel FV seleccionado dadas por el fabricante [4].

Tabla 3-1: Especificaciones técnicas del panel FV seleccionado.

Especificaciones eléctricas – PANEL FV HITOUCH 5 CSP18-72H	
Potencia Máxima	535[W]
Voltaje de máxima potencia	41.93[V]
Corriente de máxima potencia	12.76[A]
Voltaje de circuito abierto	49.78[V]
Corriente de cortocircuito	13.6[A]
Eficiencia de módulo	20.7%

Luego, a partir de los datos entregados en la **Tabla 3-1** se puede calcular el número de módulos que deberá tener el arreglo FV:

$$\frac{P_{Arr-FV}}{P_{FV,prom}} = \frac{P_{Arr-FV}}{Irr_{prom} * S_{FV} * \eta_{FV}} = N_{FV} \quad \dots (3.1)$$

Reemplazando los valores en la ecuación (3.1), se obtiene: $N_{FV} = \frac{8.4[kW]}{640[\frac{W}{m^2}] * 2.5[m^2] * 0.207} = 25.36 \approx 26$

Por lo tanto, ahora se debe decidir cómo se distribuyen estos 26 paneles para formar el arreglo FV.

Para ello, se define que el voltaje en el bus DC mostrado en la **Figura 3-1** será de 100[V] y una configuración del arreglo FV de 2 filas de paneles conectadas en serie con cada fila compuesta de 13 paneles conectados en paralelo. Con lo anterior, se obtiene que la ganancia de voltaje en el convertidor Boost sea prácticamente unitaria, logrando así una mejor eficiencia al no requerir que el convertidor opere con ciclos de trabajo extremadamente altos.

3.4. Dimensionamiento del Banco de Baterías

Para dimensionar la capacidad del banco de baterías, se utiliza como criterio de diseño principal que este debe ser capaz de suministrar energía al electrolizador (funcionando en su punto óptimo) por al menos 12[h] continuas. Se elige este tiempo de operación ya que corresponden a las horas en las que no existe radiación solar, por lo que la energía generada del arreglo FV podrá ser aprovechada durante esos momentos, haciendo así más efectivo el sistema.

De acuerdo a las especificaciones del electrolizador se tiene que su punto nominal de operación es a 48[V] y 108[A], por lo que a partir de esto se puede obtener la capacidad total mínima que deberá obtener el banco de baterías.

$$Capacidad\ Banco\ Baterias_{min} = \frac{I_{nom,Elec} * T_{op,Elec}}{\eta_{bat}} \quad \dots (3.2)$$

Luego, se procede a seleccionar una batería comercial que permita suplir esta característica.

En [3] se muestran los datos técnicos de la batería seleccionada y en la **Tabla 3-2** se encuentran los datos que serán de interés para los próximos capítulos.

Tabla 3-2: Especificaciones eléctricas de la batería seleccionada.

Especificaciones Eléctricas - BATERIA BOX PREMIUM LVS	
Voltaje nominal	51.2[V]
Capacidad nominal	500[Ah]
Energía utilizable	24[kWh]
Corriente máxima de descarga	250[A]
Corriente de descarga pico	360[A], 5[s]
Voltaje operativo	40-57.6[V]
Eficiencia energética de ida y vuelta	≥ 95%

Uno de los parámetros que no aparece especificado en la **Tabla 3-2** pero que es muy importante para el modelo matemático de la batería es su resistencia interna.

Este valor de resistencia interna de la batería cambia en función del SOC y la corriente de descarga. En particular, para este caso el valor corresponde a la pendiente de la curva de la batería con una tasa de descarga de 2[h]. Considerando lo anterior y los datos de la **Tabla 3-2** se tiene:

$$R_{interna,bat} = \frac{V_{operativo,max} - V_{nominal}}{I_{descarga,max}} = \frac{57.6[V] - 51.2[V]}{250[A]} = 25.6[m\Omega] \dots (3.3)$$

Finalmente, a partir de los datos de la **Tabla 3-2** y considerando lo obtenido en la ecuación (3.2), se dimensiona el banco de baterías de la siguiente manera:

$$Capacidad\ Banco\ Baterias_{min} = \frac{I_{nom,Elec} * T_{op,Elec}}{\eta_{bat}} \leq N_{bat} * C_{nom,bat} \dots (3.4)$$

Despejando N_{bat} de la ecuación (3.4), se obtiene:

$$N_{bat} \geq \frac{I_{nom,Elec} * T_{op,Elec}}{\eta_{bat} * C_{nom,bat}} \dots (3.5)$$

Luego, reemplazando los valores en la ecuación (3.5), se obtiene:

$$N_{bat} \geq \frac{108[A] * 12[h]}{0.95 * 500[Ah]} = 2.7284$$

Finalmente, se considera un $N_{bat} = 4$, cumpliendo así con lo establecido en la ecuación (3.5).

Como se observa más adelante, los 4 grupos de baterías se conectarán independientemente al bus DC a través de un convertidor Buck-Boost, ya que así se obtendrá un mejor desempeño del sistema.

Capítulo 4. Etapas del Sistema propuesto

4.1. Introducción

En este capítulo, se presentan los modelos matemáticos que se utilizan para determinar el comportamiento del sistema FV y de las baterías. Además, se muestran los modelos matemáticos de los convertidores que son utilizados en el sistema de acondicionamiento de potencia con sus respectivos lazos de control.

4.2. Módulo Fotovoltaico

4.1.1 Modelo Matemático

Para modelar el sistema FV se hace uso de la herramienta de Simulink, la cual tiene integrado un modelo de panel FV. Este corresponde al circuito equivalente mostrado en la **Figura 4-1**.

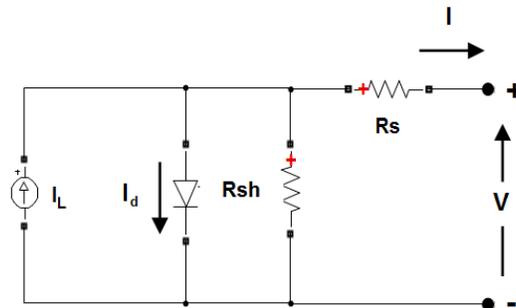


Figura 4-1: Topología del panel FV utilizada por Simulink [14].

La ecuación que describe la corriente a la salida del circuito equivalente de la **Figura 4-1** se muestra a continuación:

$$I = I_L(T, G) - I_0(T, G) \left\{ e^{\frac{V + IR_s}{n_s V_t}} - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \dots (4.1)$$

Donde:

- T =Temperatura.
- G =Irradiacion.
- I =Corriente de salida del módulo.
- $I_L(T, G)$ =Corriente fotogenerada en función de T y G.
- $I_0(T, G)$ =Corriente de saturación del diodo (en oscuridad) en función de T y G.
- V =Voltaje de salida del módulo.
- V_t =Voltaje térmico de juntura.

- R_s =Resistencia en serie del modelo.
- R_{sh} =Resistencia en paralelo del modelo.
- n_s =Número de celdas en serie dentro del módulo.

La resolución y obtención de las ecuaciones que describen las variables mostradas en la ecuación (4.1) se detallan en [5].

Como se mencionó anteriormente, se ocupa el mismo modelo que ya se encuentra integrado en Simulink. En la **Figura 4-2** se muestran los parámetros puestos en el bloque, que son los mismos que los detallados en la **Tabla 3-1** y que corresponden a los datos de placa del módulo seleccionado.

Figura 4-2: Parámetros utilizados para el modelo del arreglo FV a través del bloque “PV Array” de Simulink.

En el bloque de la **Figura 4-2**, los parámetros mostrados en la izquierda son los que son modificados por el usuario, mientras que los parámetros de la derecha son calculados por Simulink a partir de los datos ingresados.

4.1.2 Curvas Características

A continuación, en las **Figura 4-3** y **Figura 4-4** se muestran las curvas I-V y P-V a distintos valores de irradiancia y temperatura que son generadas por el bloque “PV Array” de Simulink.

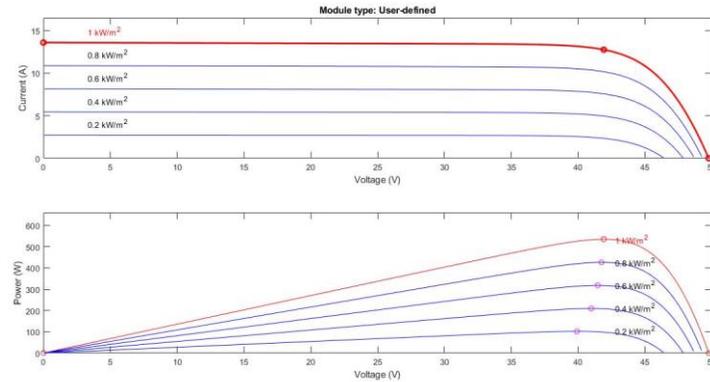


Figura 4-3: Curvas I-V y P-V de un módulo FV a distintos niveles de irradianción.

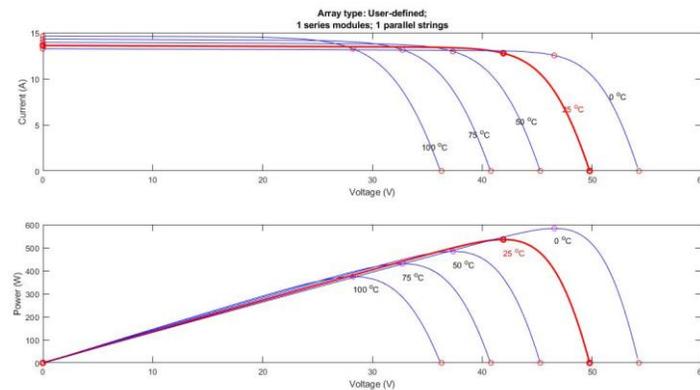


Figura 4-4: Curvas I-V y P-V de un módulo FV a distintos niveles de temperatura.

De la **Figura 4-3**, se puede observar que al variar la irradiancia del módulo FV las curvas I-V y P-V cambian notablemente. En particular, un aumento de la irradiancia hace que la corriente de cortocircuito del módulo aumente considerablemente, lo cual también se observa en el voltaje de circuito abierto, pero con una magnitud menor. Por lo anterior, al aumentar la irradiancia también aumentaremos la potencia que entrega el módulo.

De la **Figura 4-4**, se puede observar que al variar la temperatura del módulo FV las curvas I-V y P-V cambian notablemente. En particular, un aumento de la temperatura hace que el voltaje de circuito abierto del módulo disminuya considerablemente, lo cual no se observa en la corriente de cortocircuito, ya que esta aumenta levemente ante el aumento de temperatura. Lo anterior, da como resultado que incrementos de temperaturas produce decrementos en la potencia del módulo FV.

De las **Figura 4-3** y **Figura 4-4** se puede decir que al variar la irradiancia y temperatura del módulo FV se observa un cambio en el punto de máxima potencia. Para el caso, de la **Figura 4-3** el punto de máxima potencia sufre una gran variación de magnitud, pero no de voltaje. En cambio, en el caso de la **Figura 4-4** se observa que el punto de máxima potencia sufre un gran cambio en el voltaje, pero no tanto de magnitud.

La curva marcada en rojo en las **Figura 4-3** y **Figura 4-4** corresponde a la curva en que el módulo FV opera en STC, es decir para un $G = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $T = 25[^\circ C]$, donde se obtiene una potencia máxima entregada del módulo de aproximadamente $535[W]$, que es el valor dado por el fabricante. Finalmente, se puede apreciar que las curvas obtenidas en las **Figura 4-3** y **Figura 4-4** representan correctamente a las curvas dadas por el fabricante mostradas en la **Figura 3-3**, respectivamente.

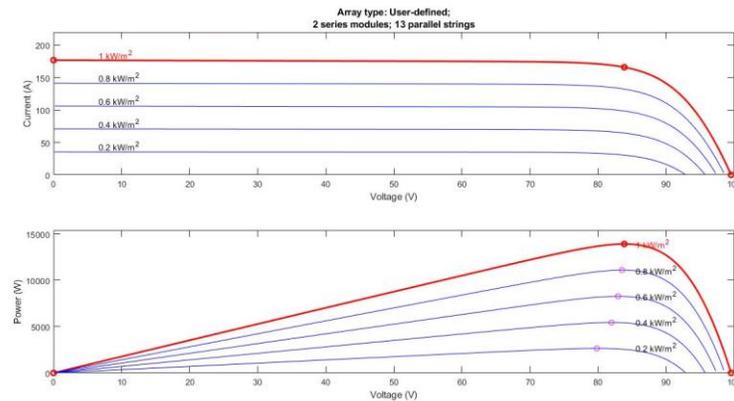


Figura 4-5: Curvas I-V y P-V del arreglo FV a distintos niveles de irradiancia.

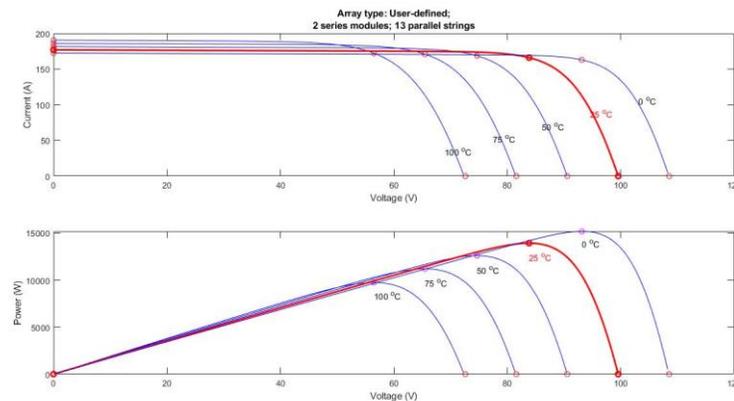


Figura 4-6: Curvas I-V y P-V del arreglo FV a distintos niveles de temperatura.

En las **Figura 4-5** y **Figura 4-6** se muestran las curvas del arreglo FV configurado según lo descrito en el capítulo anterior. Destacar que las variaciones de tensión, corriente y potencia serán proporcionales a las cadenas en serie y paralelo realizadas para obtener el arreglo FV, que en este caso son: 2 cadenas en serie de 13 módulos en paralelo.

Además, apreciar de las **Figura 4-5** y **Figura 4-6** que la curva roja (STC) tiene su punto de máxima potencia en las coordenadas $83.86[V]$ y $13.91[kW]$.

4.3. Convertidor Boost/Arreglo FV

4.3.1 Modelo del Convertidor

La topología del convertidor que se utiliza para hacer la interfase del sistema FV con el bus DC se muestra en la **Figura 4-7**.

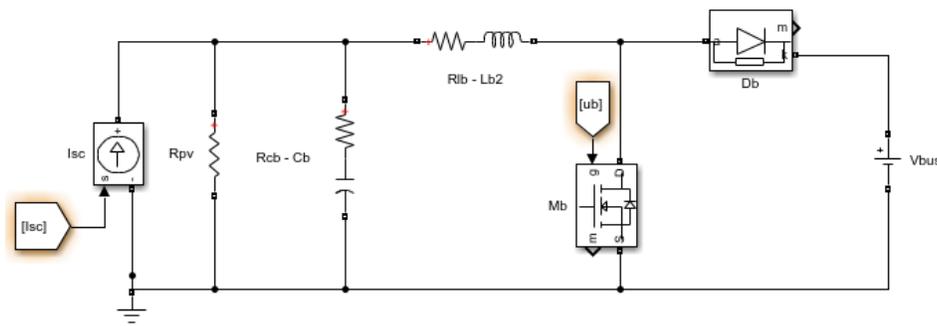


Figura 4-7: Topología de modelo arreglo FV linealizado conectado a un convertidor tipo Boost.

Como se puede observar en la **Figura 4-7**, se tiene una resistencia R_{pv} que es obtenida al linealizar el modelo del arreglo FV utilizando un equivalente Norton cuando este esté operando en su punto de máxima potencia.

El valor de este parámetro está definido de la siguiente manera:

$$R_{PV} = \frac{V_{MPPT}}{I_{SC} - I_{MPPT}} \dots (4.2)$$

En el Anexo A.2.1 se muestra el desarrollo de las ecuaciones diferenciales que representan el modelo del convertidor de la **Figura 4-7**. A continuación, solo se presenta el resultado.

Las ecuaciones diferenciales que representarán el modelo promediado del circuito de la **Figura 4-7**, serán:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_C + i_C R_C - i_L R_L - V_{bus}(1 - d)}{L_{PV}} \dots (4.3)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{R_{PV} * i_{SC} - R_{PV} * i_L - v_C}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} \dots (4.4)$$

Notar que, en estado estacionario se busca que las ecuaciones (4.3) y (4.4) sean igual a las del punto de máxima potencia, es decir:

$$I_L = I_{PV} = I_{MPPT} \dots (4.5); V_C = V_{PV} = V_{MPPT} \dots (4.6)$$

Luego, reemplazando las ecuaciones (4.5) y (4.6) en (4.3), se obtiene que en estado estacionario:

$$D = 1 - \frac{V_{MPPT} - I_{MPPT} * R_L}{V_{bus}} \dots (4.7)$$

Por otro lado, a partir de las ecuaciones (4.3) y (4.4), se pueden escribir las matrices de estado que representan al circuito de la **Figura 4-7**. En el Anexo A.2.2, se muestra el desarrollo para llegar a estas ecuaciones de estado.

Recordar que, un modelo representado en un espacio de estados tiene la forma:

$$\dot{x}(t) = A_{PV}x(t) + B_{PV}u(t) \dots (4.8)$$

$$y(t) = C_{PV}x(t) + D_{PV}u(t) \dots (4.9)$$

Luego, para este caso las matrices de estado son:

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \dots (4.10)$$

$$u = \begin{bmatrix} d \\ V_{bus} \\ i_{SC} \end{bmatrix} \dots (4.11)$$

$$y = [v_{PV}] \dots (4.12)$$

$$A_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{PV} * R_C}{L_{PV}(R_{PV} + R_C)} - \frac{R_L}{L_{PV}} & \frac{1}{L_{PV}} - \frac{R_C}{L_{PV}(R_{PV} + R_C)} \\ \frac{-R_{PV}}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} & \frac{-1}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} \end{bmatrix} \dots (4.13)$$

$$B_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{V_{bus}}{L_{PV}} & \frac{-(1-d)}{L_{PV}} & \frac{R_{PV} * R_C}{L_{PV}(R_{PV} + R_C)} \\ 0 & 0 & \frac{R_{PV}}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} \end{bmatrix} \dots (4.14)$$

$$C_{PV} = \left[R_C \left(\frac{-R_{PV}}{R_{PV} + R_C} \right) \quad 1 - \frac{R_C}{R_{PV} + R_C} \right] \dots (4.15)$$

$$D_{PV} = \left[0 \quad 0 \quad \frac{R_{PV} * R_C}{R_{PV} + R_C} \right] \dots (4.16)$$

Luego, las funciones de transferencia del sistema quedan dadas por:

$$G_{vd-pv}(s) = \frac{-(R_{PV}V_{bus}(C_{PV}R_Cs + 1))}{R_L + R_{PV} + L_{PV}s + C_{PV}L_{PV}R_Cs^2 + C_{PV}L_{PV}R_{PV}s^2 + C_{PV}R_C R_Ls + C_{PV}R_C R_{PV}s + C_{PV}R_L R_{PV}s} \dots (4.17)$$

$$G_{vbus-pv}(s) = \frac{-(R_{PV}(D - 1)(C_{PV}R_Cs + 1))}{R_L + R_{PV} + L_{PV}s + C_{PV}L_{PV}R_Cs^2 + C_{PV}L_{PV}R_{PV}s^2 + C_{PV}R_C R_Ls + C_{PV}R_C R_{PV}s + C_{PV}R_L R_{PV}s} \dots (4.18)$$

$$G_{visc-pv}(s) = \frac{-(R_{PV}(R_L + L_{PV}s)(C_{PV}R_Cs + 1))}{R_L + R_{PV} + L_{PV}s + C_{PV}L_{PV}R_Cs^2 + C_{PV}L_{PV}R_{PV}s^2 + C_{PV}R_C R_Ls + C_{PV}R_C R_{PV}s + C_{PV}R_L R_{PV}s} \dots (4.19)$$

4.3.2 Diseño del Convertidor

A partir de las ecuaciones vistas en el punto anterior, se realiza el diseño del convertidor Boost para realizar la interfase del sistema FV.

A continuación, se hace el cálculo de los elementos pasivos del convertidor, para lo cual se definen los parámetros de diseño que son mostrados en la **Tabla 4-1**.

Tabla 4-1: Valores de los parámetros utilizados en el convertidor Boost de la Figura 4-7.

Parámetro	Descripción	Valor
$V_{MPPT,max}$	Voltaje de entrada al convertidor Boost referido a un $G = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $T = 25^\circ C$	83.86[V]
$V_{MPPT,min}$	Voltaje de entrada al convertidor Boost referido a un $G = 50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $T = 25^\circ C$	74.71[V]
$I_{MPPT,max}$	Corriente de entrada al convertidor Boost referido a un $G = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $T = 25^\circ C$	165.88[A]
$I_{MPPT,min}$	Corriente de entrada al convertidor Boost referido a un $G = 50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $T = 25^\circ C$	8.28[A]
V_{bus}	Voltaje de salida del convertidor	100[V]
f_{sw}	Frecuencia de conmutación de switch del convertidor	50[kHz]
$\frac{\Delta V_C}{V_C}$	Rizado de voltaje en el capacitor	$\leq 1\%$

A partir de los datos entregados en la **Tabla 4-1** y la ecuación (4.7), se pueden calcular los ciclos de trabajo mínimo y máximo del convertidor.

$$D_{PV,max} = 1 - \frac{V_{MPPT,max} - I_{MPPT,max} * R_L}{V_{bus}} = 1 - \frac{83.86 - 165.88 * 200m}{100} = 0.4932 \quad \dots (4.20)$$

$$D_{PV,min} = 1 - \frac{V_{MPPT,min} - I_{MPPT,min} * R_L}{V_{bus}} = 1 - \frac{74.71 - 8.28 * 200m}{100} = 0.2695 \quad \dots (4.21)$$

Luego, las ecuaciones que definen los valores mínimos de los elementos pasivos se encuentran a continuación (ver [6] y [7]).

$$L_{min} = \frac{V_{MPPT} * D}{2 * I_{MPPT} * f_{SW}} \quad \dots (4.22) ; C_R = \frac{V_{MPPT} * D^2}{8 * L_{PV} * \Delta V_{PV} * f_{SW}^2} \quad \dots (4.23)$$

Notar que, la ecuación (4.22) indica la inductancia mínima para la cual el convertidor trabaja en MCC. En cambio, la ecuación (4.23) indica el valor de capacitancia que cumple con el porcentaje de rizado indicado en la **Tabla 4-1**.

A continuación, se reemplazan los valores de ciclo de trabajo en las ecuaciones (4.22) y (4.23), obteniendo:

$$L_{min,PV-1} = \frac{83.86 * 0.4932}{2 * 165.88 * 50k} = 2.4934[\mu H]$$

$$L_{min,PV-2} = \frac{74.71 * 0.2695}{2 * 8.28 * 50k} = 24.3168[\mu H]$$

$$C_{R,PV-1} = \frac{83.86 * 0.4932^2}{8 * 100\mu * 83.86 * 0.01 * 50k^2} = 12.1623[\mu F]$$

$$C_{R,PV-2} = \frac{74.71 * 0.2695^2}{8 * 100\mu * 74.71 * 0.01 * 50k^2} = 3.6315[\mu F]$$

Luego, se eligen los valores mayores obtenidos y nos queda que para el diseño se debe cumplir que:

$$L_{PV} > L_{min,PV-2} = 24.3168[\mu H] ; C_{PV} \geq C_{R,PV-1} = 12.1623[\mu F]$$

Finalmente, se eligen los valores comerciales de inductores y capacitores, siendo considerados los siguientes:

$$L_{PV} = 100[\mu H] ; C_{PV} = 100[\mu F]$$

4.3.3 Algoritmo MPPT

El control implementado para seguir el punto de máxima potencia del arreglo FV es el llamado algoritmo MPPT del tipo perturbar y observar (P&O), ya que se puede aplicar con facilidad con unas simples líneas de código.

El funcionamiento de este algoritmo es el de observar cada cierto tiempo de muestreo la pendiente de potencia $\frac{dP}{dV}$ de la siguiente manera:

$$\frac{dP}{dV} = \begin{cases} > 0 & \text{si } V < V_{MPPT} \\ = 0 & \text{si } V = V_{MPPT} \\ < 0 & \text{si } V > V_{MPPT} \end{cases} \dots (4.24)$$

El diagrama de flujo que se utiliza para la implementación del algoritmo se muestra en la **Figura 4-8**. Primeramente, se miden los valores de voltaje y corriente para calcular la potencia, luego se compara cada parámetro con el valor entregado de la iteración anterior. En base a la variación de los parámetros ΔP y ΔV , se decrementará o incrementará el valor de voltaje de referencia en un factor ΔV_{ref} .

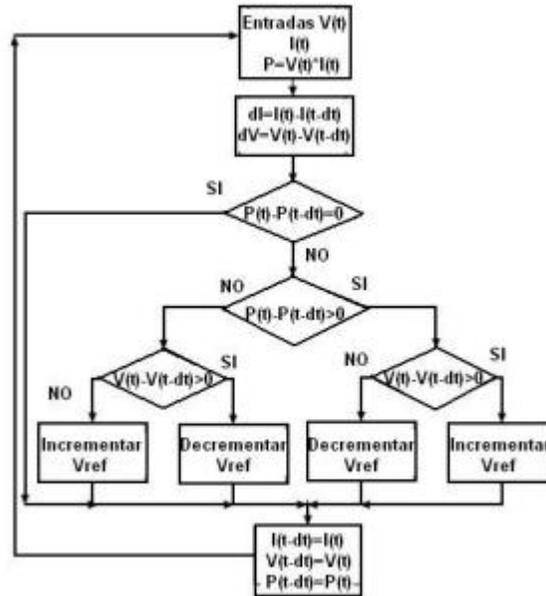


Figura 4-8: Algoritmo MPPT de control de Vref.

En el Anexo A.2.3, se muestra la implementación en código del algoritmo MPPT de la **Figura 4-8**.

4.3.4 Esquema de Control

A continuación, se procede a diseñar y sintonizar el lazo de control que tiene como objetivo seguir el voltaje de referencia que será entregado por el algoritmo MPPT diseñado en la sección 4.3.3 del presente capítulo.

La función de transferencia que relaciona el voltaje de salida del convertidor y el ciclo de trabajo se muestra en la ecuación (4.25), la cual se obtiene reemplazando los valores de la **Tabla 4-1** en la ecuación (4.17).

$$G_{vd-PV}(s) = \frac{-1.949e05s - 9.746e09}{s^2 + 5218s + 1e08} \dots (4.25)$$

Notar que, la FT de la ecuación (4.25) tiene una ganancia negativa, por lo que para que el sistema sea estable en lazo cerrado se deberá agregar un controlador que también tenga una ganancia negativa, ya que de otra forma tendríamos un sistema inestable en lazo cerrado al tener polos en el semiplano derecho.

Primeramente, se observa el ancho de banda en que la función de transferencia representa correctamente al convertidor. Para ello, se utiliza el software Psim el cual permite obtener el diagrama de bode del circuito y así poder compararlo con el diagrama de bode de la función de transferencia obtenida en (4.25). El resultado de esta comparación se muestra en la **Figura 4-9**.

En el Anexo A.2.4, se muestra el circuito que fue implementado en Psim para obtener la función de transferencia $G_{vd-PV}(s)$ a través del convertidor Boost diseñado.

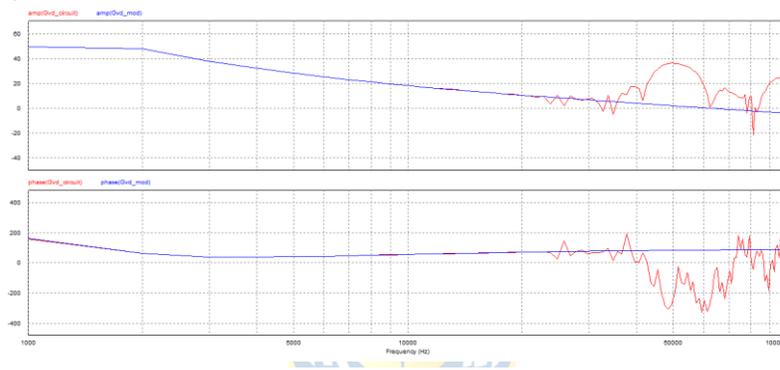


Figura 4-9: Resultado de comparación de las funciones de transferencia del circuito y modelo realizada en Psim.

Observando lo obtenido en la **Figura 4-9**, se puede concluir que la FT de la ecuación (4.25) representa correctamente al circuito hasta los 20[kHz], por lo que se debe tener este valor en cuenta a la hora de diseñar el controlador. En particular, se sintoniza el controlador en base a criterios de ancho de banda y factor de amortiguamiento.

Por lo tanto, los criterios de diseño que se exigen que cumpla el controlador son los siguientes:

- Un ancho de banda $BW_{PV} \leq 20[kHz]$, por la razón explicada anteriormente.
- Un factor de amortiguamiento $\zeta_{PV} = 0.6$, ya que así se obtiene un sistema más robusto a las variaciones de los parámetros del panel FV.

Luego, con la ayuda de la herramienta “sisotool” de Matlab se procede a diseñar y sintonizar el controlador que se implementará en el convertidor. En particular, se ajustan los criterios antes explicados para un controlador PI, obteniendo así lo mostrado en la **Figura 4-10**.

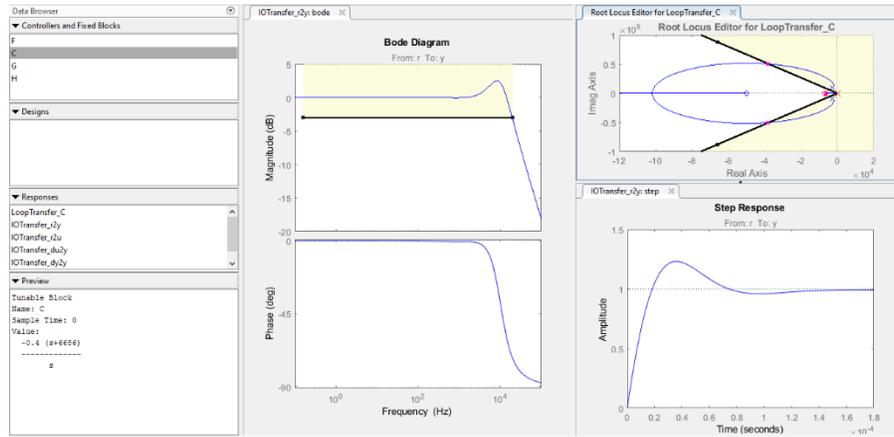


Figura 4-10: Resultados del ajuste del sistema del control de voltaje del convertidor Boost.

Como se puede observar en la **Figura 4-10**, tanto el criterio de ancho de banda y amortiguamiento son satisfechos. Luego, los parámetros del controlador PI son:

$$C(s) = P + \frac{I}{s} = \frac{a(s + b)}{s} \dots (4.26)$$

Donde:

$$P = a \dots (4.27) ; I = ab \dots (4.28)$$

Considerando lo anterior y lo observado en la **Figura 4-10**, el controlador tendrá la forma $C_{PV}(s) = \frac{-0.4(s+6686)}{s}$, donde se obtiene que:

$$P_{PV} = -0.4 ; I_{PV} = -0.4 * 6686 = -2674.4$$

Finalmente, el controlador PI para el convertidor Boost de la **Figura 4-10** queda de la siguiente manera:

$$C_{PV}(s) = -0.4 + \frac{-2674.4}{s}$$

4.4. Convertidor Buck–Boost/Batería

4.4.1 Modelo del Convertidor

Para hacer la interfase del banco de baterías con el bus DC común se propone la utilización de un convertidor Buck-Boost (**Figura 4-11**) de forma de permitir un flujo bidireccional de potencia y así poder cargar y descargar el almacenamiento de energía.

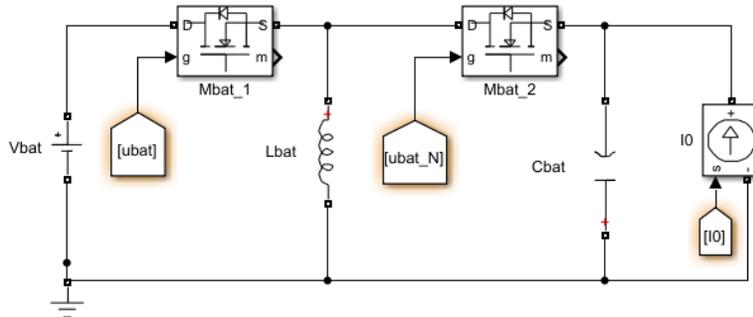


Figura 4-11: Topología de convertidor tipo Buck-Boost conectado a una fuente de corriente ideal.

En el Anexo A.3.1 se muestra el desarrollo de las ecuaciones diferenciales que representan el modelo matemático del circuito de la **Figura 4-11**. A continuación, solo se presenta el resultado.

Las ecuaciones diferenciales que representan el modelo promediado del circuito de la **Figura 4-11**, son:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{bat} * d - v_C(1 - d)}{L_{bat}} \quad \dots (4.29)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L(1 - d) - i_0}{C_{bat}} \quad \dots (4.30)$$

En estado estacionario las ecuaciones (4.29) y (4.30) tienen los siguientes valores:

$$D = \frac{V_C}{V_C + V_{bat}} \quad \dots (4.31) ; I_L = \frac{I_0}{(1 - D)} \quad \dots (4.32)$$

Por otro lado, a partir de las ecuaciones (4.29) y (4.30), se pueden escribir las matrices de estado que representan al circuito de la **Figura 4-11**. En el Anexo A.3.2, se muestra el desarrollo para llegar a estas ecuaciones de estado.

El modelo representado en un espacio de estado tiene la forma:

$$\dot{x}(t) = A_{bat}x(t) + B_{bat}u(t) \quad \dots (4.33)$$

$$y(t) = C_{bat}x(t) + D_{bat}u(t) \quad \dots (4.34)$$

Luego, para este caso las matrices de estado son:

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \dots (4.35)$$

$$u = \begin{bmatrix} d \\ V_{bat} \\ i_0 \end{bmatrix} \dots (4.36)$$

$$y_1 = [i_L] \dots (4.37)$$

$$y_2 = [v_C] \dots (4.38)$$

$$A_{bat} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L_{bat}} \\ \frac{1-D}{C_{bat}} & 0 \end{bmatrix} \dots (4.39)$$

$$B_{bat} = \begin{bmatrix} \frac{V_{bat} + V_C}{L_{bat}} & \frac{D}{L_{bat}} & 0 \\ -\frac{I_L}{C_{bat}} & 0 & -\frac{1}{C_{bat}} \end{bmatrix} \dots (4.40)$$

$$C_{bat,1} = [1 \ 0] \dots (4.41)$$

$$C_{bat,2} = [0 \ 1] \dots (4.42)$$

$$D_{bat} = [0 \ 0 \ 0] \dots (4.43)$$

Luego, se pueden construir las funciones de transferencia del sistema, las cuales se presentan a continuación:

$$G_{id-bat}(s) = \frac{I_L - DI_L + C_{bat}V_Cs + C_{bat}V_{bat}s}{D^2 - 2D + C_{bat}L_{bat}s^2 + 1} \dots (4.44)$$

$$G_{iV_{bat}-bat}(s) = \frac{C_{bat}Ds}{D^2 - 2D + C_{bat}L_{bat}s^2 + 1} \dots (4.45)$$

$$G_{iI_0-bat}(s) = \frac{-(D-1)}{D^2 - 2D + C_{bat}L_{bat}s^2 + 1} \dots (4.46)$$

$$G_{vd-bat}(s) = \frac{-(DV_C - V_{bus} - V_C + DV_{bus} + I_L L_{bat} s)}{D^2 - 2D + C_{bat}L_{bat}s^2 + 1} \dots (4.47)$$

$$G_{vVbat-bat}(s) = \frac{-(D(D-1))}{D^2 - 2D + C_{bat}L_{bat}s^2 + 1} \dots (4.48)$$

$$G_{vI0-bat}(s) = \frac{-(L_{bat}s)}{D^2 - 2D + C_{bat}L_{bat}s^2 + 1} \dots (4.49)$$

Como el objetivo es controlar el voltaje de salida, es decir el voltaje del condensador “ C_{bat} ”, interesa estudiar la función de transferencia G_{vd-bat} , la cual como se puede ver en la ecuación (4.47) presenta un cero en el semi plano derecho, es decir que es de fase no mínima. Entonces, para evitar esto se tiene que controlar la corriente del inductor “ L_{bat} ”, el cual tiene una función de transferencia G_{id-bat} , la cual como se puede observar en la ecuación (4.44) tiene un cero, pero en el semiplano izquierdo.

4.4.2 Diseño del Convertidor

A partir de las ecuaciones vistas en la sección anterior se diseña el convertidor.

A continuación, se hace el cálculo de los elementos pasivos del convertidor, para lo cual se definen los parámetros de diseño que son mostrados en la **Tabla 4-2**.

Tabla 4-2: Valores de los parámetros utilizados en el convertidor Buck-Boost de la Figura 4-11.

Parámetro	Descripción	Valor
$V_{bat,max}$	Voltaje máximo en la batería	57.6[V]
$V_{bat,min}$	Voltaje mínimo en la batería	40[V]
I_0	Corriente de salida en operación normal del convertidor	13[A]
f_{sw}	Frecuencia de conmutación de switch del convertidor	50[kHz]
V_{bus}	Voltaje en la salida del convertidor	100[V]
$\frac{\Delta V_C}{V_C}$	Rizado de voltaje en el capacitor	$\leq 2\%$

A partir de los datos entregados en la **Tabla 4-2** y la ecuación (4.31), se pueden calcular los ciclos de trabajo mínimo y máximo del convertidor.

$$D_{bat,max} = \frac{V_C}{V_C + V_{bat,min}} = \frac{100}{100 + 40} = 0.7143 \dots (4.50)$$

$$D_{bat,min} = \frac{V_C}{V_C + V_{bat,max}} = \frac{100}{100 + 57.6} = 0.6345 \dots (4.51)$$

Luego, las ecuaciones que definirán los valores mínimos de los elementos pasivos se encuentran a continuación (ver [8]).

$$L_{min} = \frac{V_{bus}(1 - D_{bat,min})^2}{2 * I_0 * f_{sw}} \dots (4.52) ; C_R = \frac{V_{bus} * D_{bat,max}}{2 * \frac{\Delta V_C}{V_C} * V_C * f_{sw} * \frac{V_{bus}}{I_0}} \dots (4.53)$$

Notar que, la ecuación (4.52) indica la inductancia mínima para la cual el convertidor trabaja en MCC. En cambio, la ecuación (4.53) indica el valor de capacitancia que cumple con el porcentaje de rizado indicado en la **Tabla 4-2**.

A continuación, se reemplazan los valores de ciclo de trabajo en las ecuaciones (4.52) y (4.53):

$$L_{min,bat} = \frac{100(1 - 0.6345)^2}{2 * 13 * 50k} = 10.2762[\mu H]$$

$$C_{R,bat} = \frac{100 * 0.7143}{2 * 0.02 * 100 * 50k * \frac{100}{13}} = 46.4295[\mu F]$$

Luego, se eligen los valores mayores obtenidos y queda que para el diseño se debe cumplir que:

$$L_{bat} > L_{min,bat} = 10.2762[\mu H] ; C_{bat} \geq C_{R,bat} = 46.4295[\mu F]$$

Finalmente, se eligen los valores comerciales de inductores y capacitores, siendo seleccionados los siguientes:

$$L_{bat} = 18[\mu H] ; C_{bat} = 100[\mu F]$$

4.4.3 Esquema de Control

A continuación, se procede a diseñar y sintonizar el lazo de control que tendrá como objetivo mantener constante el voltaje del bus DC.

Como se comentó en la sección 4.4.1, primero se debe realizar el lazo de control interno de corriente, ya que la FT G_{vd-bat} es de fase no mínima.

Luego, la función de transferencia que relaciona la corriente en el inductor del convertidor y el ciclo de trabajo se muestra en la ecuación (4.54), la cual se obtiene reemplazando los valores de la **Tabla 4-2** en la ecuación (4.44).

$$G_{id-bat}(s) = \frac{8.4e06s + 7.222e09}{s^2 + 6.37e07} \dots (4.54)$$

Al igual que en el convertidor Boost, primeramente, se observa el ancho de banda en que la función de transferencia representa correctamente al convertidor. Para ello, se utiliza el software Psim que nos permite obtener el diagrama de bode del circuito y así poder compararlo con el diagrama de bode de la función de transferencia obtenida en (4.54). El resultado se muestra en la **Figura 4-12**.

En el Anexo A.3.3 se muestra el circuito que fue implementado en Psim para obtener la función de transferencia $G_{id-bat}(s)$ a través del convertidor Buck-Boost diseñado.

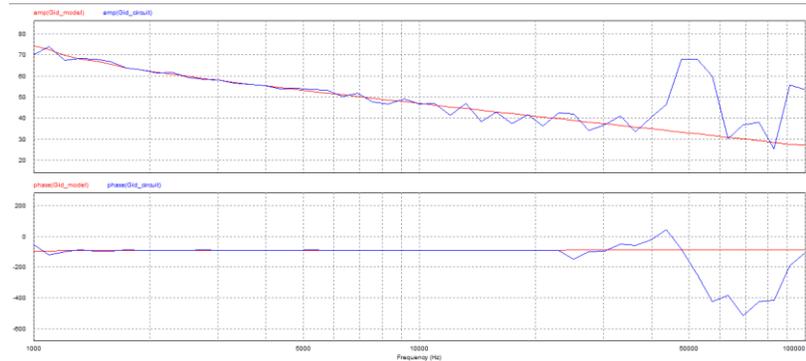


Figura 4-12: Resultado de comparación de las funciones de transferencia del circuito y modelo realizada en Psim.

Observando lo obtenido en la **Figura 4-12**, se puede concluir que la FT de la ecuación (4.54) representa correctamente al circuito hasta los 20[kHz], por lo que se debe tener este valor en cuenta a la hora de diseñar el controlador. En particular, se sintonizará el controlador en base a criterios de ancho de banda y factor de amortiguamiento.

Por lo tanto, los criterios de diseño que se exigen que cumpla el controlador son los siguientes:

- Un ancho de banda $BW_{bat,i} \leq 20[kHz]$, por la razón explicada anteriormente.
- Un factor de amortiguamiento $\zeta_{bat,i} = 0.7$, ya que así se obtiene un sistema más robusto a las variaciones de los parámetros del convertidor.

Luego, con la ayuda de la herramienta “sisotool” de Matlab se procede a diseñar y sintonizar el controlador que se implementará en el convertidor. En particular, se ajustan los criterios antes explicados para un controlador PI, obteniendo así lo mostrado en la **Figura 4-13**.

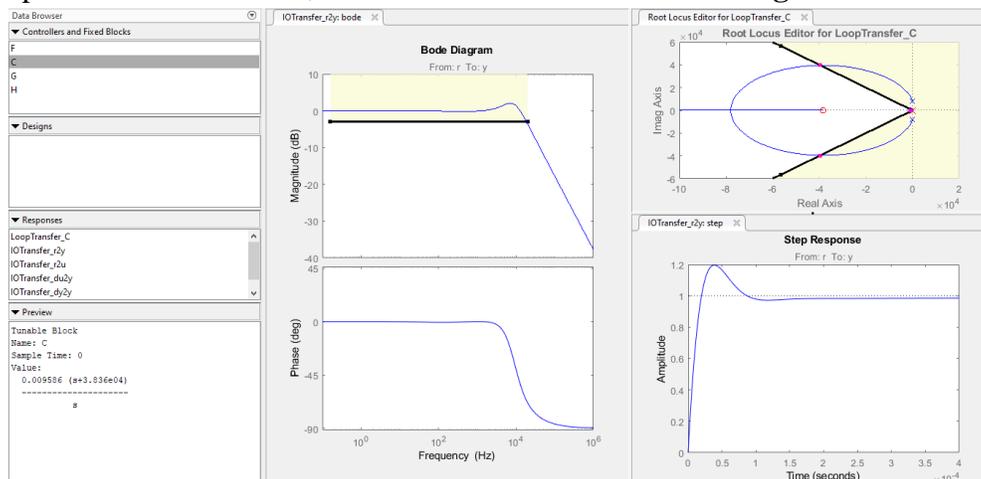


Figura 4-13: Resultados del ajuste del sistema del control de corriente del convertidor Buck-Boost.

Considerando lo anterior y lo observado en la **Figura 4-13**, el controlador tendrá la forma $C_{bat,i}(s) = \frac{0.009586 (s+3.836e04)}{s}$, donde se obtiene que:

$$P_{bat,i} = 0.009586 ; I_{bat,i} = 0.009586 * 3.836e04 = 367.719$$

Finalmente, el controlador PI para el convertidor Buck-Boost de la **Figura 4-13** queda de la siguiente manera:

$$C_{bat,i}(s) = 0.009586 + \frac{367.719}{s}$$

Ahora que se tiene el control interno de corriente, el modelo matemático del convertidor se puede simplificar como se muestra en la **Figura 4-14**.

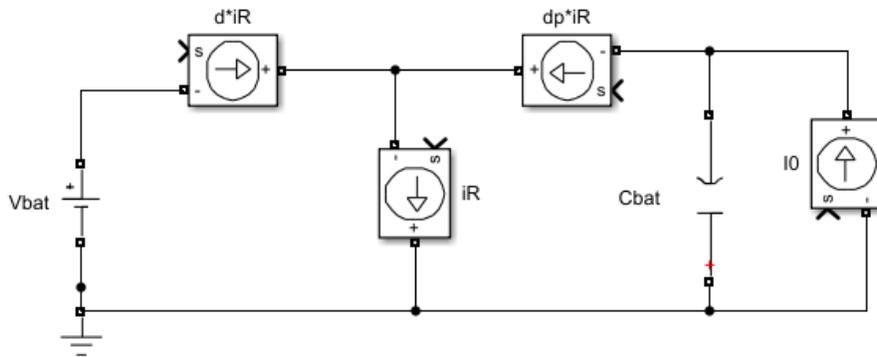


Figura 4-14: Modelo Matemático simplificado obtenido a partir de la Figura 4-11.

Notar que, la variable i_R del circuito de la **Figura 4-14** representa la señal de corriente de referencia en el lazo de corriente interno.

Luego, se puede proceder de la siguiente manera para encontrar la FT que relaciona el voltaje de salida con la corriente de referencia ($G_{viR-bat}$).

Tenemos que la ecuación diferencial que representa al circuito de la **Figura 4-14** es:

$$C_{bat} \frac{dV_C}{dt} = d_p * i_R - i_0 \quad \dots (4.55)$$

Luego, se aplica la transformada de Laplace en (4.55) y se obtiene lo siguiente:

$$C_{bat} * s * V_C = d_p * I_R(s) - I_0(s) \quad \dots (4.56)$$

Finalmente despejando (6.56), se obtiene:

$$G_{viR-bat}(s) = \frac{V_C(s)}{I_R(s)} = \frac{D_p}{C_{bat} * s} \quad \dots (4.57)$$

Reemplazando los valores de la **Tabla 4-2** en la ecuación (4.57), se obtiene:

$$G_{viR-bat}(s) = \frac{0.3386}{0.0001 * s}$$

Antes de empezar a realizar el control de voltaje del convertidor, se verifica en que rango de frecuencia la FT en lazo cerrado de lazo interno de corriente se comporta prácticamente como una ganancia unitaria. Para ello, se gráfica el diagrama de bode de lazo cerrado de corriente.

La ecuación que representa FT el lazo cerrado del control de corriente se muestra a continuación:

$$G_{LC,i}(s) = \frac{C_{bat,i}(s) * G_{id-bat}(s)}{1 + C_{bat,i}(s) * G_{id-bat}(s)} \dots (4.58)$$

$$G_{LC,i}(s) = \frac{8.052e04 s^5 + 3.158e09 s^4 + 7.785e12 s^3 + 2.012e17 s^2 + 1.692e20 s}{s^6 + 8.052e04 s^5 + 3.285e09 s^4 + 7.785e12 s^3 + 2.052e17 s^2 + 1.692e20 s} \dots (4.59)$$

Luego, se gráfica el diagrama de bode representado por $G_{LC,i}(s)$, obteniendo la **Figura 4-15**.

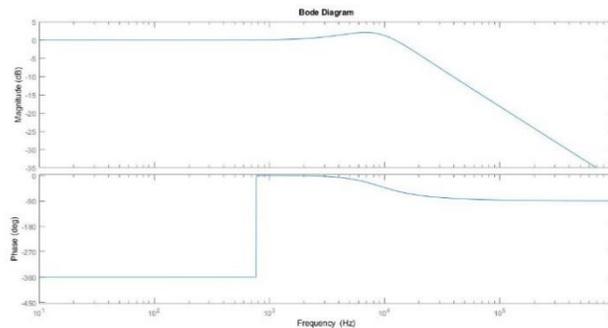


Figura 4-15: Diagrama de bode obtenido a partir de la FT $G_{LC,i}(s)$.

De la **Figura 4-15**, se puede observar que la FT se comporta como una ganancia unitaria hasta una frecuencia aproximada de 1[kHz], por lo que para el diseño del controlador de voltaje se debe tener en cuenta este criterio de diseño.

Antes de comenzar con el diseño y sintonización del control de voltaje, se debe tener en cuenta que se está haciendo un control en cascada, ya que se tiene un control interno de corriente y un control externo de voltaje, y como ya se sabe de la teoría de sistema de control el lazo interno debería ser más rápido que el lazo externo. Por lo que, otro criterio que se toma en cuenta a la hora de diseñar el control de voltaje es que el lazo de control interno de corriente sea a lo menos 10 veces más rápido que el lazo de control externo de voltaje.

Por lo explicado anteriormente, los criterios de diseño que se exigen que cumpla el controlador son los siguientes:

- Un ancho de banda $BW_{bat,v} \leq 1[kHz]$, por la razón explicada anteriormente.

- Un factor de amortiguamiento $\zeta_{bat,v} = 0.7$, ya que así se obtiene un sistema más robusto a las variaciones de los parámetros del convertidor.
- Que la respuesta del sistema sea 50 veces más lenta en comparación con la respuesta del lazo de control de corriente.

Luego, con la ayuda de la herramienta “sisotool” de Matlab se procede a diseñar y sintonizar el controlador que se implementará en el convertidor. En particular, se ajustan los criterios antes explicados para un controlador PI, obteniendo así lo mostrado en la **Figura 4-16**.

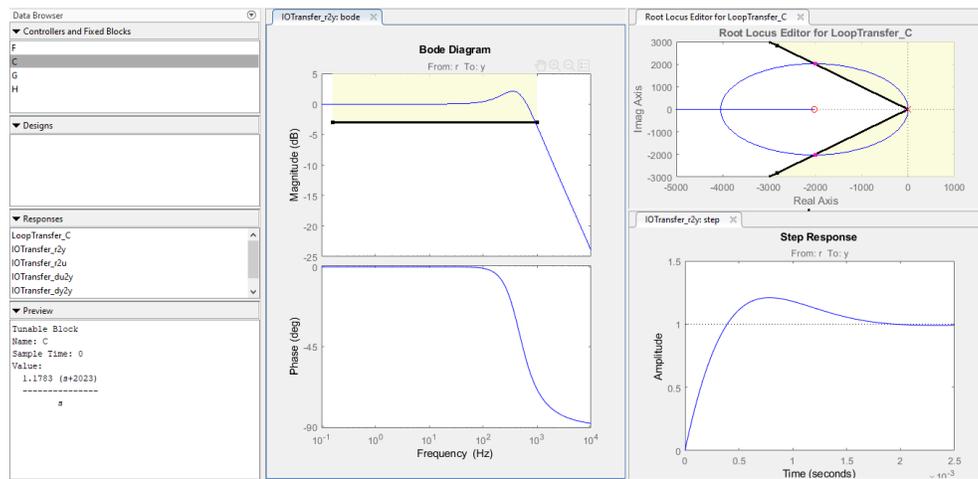


Figura 4-16: Resultados del ajuste del sistema del control de voltaje del convertidor Buck-Boost.

Considerando lo anterior y lo observado en la **Figura 4-16**, el controlador tiene la forma $C_{bat,v}(s) = \frac{1.1783(s+2023)}{s}$, donde se obtiene que:

$$P_{bat,v} = 1.1783 ; I_{bat,v} = 1.1783 * 2023 = 2383.7$$

Finalmente, el controlador PI para el convertidor Buck-Boost de la **Figura 4-16** queda de la siguiente manera:

$$C_{bat,v}(s) = 1.1783 + \frac{2383.7}{s}$$

4.5. Convertidor Buck-Boost/Carga

4.5.1 Modelo Matemático

Para hacer la interfase con el electrolizador, se utiliza un convertidor Buck-Boost (**Figura 4-17**) de manera de regular su tensión de alimentación y mantenerla constante en el valor deseado.

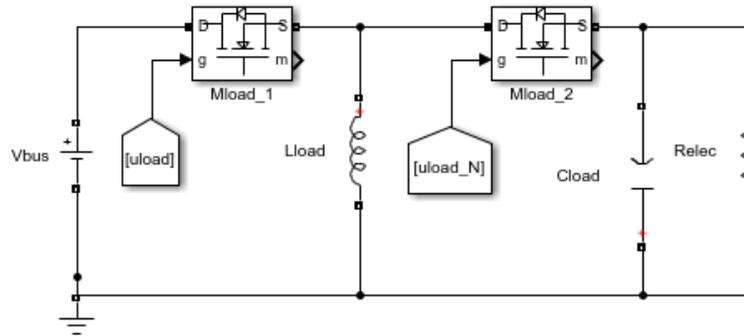


Figura 4-17: Topología de un convertidor tipo Buck-Boost conectado a una resistencia.

En el Anexo A.4.1, se muestra el desarrollo de las ecuaciones diferenciales que representan el modelo matemático del circuito de la **Figura 4-17**. A continuación, solo se presentará el resultado.

Las ecuaciones diferenciales que representan el modelo promediado del circuito de la **Figura 4-17**, son:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{bus} * d - v_C(1 - d)}{L_{load}} \dots (4.60)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L(1 - d) - \frac{v_C}{R}}{C_{load}} \dots (4.61)$$

En estado estacionario se tiene que las ecuaciones (4.60) y (4.61) tienen los siguientes valores:

$$D = \frac{V_C}{V_C + V_{bus}} \dots (4.62) ; I_L = \frac{V_C}{R(1 - D)} \dots (4.63)$$

Por otro lado, a partir de las ecuaciones (4.60) y (4.61), se pueden escribir las matrices de estado que representan al circuito de la **Figura 4-17**. En el Anexo A.4.2, se muestra el desarrollo para llegar a estas ecuaciones de estado.

El modelo representado en un espacio de estado tiene la forma:

$$\dot{x}(t) = A_{load}x(t) + B_{load}u(t) \dots (4.64)$$

$$y(t) = C_{load}x(t) + D_{load}u(t) \dots (4.65)$$

Luego, para este caso las matrices de estado son:

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \dots (4.66)$$

$$u = \begin{bmatrix} d \\ V_{bus} \end{bmatrix} \dots (4.67)$$

$$y_1 = [i_L] \dots (4.68)$$

$$y_2 = [v_C] \dots (4.69)$$

$$A_{load} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L_{load}} \\ \frac{1-D}{C_{load}} & -\frac{1}{C_{load}R} \end{bmatrix} \dots (4.70)$$

$$B_{load} = \begin{bmatrix} \frac{V_{bus} + V_C}{L_{load}} & \frac{D}{L_{load}} \\ -\frac{I_L}{C_{load}} & 0 \end{bmatrix} \dots (4.71)$$

$$C_{load,1} = [1 \ 0] \dots (4.72)$$

$$C_{load,2} = [0 \ 1] \dots (4.73)$$

$$D_{load} = [0 \ 0] \dots (4.74)$$

Luego, se pueden construir las funciones de transferencia del sistema, las cuales se presentan a continuación:

$$G_{id-load}(s) = \frac{V_C + V_{bus} + I_L R - I_L R D + C_{load} R V_C s + C_{load} R V_{bus} s}{R D^2 - 2 R D + C_{load} L_{load} R s^2 + L_{load} s + R} \dots (4.75)$$

$$G_{iV_{bus}-load}(s) = \frac{(D(C_{load} R s + 1))}{R D^2 - 2 R D + C_{load} L_{load} R s^2 + L_{load} s + R} \dots (4.76)$$

$$G_{vd-load}(s) = \frac{-(R(V_C D - V_{bus} - V_C + V_{bus} D + I_L L_{load} s))}{R D^2 - 2 R D + C_{load} L_{load} R s^2 + L_{load} s + R} \dots (4.77)$$

$$G_{vV_{bus}-load}(s) = \frac{-(R D (D - 1))}{R D^2 - 2 R D + C_{load} L_{load} R s^2 + L_{load} s + R} \dots (4.78)$$

Como el objetivo de este bloque es controlar el voltaje de salida, es decir el voltaje del condensador “ C_{load} ”, interesa estudiar la función de transferencia $G_{vd-load}$, la cual como se puede ver en la

ecuación (4.77) presenta un cero en el semi plano derecho, es decir que es de fase no mínima. Entonces, para evitar esto se tendrá que controlar la corriente del inductor “ L_{load} ”, el cual tiene una función de transferencia $G_{id-load}$, la cual como se puede observar en la ecuación (4.75) tiene un cero, pero en el semiplano izquierdo.

4.5.2 Diseño del Convertidor

En base a las ecuaciones anteriores, se hace el cálculo de los elementos pasivos del convertidor, para lo cual se definen los parámetros de diseño que son mostrados en la **Tabla 4-3**.

Tabla 4-3: Valores de los parámetros utilizados en el convertidor Buck-Boost de la Figura 4-17.

Parámetro	Descripción	Valor
V_{bus}	Voltaje en la salida del convertidor	100[V]
V_0	Voltaje salida del convertidor	48[V]
R_{elec}	Resistencia equivalente del electrolizador en el punto de operación óptimo	0.4444[Ω]
f_{sw}	Frecuencia de conmutación de switch del convertidor	50[kHz]
$\frac{\Delta V_C}{V_C}$	Rizado de voltaje en el capacitor	≤ 0.2%

A partir de los datos entregados en la **Tabla 4-3** y la ecuación (4.62), se puede calcular el ciclo de trabajo del convertidor.

$$D_{load} = \frac{V_C}{V_C + V_{bus}} = \frac{48}{48 + 100} = 0.3243 \quad \dots (4.79)$$

Luego, las ecuaciones que nos definen los valores mínimos de los elementos pasivos se encuentran a continuación (ver [8]).

$$L_{min} = \frac{R_{elec}(1 - D_{load})^2}{2 * f_{sw}} \quad \dots (4.80) ; C_R = \frac{V_C * D_{load}}{2 * \frac{\Delta V_C}{V_C} * V_C * f_{sw} * R_{elec}} \quad \dots (4.81)$$

Notar que, la ecuación (4.80) indica la inductancia mínima la cual el convertidor trabaja en MCC. En cambio, la ecuación (4.81) indica el valor de capacitancia que cumple con el porcentaje de rizado indicado en la **Tabla 4-3**.

A continuación, se reemplazan los valores de ciclo de trabajo en las ecuaciones (4.80) y (4.81):

$$L_{min,load} = \frac{0.4444(1 - 0.3243)^2}{2 * 50k} = 2.029[\mu H]$$

$$C_{R,load} = C_R = \frac{48 * 0.3243}{2 * 0.002 * 48 * 50k * 0.4444} = 3.6487[mF]$$

Luego, se eligen los valores mayores obtenidos y queda que para el diseño se deberá cumplir que:

$$L_{load} > L_{min,load} = 2.029[\mu H] ; C_{load} \geq C_{R,load} = 3.6487[mF]$$

Finalmente, se eligen los valores comerciales de inductores y capacitores. Siendo los seleccionados los siguientes:

$$L_{load} = 100[\mu H] ; C_{load} = 15[mF]$$

4.5.3 Esquema de Control

Como la carga corresponde al electrolizador, se tienen las opciones de poder controlar el voltaje o corriente (ver **Figura 2-2**) de salida del convertidor, pero debido a que para posteriores simulaciones se harán pruebas de desconexión de carga, conviene controlar el voltaje de salida del convertidor al punto de operación óptimo del electrolizador.

A continuación, se procede a diseñar y sintonizar el lazo de control que tiene como objetivo mantener constante el voltaje de salida del convertidor.

Al igual como se realizó en la sección 4.4.3, primero se realiza un lazo de control interno de corriente, ya que la FT $G_{vd-load}$ es de fase no mínima.

Luego, la función de transferencia que relaciona la corriente en el inductor del convertidor y el ciclo de trabajo se muestra en la ecuación (4.82), la cual se obtiene reemplazando los valores de la **Tabla 4-3** en la ecuación (4.75).

$$G_{id-load}(s) = \frac{1.48e06s + 2.94e08}{s^2 + 150s + 3.044e05} \dots (4.82)$$

Al igual que en el convertidor Boost, primeramente, se observa el ancho de banda en que la función de transferencia representa correctamente al convertidor. Para ello, se utiliza el software Psim que permite obtener el diagrama de bode del circuito y así poder compararlo con el diagrama de bode de la función de transferencia obtenida en (4.82). El resultado de esta comparación se muestra en la **Figura 4-18**.

En el Anexo A.4.3 se muestra el circuito que fue implementado en Psim para obtener la función de transferencia $G_{id-load}(s)$ a través del convertidor Buck-Boost diseñado.

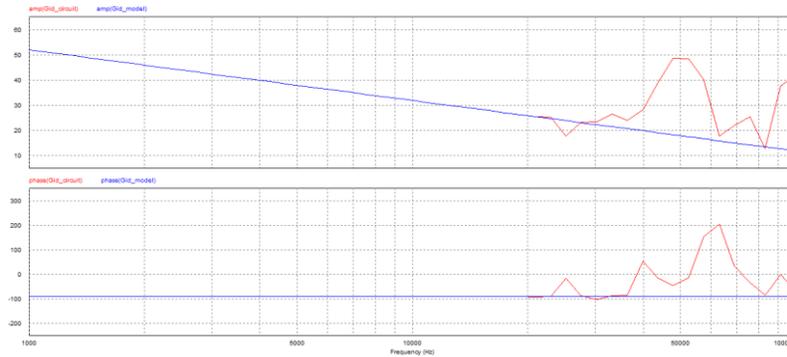


Figura 4-18: Resultado de comparación de las funciones de transferencia del circuito y modelo realizada en Psim.

Observando lo obtenido en la **Figura 4-18**, se puede concluir que la FT de la ecuación (4.82) representa correctamente al circuito hasta los 20[kHz], por lo que se debe tener este valor en cuenta a la hora de diseñar el controlador. En particular, se sintonizará el controlador en base a criterios de ancho de banda y factor de amortiguamiento.

Por lo tanto, los criterios de diseño que se exigen que cumpla el controlador son los siguientes:

- Un ancho de banda $BW_{load,i} \leq 20[kHz]$, por la razón explicada anteriormente.
- Un factor de amortiguamiento $\zeta_{load,i} = 0.7$, ya que así se obtiene un sistema más robusto a las variaciones de los parámetros del convertidor.

Luego, con la ayuda de la herramienta “sisotool” de Matlab se proceden a diseñar y sintonizar el controlador que se implementará en el convertidor. En particular, se ajustan los criterios antes explicados para un controlador PI, obteniendo así lo mostrado en la **Figura 4-19**.

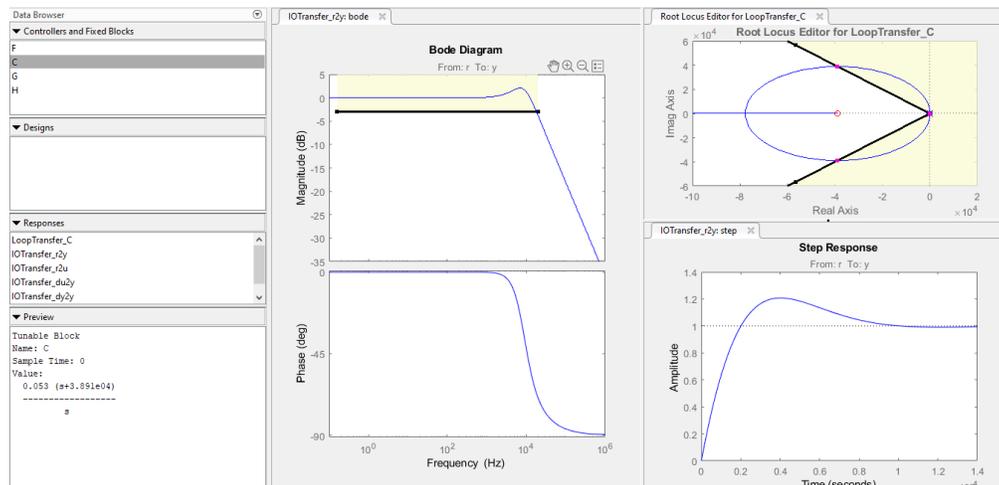


Figura 4-19: Resultados del ajuste del sistema del control de corriente del convertidor Buck-Boost.

Considerando lo anterior y lo observado en la **Figura 4-19**, el controlador tiene la forma $C_{load,i}(s) = \frac{0.053(s+3.891e04)}{s}$, donde se obtiene que:

$$P_{load,i} = 0.053 ; I_{load,i} = 0.053 * 3.891e04 = 2062.23$$

Finalmente, el controlador PI para el convertidor Buck-Boost de la **Figura 4-19** queda de la siguiente manera:

$$C_{load,i}(s) = 0.053 + \frac{2062.23}{s}$$

Ahora que se tiene el control interno de corriente, el modelo matemático del convertidor se puede simplificar de manera similar a lo mostrado en la **Figura 4-14**.

Luego, se procede de la misma manera que en (4.57), obteniendo lo siguiente:

$$G_{viR-load}(s) = \frac{V_C(s)}{I_R(s)} = \frac{RD_p}{RC_{load}s + 1} \dots (4.83)$$

Reemplazando los valores de la **Tabla 4-3** en la ecuación (4.83), se obtiene:

$$G_{viR-load}(s) = \frac{0.3003}{0.006666 * s + 1}$$

Antes de empezar a realizar el control de voltaje del convertidor, se verifica en que rango de frecuencia la FT en lazo cerrado de lazo interno de corriente se comporta prácticamente como una ganancia unitaria. Para ello, se gráfica el diagrama de bode de lazo cerrado de corriente, el cual se muestra en la **Figura 4-20**.

La ecuación que nos representa la FT de lazo cerrado del control de corriente se muestra a continuación:

$$G_{LC,i-load}(s) = \frac{C_{load,i}(s) * G_{id-load}(s)}{1 + C_{load,i}(s) * G_{id-load}(s)} \dots (4.84)$$

$$G_{LC,i-load}(s) = \frac{78440 s^5 + 3.079e09 s^4 + 1.09e12 s^3 + 1.025e15 s^2 + 1.846e17 s}{s^6 + 7.874e04 s^5 + 3.08e09 s^4 + 1.091e12 s^3 + 1.025e15 s^2 + 1.846e17 s} \dots (4.85)$$

Luego, se gráfica el diagrama de bode representado por $G_{LC,i}(s)$, obteniendo la **Figura 4-20**.

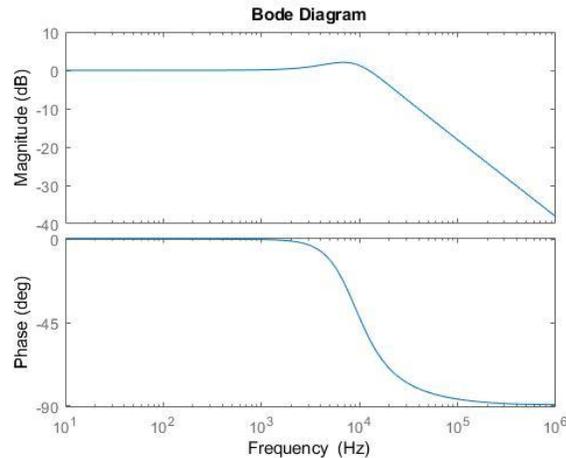


Figura 4-20: Diagrama de bode obtenido a partir de la FT $G_{LC,i-load}(s)$.

De la **Figura 4-20**, se puede observar que la FT se comporta como una ganancia unitaria hasta una frecuencia aproximada de 1[kHz], por lo que para el diseño del controlador de voltaje se debe tener en cuenta este criterio de diseño.

Antes de comenzar con el diseño y sintonización del control de voltaje se debe tener en cuenta que se está haciendo un control en cascada, ya que se tiene un control interno de corriente y un control externo de voltaje. Además, para un correcto funcionamiento del sistema, se hará que el controlador de voltaje del convertidor Buck-Boost de la carga sea más lento que el control del voltaje del convertidor Buck-Boost de las baterías. Por lo anterior, otros criterios que se tomarán en cuenta a la hora de diseñar el control de voltaje, es que el lazo de control interno de corriente sea a lo menos 10 veces más rápido que el lazo de control externo de voltaje y que el lazo de control de voltaje del convertidor de la carga sea a lo menos 2 veces más lento que el del convertidor de las baterías.

Por lo explicado anteriormente, los criterios de diseño que se exigen que cumpla el controlador son los siguientes:

- Un ancho de banda $BW_{load,v} \leq 1[kHz]$, por la razón explicada anteriormente.
- Que la respuesta del sistema sea a lo menos 10 veces más lenta en comparación con la respuesta del lazo de control de corriente.

- Que la respuesta del control de voltaje del convertidor de carga sea a lo menos 2 veces más lenta en comparación con la respuesta del control de voltaje del convertidor de las baterías.

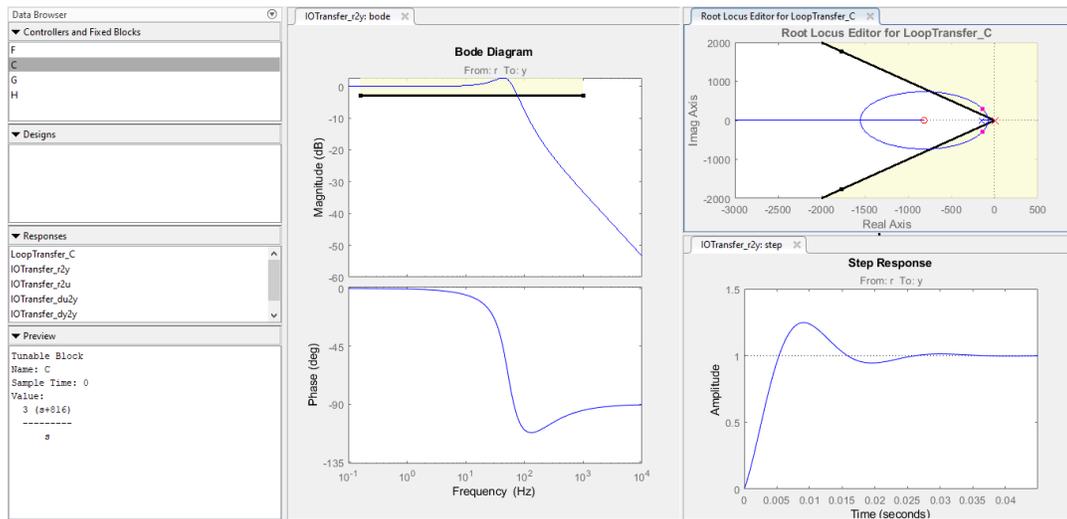


Figura 4-21: Resultados del ajuste del sistema del control de voltaje del convertidor Buck-Boost.

Luego, con la ayuda de la herramienta “sisotool” de Matlab se procede a diseñar y sintonizar el controlador que se implementará en el convertidor. En particular, se ajustan los criterios antes explicados para un controlador PI, obteniendo así lo mostrado en la **Figura 4-21**.

Considerando lo anterior y lo observado en la **Figura 4-21**, el controlador tiene la forma $C_{load,v}(s) = \frac{3(s+816)}{s}$, donde se obtiene que:

$$P_{load,v} = 3 ; I_{load,v} = 3 * 816 = 2448$$

Finalmente, el controlador PI para el convertidor Buck-Boost de la **Figura 4-21** queda de la siguiente manera:

$$C_{load,v}(s) = 3 + \frac{2448}{s}$$

Capítulo 5. Simulación del Sistema de Acondicionamiento de Potencia

5.1. Introducción

En este capítulo se analiza el comportamiento dinámico del sistema de acondicionamiento de potencia propuesto a partir de los modelos matemáticos antes mostrados. Para probar la estabilidad del sistema se evalúa su respuesta dinámica ante distintos eventos.

Además, en el apartado de Anexos se agrega un análisis adicional como complemento a este. Donde se tiene que, en el Anexo B, se analiza el sistema propuesto considerando pérdidas, para luego poder compararlo con lo resultado en el presente capítulo.

5.2. Modelo del Sistema de Acondicionamiento de Potencia propuesto

El sistema propuesto fue modelado en Simulink, donde en la **Figura 5-1** se muestra el diagrama esquemático de los bloques que fueron implementados en la simulación.

Mayor detalle sobre el contenido de cada uno de estos bloques se muestra en el Anexo A.5.

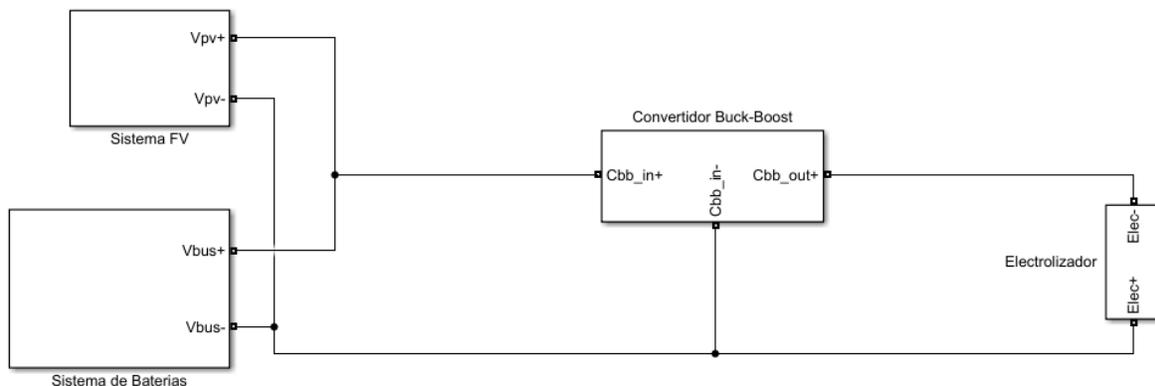


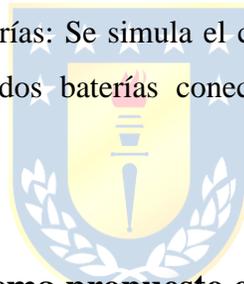
Figura 5-1: Implementación en bloques del sistema propuesto realizado en Simulink.

5.3. Simulaciones

A continuación, se analiza el comportamiento del sistema propuesto de la **Figura 5-1** ante distintos eventos. Para lo cual se grafican cada una de las variables de interés y se presentan los comentarios relevantes de lo obtenido en cada evento.

En particular, se analiza el comportamiento del sistema propuesto bajo los siguientes casos:

- Comportamiento del sistema propuesto en un ciclo diario de irradiación: Se simula el comportamiento del sistema propuesto ante variaciones en un ciclo diario de irradiación como se muestra en la **Figura 3-2**.
- Eventos de cambios en la Carga: Se simula el comportamiento del sistema propuesto ante la conexión y desconexión de carga (electrolizador), además del comportamiento ante cambios en los parámetros en el electrolizador.
- Eventos de cambios en el Arreglo FV: Se simula el comportamiento del sistema propuesto ante variaciones de irradiancia en estado de conexión y desconexión de carga.
- Eventos de cambios en las Baterías: Se simula el comportamiento del sistema propuesto al quitar el filtro RC, con solo dos baterías conectadas al sistema y con el arreglo FV desconectado del sistema.



5.3.1 Comportamiento del sistema propuesto en un ciclo diario de irradiación

A continuación, se muestra cómo se comporta el sistema ante los cambios de irradiación producidos a lo largo del día mostrados en la **Figura 3-2**. Para la simulación, se consideró que cada hora real corresponde a 0.1[s] de la simulación, por lo tanto, el rango de tiempo de la simulación será de 2.4[s]. En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en 0.1[s]. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia variable igual a la mostrada en la **Figura 3-2** y una temperatura de 25°C.
- El electrolizador está operando en condiciones nominales, es decir a una temperatura 80°C y presión de 6[bar].
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

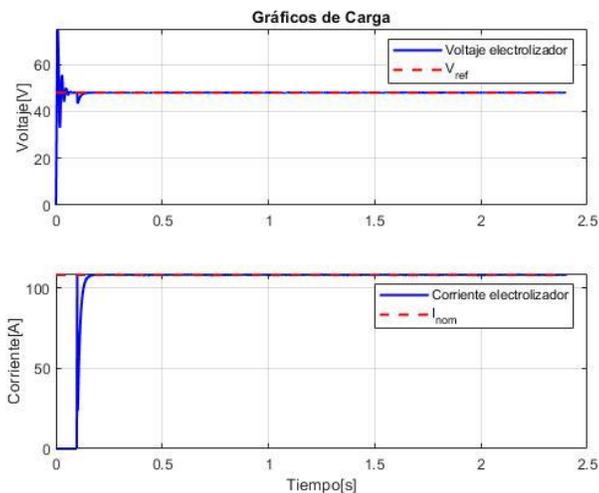


Figura 5-2: Gráficas de carga del comportamiento diario del sistema.

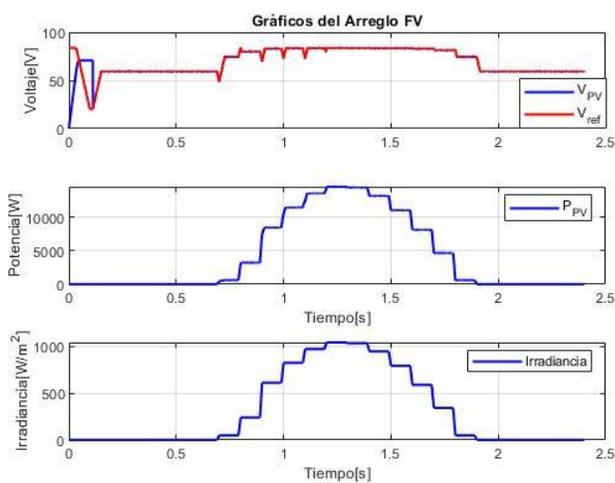


Figura 5-3: Graficas del arreglo FV del comportamiento diario del sistema.

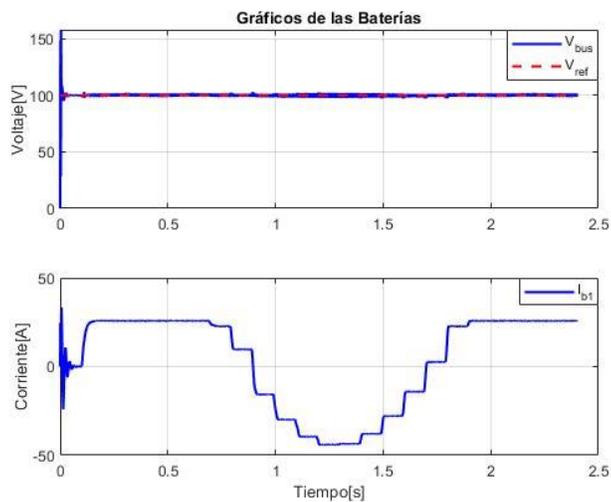


Figura 5-4: Gráficas de las baterías del comportamiento diario del sistema.

De la **Figura 5-2**, se puede observar que:

- A lo largo del día, el voltaje de carga se mantiene constante en el voltaje de referencia de 48[V], lo cual es gracias al control implementado en el convertidor Buck-Boost de la carga.
- Debido a que el voltaje de carga se mantiene invariante la corriente inyectada al electrolizador también lo hace a una intensidad constante de 108[A], que corresponde a la corriente nominal dada por el fabricante.

De la **Figura 5-3**, se puede observar que:

- A medida que va variando la irradiancia a lo largo del día el voltaje del arreglo FV va variando también gracias al algoritmo MPPT y el control implementado en el convertidor Boost, logrando que el arreglo FV entregue la máxima potencia.
- Notar que, en las horas que no existe irradiancia solar (desde las 19:00 hasta las 06:00) la potencia generada por el arreglo FV es 0[W].

De la **Figura 5-4**, se puede observar que:

- A lo largo del día, el voltaje del bus DC se mantiene constante en el voltaje de referencia de 100[V], lo cual es gracias al control implementado en el convertidor Buck-Boost de las baterías.
- A medida que va variando la irradiancia, la corriente que circula por las baterías también cambia, pudiendo observar que a las 09:00 horas las baterías pasan de entregar a recibir corriente.
- En las horas que no existe irradiancia solar, la corriente de descarga de las baterías es de aproximadamente 25[A]. Mientras que, en las horas que existe la mayor irradiancia solar la corriente de carga de las baterías es de aproximadamente 45[A].
- La mayor parte de las horas en que existe irradiancia solar las baterías se encuentran en estado de descarga, siendo la energía transferida hacia las baterías mayor al que la energía que aportan las baterías al sistema.

5.3.2 Eventos de cambios en la Carga.

A continuación, se analizan distintos eventos debidos a cambios de carga. En particular, se simulan los eventos de conexión de carga y desconexión de carga, además de eventos de cambios en los parámetros en el electrolizador.

A. Evento de conexión y desconexión de carga

Para un caso real es importante saber cómo se comporta el sistema propuesto al desconectar y conectar el electrolizador, ya que puede ser una práctica común para realizar mantenimientos o cargar el banco de baterías.

Por lo anterior, para este evento se analiza la respuesta del sistema propuesto al conectar y desconectar la carga (electrolizador).

Como primera prueba se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en 0.1[s] y desconectarla en 0.3[s]. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una temperatura de 25°C .
- El electrolizador al conectarse opera en condiciones nominales, es decir a una temperatura 80°C y presión de 6[bar].
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

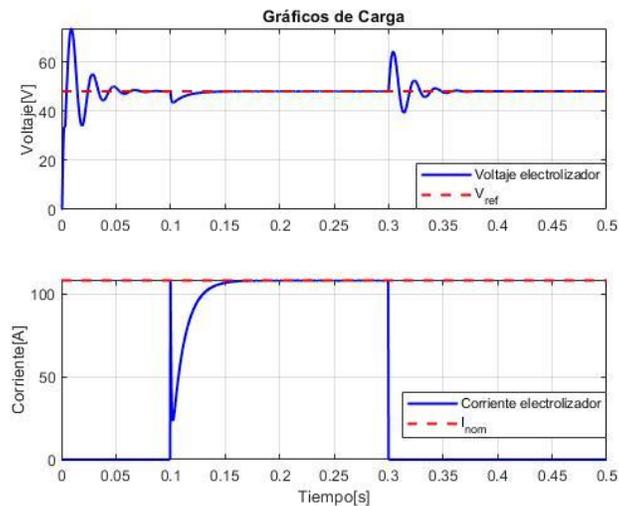


Figura 5-5: Gráficas de carga ante el evento de conexión y desconexión de carga.

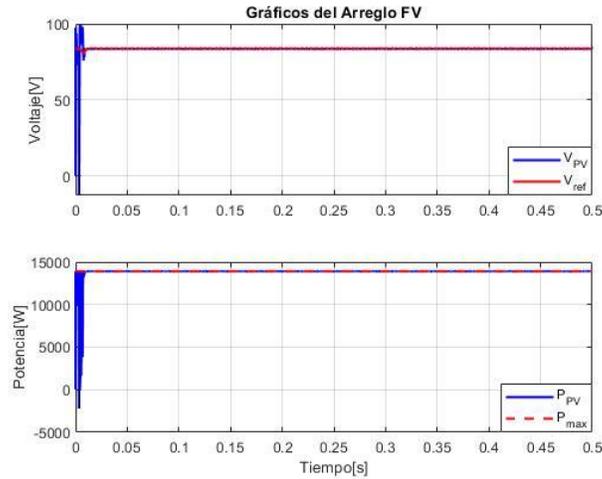


Figura 5-6: Gráficas del arreglo FV ante el evento de conexión y desconexión de carga.

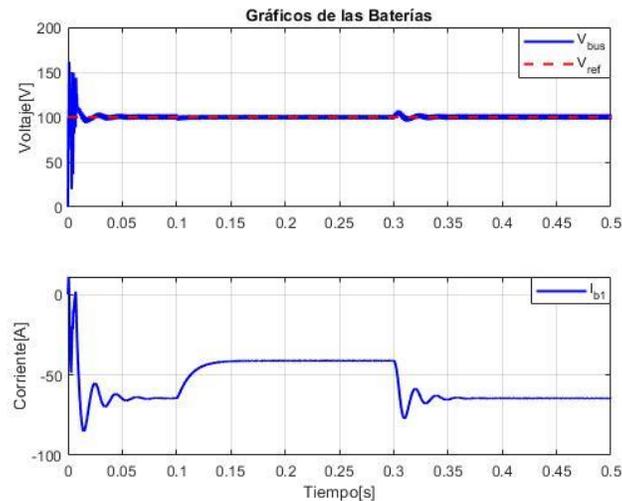


Figura 5-7: Gráficas de las baterías ante el evento de conexión y desconexión de carga.

De la **Figura 5-5**, se puede observar de la curva de voltaje aplicado a la carga (electrolizador) que:

- Con la carga desconectada se puede observar que en $t=0[s]$ comienza un transitorio que oscila hasta amortiguarse a los $0.05[s]$. Esta oscilación llega hasta aproximadamente los $75[V]$.
- En $t=0.1[s]$, tenemos que la carga se conecta y la curva sufre una caída de tensión que es rápidamente controlada al voltaje de referencia de $48[V]$, con un transiente típico de los circuitos RC.
- En $t=0.3[s]$ se vuelve a desconectar la carga, observándose un transiente parecido al que se obtiene en $t=0[s]$ pero de menor magnitud (aproximadamente $65[V]$) y que logra amortiguarse a los $0.05[s]$ para seguir el voltaje de referencia nuevamente.

De la **Figura 5-5**, se puede observar de la curva de corriente de carga que:

- Cuando se conecta la carga se produce un pico de corriente debido a que el voltaje de carga en $t=0.1[s]$ es de $48[V]$, lo cual produce una corriente de $108[A]$. Luego, al tener una caída de tensión un poco sobre el voltaje reversible del electrolizador se observa de igual manera una caída de corriente que sube progresivamente hasta el valor de $108[A]$, a medida que sube el voltaje de carga.
- Al conectar la carga en $t=0.1[s]$ el tiempo que se demora el sistema en llegar a la corriente de operación es de aproximadamente $0.05[s]$.

De la **Figura 5-7**, se puede observar de la curva de voltaje en el bus DC que:

- Con la carga desconectada, en $t=0[s]$ comienza un transitorio que oscila hasta amortiguarse a los $0.05[s]$. Esta oscilación llega hasta aproximadamente los $170[V]$.
- En $t=0.1[s]$, la carga se conecta y la curva sufre una mínima caída de tensión que es rápidamente controlada al voltaje de referencia de $100[V]$.
- En $t=0.3[s]$ se vuelve a desconectar la carga, observándose un transiente parecido al que obtuvimos en $t=0[s]$ pero de menor magnitud (aproximadamente $115[V]$) y que logra amortiguarse a los $0.033[s]$ para seguir el voltaje de referencia nuevamente.

De la **Figura 5-7**, se puede observar de la curva corriente en la batería (I_{b1}) que:

- Con la carga desconectada, la corriente de la batería en estado estacionario es de aproximadamente $-65[A]$.
- Con la carga conectada, la corriente de la batería en estado estacionario es cerca de $-40[A]$.
- Por lo anterior, para una irradiancia de $1000[\frac{W}{m^2}]$ las baterías siempre estarán en modo de carga.

De la **Figura 5-6**, puede observar que:

- El voltaje dado por el arreglo FV sigue correctamente al voltaje de referencia dado por el algoritmo MPPT implementado.
- El voltaje que es dado por el algoritmo MPPT corresponde al voltaje de punto de máxima potencia dado por el algoritmo MPPT, el cual en este caso es de aproximadamente de $13.91[kW]$.

En general, el voltaje en la carga y en el bus reaccionan bien ante las perturbaciones de carga, lo cual es gracias a los criterios de diseño de los controladores de voltaje y corriente utilizados, logrando así un sistema rápido y robusto.

B. Evento de cambios de parámetros en el electrolizador

Es normal que el electrolizador a lo largo del día cambie su temperatura de operación.

Por lo anterior, en este evento se analiza la respuesta del sistema al cambiar este parámetro.

En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en 0.1[s] y desconectarla en 0.3[s]. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una temperatura de 25°C .
- El electrolizador está operando a una temperatura 40°C y presión de 6[bar].
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

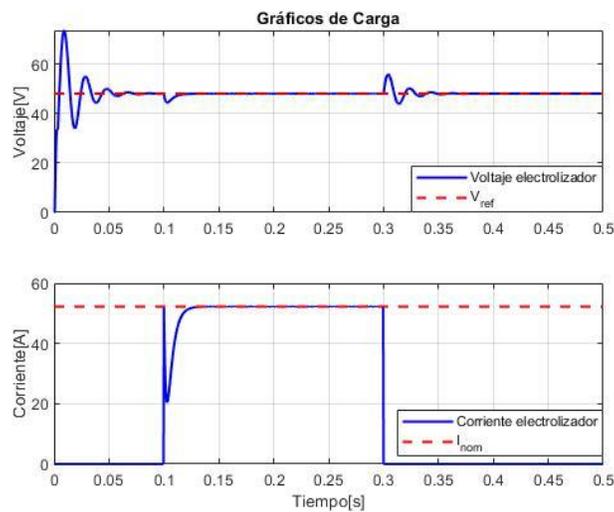


Figura 5-8: Gráficas de carga ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.

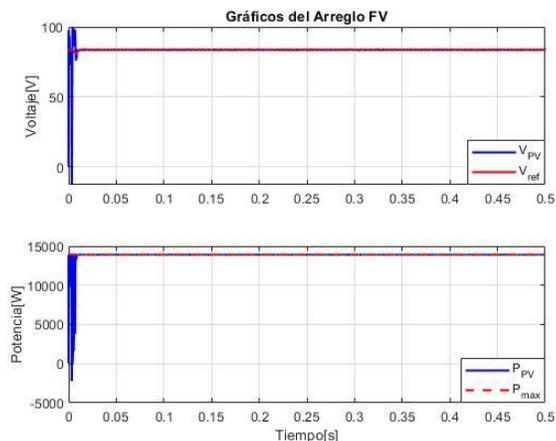


Figura 5-9: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.

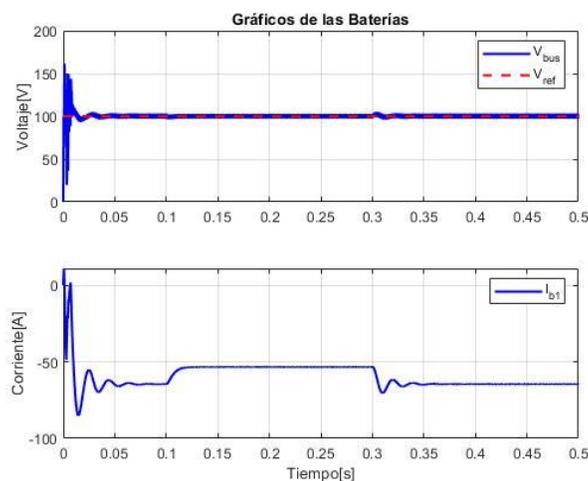


Figura 5-10: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.

De la **Figura 5-8**, se pueden observar de la curva de voltaje de carga que:

- Con la carga desconectada, en $t=0[s]$ comienza un transitorio que oscila hasta amortiguarse a los $0.05[s]$. Esta oscilación llega hasta aproximadamente los $75[V]$.
- En $t=0.1[s]$, tenemos que la carga se conecta y la curva sufre una caída de tensión que es rápidamente controlada al voltaje de referencia de $48[V]$ con un transiente típico de los circuitos RC.
- En $t=0.3[s]$ se vuelve a desconectar la carga, observándose un transiente parecido al que se obtuvo en $t=0[s]$ pero de menor magnitud (aproximadamente $65[V]$) y que logra amortiguarse a los $0.05[s]$ para seguir el voltaje de referencia nuevamente.

De la **Figura 5-8**, podemos observar de la curva de corriente de carga que:

- Cuando se conecta la carga se produce un pico de corriente debido a que el voltaje de carga en $t=0.1[s]$ es de $48[V]$ lo cual produce una corriente de $52.26[A]$. Luego, al tener una caída de tensión un poco sobre el voltaje reversible del electrolizador se observa de igual manera una caída de corriente que sube progresivamente hasta el valor de $52.26[A]$ a medida que sube el voltaje de carga.
- Al conectar la carga en $t=0.1[s]$ el tiempo que se demora el sistema en llegar a la corriente de operación es de aproximadamente $0.05[s]$.

De la **Figura 5-10**, podemos observar de la curva en el bus que:

- El voltaje en el bus se comporta de la misma manera que lo comentado en el caso A, pero al conectar y desconectar la carga las oscilaciones son menores en magnitud. Esto es debido a que las características de corriente en la carga disminuyen.

De la **Figura 5-10**, podemos observar de la curva corriente en la batería (I_{b1}) que:

- Con la carga desconectada, la corriente de la batería en estado estacionario es de aproximadamente $-65[A]$.
- Con la carga conectada, la corriente de la batería en estado estacionario es cerca de $-55[A]$.

De la **Figura 5-9**, podemos observar que:

- Al igual que en el caso A, el voltaje en el arreglo FV sigue correctamente al voltaje de referencia, entregando así la potencia máxima del arreglo FV.

C. *Rizado de voltaje y corriente*

A continuación, se analiza el rizado de voltaje y corriente en estado estacionario de las distintas curvas características que se producen cuando el electrolizador se encuentra desconectado y conectado al sistema.

Para la simulación se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000[\frac{W}{m^2}]$ y una temperatura de $25^{\circ}C$.
- El electrolizador está operando en condiciones nominales, es decir a una temperatura $80^{\circ}C$ y presión de $6[bar]$.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de $51.2[V]$.

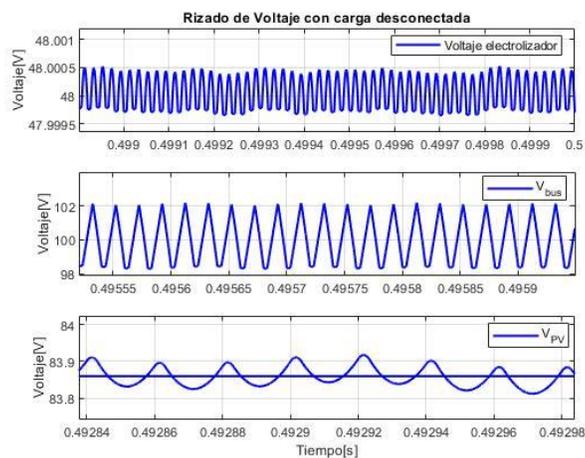


Figura 5-11: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga desconectada.

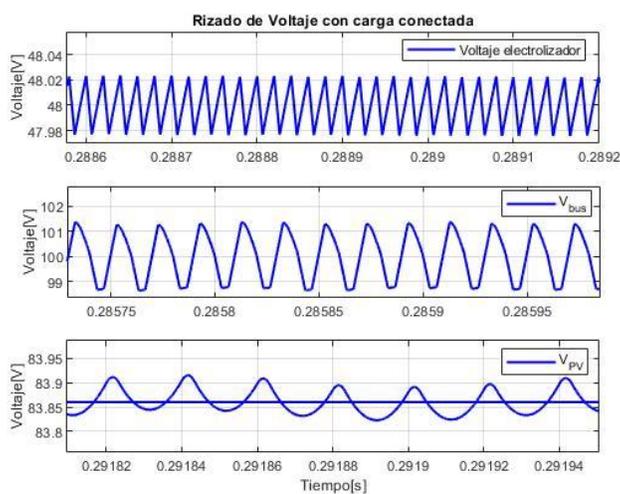


Figura 5-12: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga conectada.

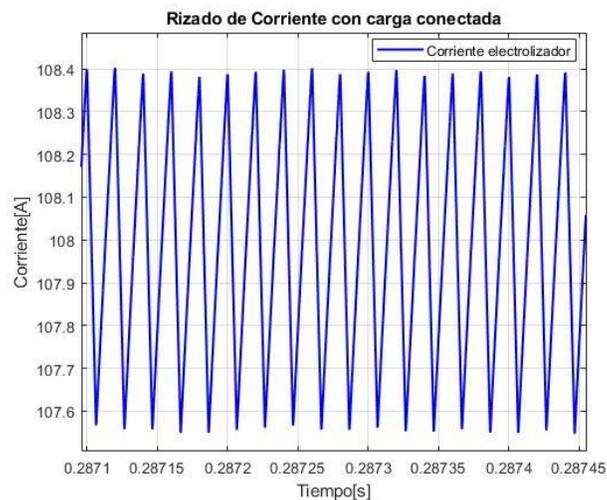


Figura 5-13: Rizado de corriente de carga con la carga conectada.

De la **Figura 5-11**, se puede observar que:

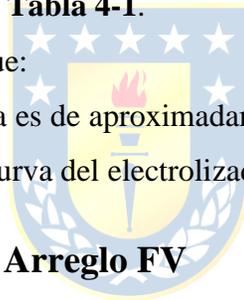
- El rizado de voltaje de la carga es de aproximadamente 0.00104%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-3**.
- El rizado de voltaje en el bus DC es de aproximadamente 2%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-2**.
- El rizado de voltaje del arreglo FV es de aproximadamente 0.15%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-1**.

De la **Figura 5-12**, se puede observar que:

- El rizado de voltaje de la carga es de aproximadamente 0.042%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-3**.
- El rizado de voltaje en el bus DC es de aproximadamente 1%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-2**.
- El rizado de voltaje del arreglo FV es de aproximadamente 0.15%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-1**.

De la **Figura 5-13**, se puede observar que:

- El rizado de corriente de la carga es de aproximadamente 0.463%, lo cual nos da una idea de la alta sensibilidad que tiene la curva del electrolizador ante cambios en el voltaje.



5.3.3 Eventos de cambios en el Arreglo FV

Un aspecto importante del sistema propuesto es ver cómo este se comporta ante variaciones de irradiancia, que es común que se produzcan a lo largo del día.

Por lo anterior, se analizan distintos eventos de cambios en el arreglo FV. En particular se simulan los cambios de irradiancia en estado de conexión de carga y desconexión de carga. Además, comentar que los cambios de irradiancia que se analizan son agresivos, por lo que no representan a lo que pueda pasar en la realidad, pero si nos da una idea de cómo se comporta el sistema propuesto.

A. *Evento de cambios de irradiancia con carga desconectada*

En este evento se analiza la respuesta del sistema al cambiar la irradiancia del arreglo FV mientras el electrolizador se encuentra desconectado.

En este evento se comenzó con una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, que a los 0.1[s] baja hasta los $50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y luego vuelve a subir a los $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ a los 0.3[s].

- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

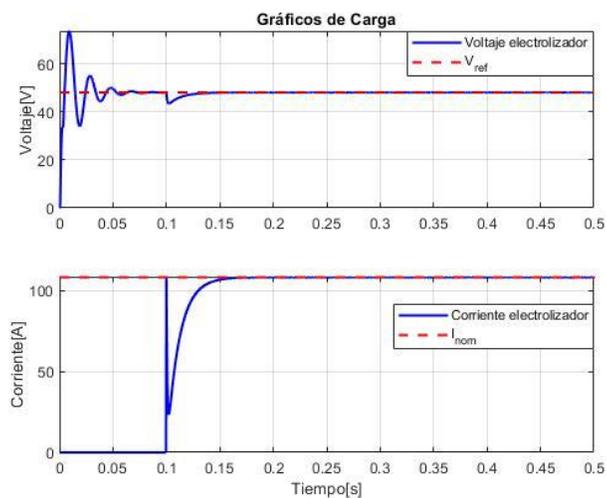


Figura 5-14: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.

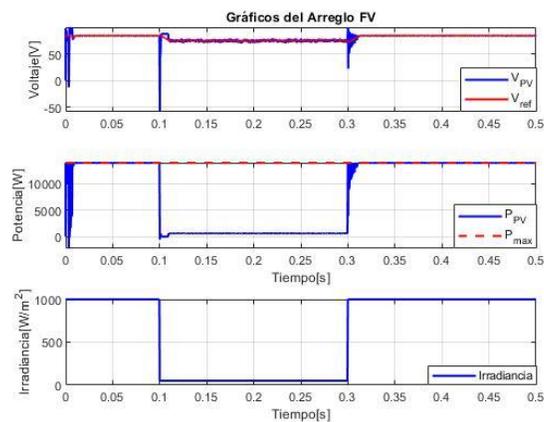


Figura 5-15: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.

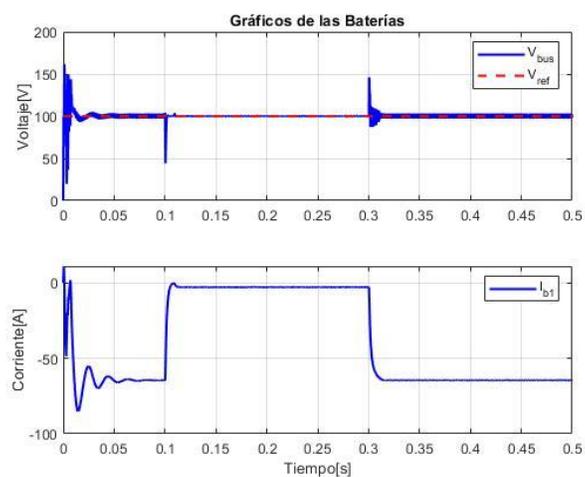


Figura 5-16: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.

De la **Figura 5-14**, se puede observar que:

- Con la carga desconectada, en $t=0[s]$ comienza el mismo transitorio observado en el evento de cambio de carga.
- Se puede verificar que la carga esta desconectada, ya que la corriente de carga es igual a $0[A]$.

De la **Figura 5-15**, se puede observar que:

- Ante los cambios de irradiancia en $t=0.1[s]$ y $t=0.3[s]$, el voltaje dado por el arreglo FV sigue correctamente al voltaje de referencia dado por el algoritmo MPPT implementado.
- El voltaje que es dado por el algoritmo MPPT corresponde al voltaje de punto de máxima potencia, el cual varía según los cambios de irradiancia.

De la **Figura 5-16**, se puede observar que:

- En la curva de voltaje del bus en $t=0.1[s]$ y $t=0.3[s]$ existen variaciones de cerca de $50[V]$ con respecto al voltaje de referencia.
- La corriente de la batería para una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ en estado estacionario es de aproximadamente $-65[A]$. Notar que, se tiene una alta corriente de carga debido a que todo el flujo de potencia generado por el arreglo FV circulará hacia las baterías al tener la carga desconectada.
- Mientras que, cuando la irradiancia es de $50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ la corriente en la batería está un poco debajo de los $0[A]$, lo cual es esperable ya que al tener la carga desconectada y una baja radiación solar se espera que la corriente de carga en las baterías sea baja.

B. Evento de cambios de irradiancia con carga conectada

En este evento se analiza la respuesta del sistema al cambiar la irradiancia del arreglo FV mientras el electrolizador se encuentra en operación.

En este evento se comenzó con una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, que a los $0.1[s]$ baja hasta los $50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y luego vuelve a subir a los $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ a los $0.3[s]$.

- Las baterías están operando en su voltaje nominal de $51.2[V]$.

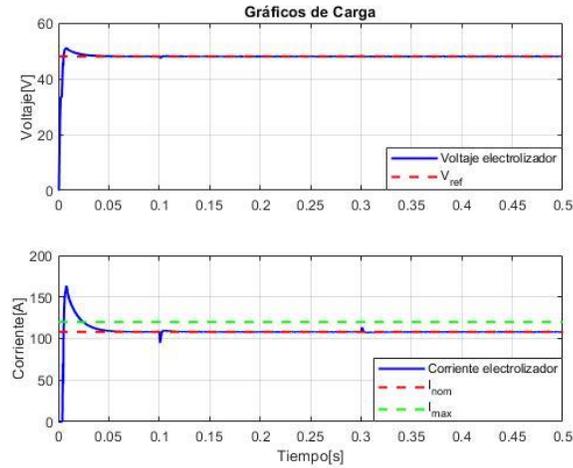


Figura 5-17: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.

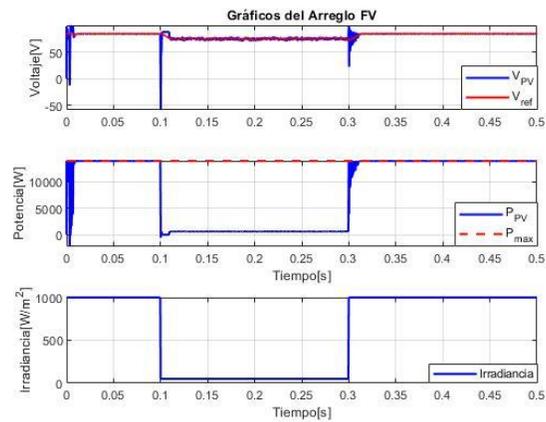


Figura 5-18: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.

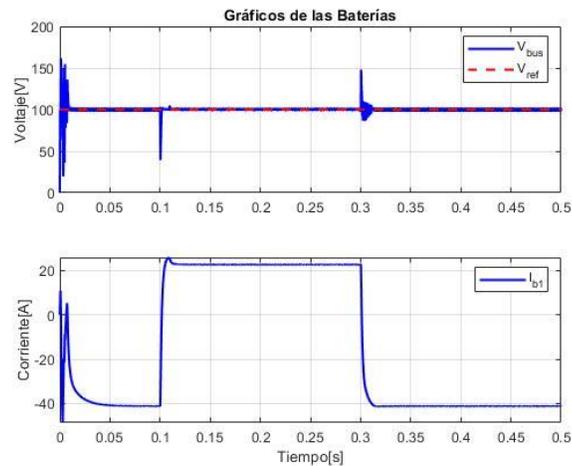


Figura 5-19: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.

De la **Figura 5-17**, se puede observar que:

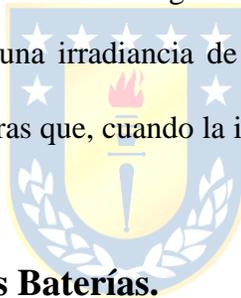
- En $t=0[s]$ comienza un transitorio que produce una pequeña sobretensión respecto al voltaje de referencia. Este transitorio dura aproximadamente $0.03[s]$.
- En la curva de corriente de carga se observa que la sobretensión vista en el voltaje de carga produce de la misma manera una sobretensión de corriente. Lo anterior, es perjudicial para el electrolizador ya que esta sobretensión supera la corriente máxima dada por el fabricante. Por lo anterior, se debe conectar la carga una vez se atenúe el transitorio que se produce de la interacción de los sistemas arreglo FV y baterías, al igual como se mostró en el caso A.

De la **Figura 5-18**, se puede observar que:

- Las curvas son iguales a las del caso A, por lo que los comentarios son los mismos.

De la **Figura 5-19**, se puede observar que:

- Las curvas son similares a las del caso A. Por lo que se puede deducir que el sistema de baterías se encuentra desacoplado del sistema de la carga.
- La corriente de la batería para una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ en estado estacionario es de aproximadamente $-40[A]$. Mientras que, cuando la irradiancia es de $50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ la corriente en la batería está cerca de los $20[A]$.



5.3.4 Eventos de cambios en las Baterías.

A continuación, se analizan distintos eventos en las baterías. En particular, se simula el comportamiento del sistema con dos baterías y con el arreglo FV desconectado.

A. Evento de baterías con dos baterías

Un escenario interesante para analizar es el de la respuesta del sistema al dividir el banco de baterías en dos módulos, ambos con sus respectivos convertidores DC-DC para hacer la interfase con el bus DC.

En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en $0.1[s]$. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una temperatura de $25^{\circ}C$.
- El electrolizador está operando a una temperatura $80^{\circ}C$ y presión de $6[bar]$.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de $51.2[V]$.

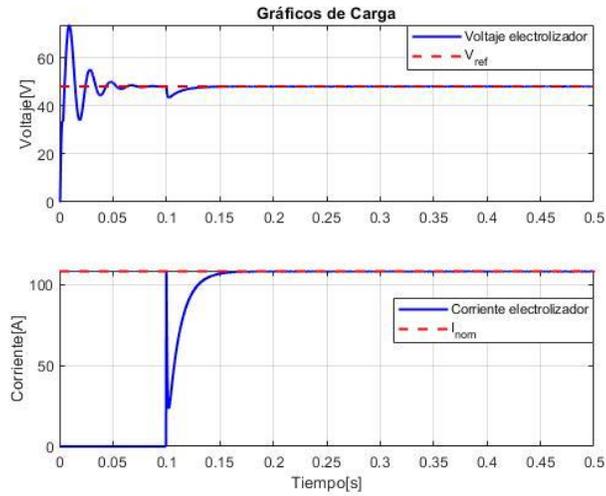


Figura 5-20: Gráficas de carga ante el evento de baterías con dos baterías.

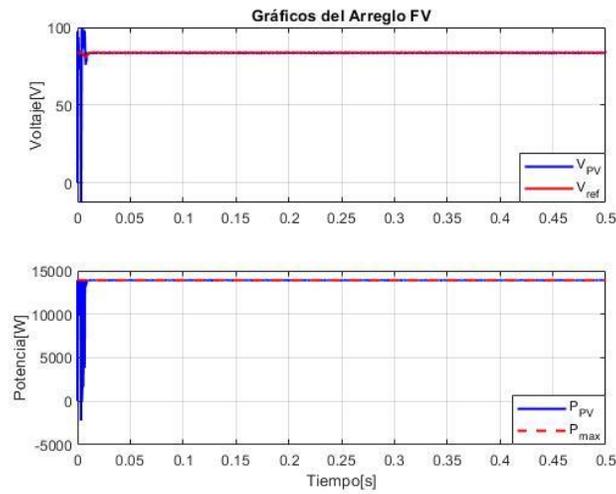


Figura 5-21: Gráficas del arreglo FV ante el evento de baterías con dos baterías.

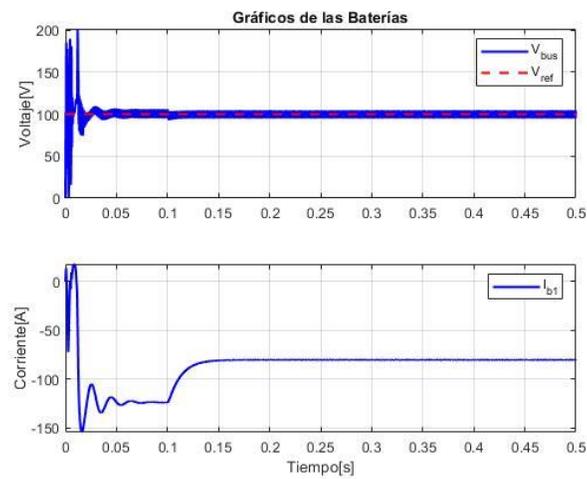


Figura 5-22: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías con dos baterías.

De la **Figura 5-20**, se puede observar que:

- Las curvas de voltaje y corriente de carga son iguales a las observadas en el evento de carga.

De la **Figura 5-21**, se puede observar que:

- Las curvas de voltaje y potencia del arreglo FV son iguales a las observadas en el evento de carga.

De la **Figura 5-22**, se puede observar que:

- En la curva de voltaje del bus DC ya se pueden ver cambios, donde se puede observar que las primeras oscilaciones son aproximadamente un 33% mayores en magnitud que las observadas al tener los 4 módulos en el sistema de baterías.

Lo anterior, se debe a que al tener más módulos con baterías se disminuye la impedancia equivalente y por lo tanto la respuesta es más rápida.

- En la curva de corriente de las baterías también se pueden ver cambios, donde en el tiempo en que la carga esta desconectada se pueden ver una corriente en estado estacionario cerca de -125[A], mientras que en el tiempo que la carga está conectada, la corriente en estado estacionario es de aproximadamente -80[A]. Como se puede observar, los valores son mayores a los vistos en el evento de carga, y esto es debido a que debe existir un balance de potencias en el sistema, por lo que al desconectar dos baterías se incrementará la corriente de las baterías que se encuentran conectadas.

B. Evento de baterías solo con la carga conectada

Uno de los casos más importante a analizar en el sistema es cómo se comporta este sin tener el apoyo del arreglo FV, ya que es algo común que pasará por ejemplo si se quiere operar el electrolizador por la noche.

Por lo anterior, en este evento se analiza la respuesta del sistema al tener solo la carga conectada al sistema de baterías, es decir que se tiene el arreglo FV desconectado del sistema.

En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en 0.1[s]. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El electrolizador está operando a una temperatura 80°C y presión de 6[bar].
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

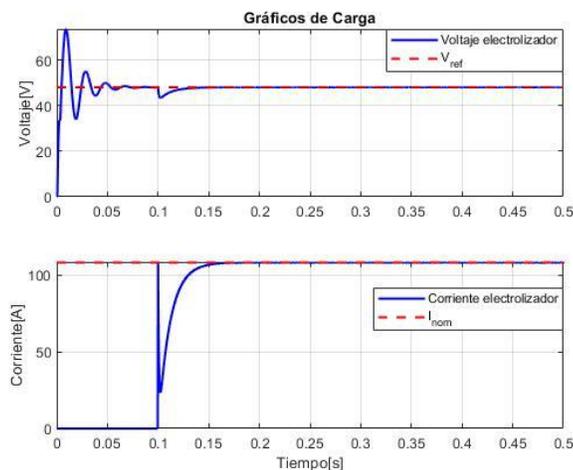


Figura 5-23: Gráficas de carga ante el evento de baterías solo con la carga conectada.

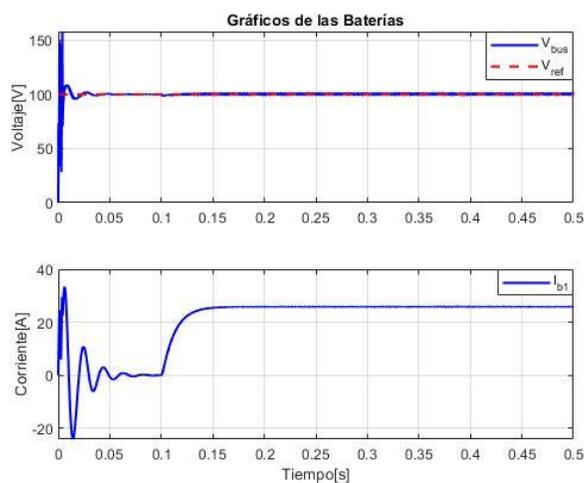


Figura 5-24: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías solo con la carga conectada.

De la **Figura 5-23**, puede observar que:

- Las curvas de voltaje y corriente de carga son iguales a las observadas en el evento de carga.

De la **Figura 5-24**, puede observar que:

- La curva de voltaje del bus DC es muy similar a la vista en el evento de carga.
- En la curva de corriente de las baterías ya se pueden ver cambios, donde en el tiempo en que la carga esta desconectada se puede ver una corriente en estado estacionario de 0[A], debido a que ya no se encuentra el suministro de energía dado por el arreglo FV. Mientras que, en el tiempo que la carga está conectada, la corriente en estado estacionario es de aproximadamente 25[A].

5.3.5 Discusión de resultados

En resumen, de los resultados obtenidos se puede destacar lo siguiente:

- Las perturbaciones en el bus DC son casi imperceptibles en el voltaje y corriente del electrolizador, logrando así que el electrolizador no vea afectada su operación durante estos eventos.
- El control de voltaje del convertidor Buck-Boost/Carga sigue correctamente al voltaje de referencia cuando el electrolizador se encuentra conectado y desconectado del sistema. Y para los casos en que conecta y desconecta el electrolizador el control reacciona rápidamente manteniendo el voltaje de salida del convertidor en el voltaje de referencia en menos de 0.1[s].
- El control de voltaje del convertidor Boost sigue correctamente a el voltaje de referencia que es entregado por el algoritmo MPPT.
- Los cambios de irradiancia progresivos (como se muestra en la **Figura 5-3**) no provocan grandes cambios en el voltaje del bus DC, en cambio variaciones bruscas de irradiancia (como se muestra en la **Figura 5-15**) si muestran variaciones notables en el bus DC.
- El control de voltaje del convertidor Buck-Boost/Batería sigue correctamente al voltaje de referencia.
- Ante perturbaciones de cambios de irradiancia o desconexión de carga el control de voltaje del convertidor Buck-Boost/Batería actúa rápidamente, manteniendo el voltaje al voltaje de referencia en menos de 0.05[s].
- Para disminuir el impacto de las perturbaciones en el bus DC se deben conectar módulos de baterías (batería + convertidor Buck-Boost) al bus DC, logrando así un sistema más estable.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

En este trabajo se abordó el acoplamiento de generación fotovoltaica y electrolizador para la producción de H₂V. Para ello, se analizó ambos elementos y se obtuvieron modelos equivalentes desde el punto de vista eléctrico. A partir de estos modelos, se propuso un sistema de conversión de energía compuesto de convertidores DC/DC para hacer la interfase de la generación fotovoltaica y electrolizador. Además, se propuso la incorporación de un banco de baterías para permitir que tanto la fuente de energía como el electrolizador puedan operar en sus puntos de mayor eficiencia energética. Para evaluar la operación del sistema propuesto se realizaron simulaciones computacionales bajo diferentes condiciones de operación, obteniéndose como resultado una efectiva operación y desacoplamiento de generación y consumo.

El principal resultado que se obtuvo al aplicar la solución propuesta es que efectivamente al agregar un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías se mejora la efectividad del sistema propuesto en general, permitiendo que el arreglo FV trabajó en su punto de máxima potencia y el electrolizador operó en su punto óptimo donde maximiza la producción de hidrógeno.

Además, se obtuvo que al agregar un sistema de baterías se permite almacenar la energía sobrante que es generada por el arreglo FV, permitiendo así tener una reserva de energía para cuando sea necesario.

6.2. Conclusiones

En general, se puede concluir que es posible mejorar la eficiencia en el uso de la energía para producir hidrógeno en sistemas FV-Electrolizador mediante la incorporación de un sistema de baterías, permitiendo que tanto el arreglo FV como el electrolizador operen en sus puntos de máxima eficiencia de conversión de energía.

Además de lo anterior, a lo largo de este trabajo se pudieron concluir varios asuntos, los cuales se detallan a continuación:

- Con los resultados obtenidos a través de las simulaciones, se observa que el arreglo FV dimensionado se apropia correctamente a los requerimientos del sistema, ya que para una

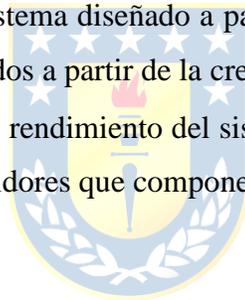
irradiación promedio a lo largo del día se tiene que la mayor parte del tiempo se está entregando energía hacia las baterías.

- Con respecto al sistema de baterías, a través de lo visto en las simulaciones se concluye que este está bien dimensionado, ya que en los estados de carga y descarga las baterías funcionan en sus rangos admisibles de operación dados por el fabricante. Además, se puede observar que si el electrolizador funciona durante las horas de sol el balance de energía sigue siendo negativo, es decir que al final del día las baterías habrán recibido más energía de la que entregan al sistema.
- De las simulaciones. se puede observar que se obtuvo un comportamiento rápido y robusto del sistema, pudiendo afrontar las perturbaciones rápidamente como lo pueden ser cambios de irradiancia, parámetros del electrolizados, desconexión y conexión del electrolizador.
- Con respecto a los criterios de rizado de voltaje impartidos, se puede observar a partir de las simulaciones que estos se cumplen. En particular, para el caso del rizado de voltaje del electrolizador se consideró de 0.2%, ya que de otra forma la corriente que es inyectada al electrolizador tendría un rizado demasiado alto por su alta sensibilidad a los cambios de voltaje.
- De las simulaciones, se concluyó que para no presentar sobretensiones en la carga, esta se debe conectar una vez el voltaje de carga sea estable. Haciendo esto, la sobretensión de partida desaparece.
- De las simulaciones, se concluyó que para obtener un sistema más estable se necesita reforzar el bus DC con baterías controladas por un convertidor de tipo Buck-Boost. Haciendo lo anterior, se disminuyen los transitorios de partida y perturbaciones.

6.3. Trabajo Futuro

- Desarrollo de un modelo más complejo de batería y electrolizador. Como se comentó anteriormente en este trabajo, se tomaron modelos sencillos para así disminuir la carga computacional y disminuir tiempo de simulación.
- Análisis de sensibilidad de parámetros del sistema propuesto mostrado en el Capítulo 5. Esto se enfoca a variar ciertos parámetros de los convertidores y/o resistencia serie de los componentes, para así analizar cómo se comporta el sistema.

- Análisis estabilidad del sistema mostrado en el Capítulo 5. Esto puede ir junto con el análisis de sensibilidad de parámetros, ya que es sabido que, al variar los parámetros del sistema variará también la FT que representa el sistema, moviendo sus polos y ceros.
- Prueba de distintos tipos de convertidores que mejoren el rendimiento del sistema mostrado en el Capítulo 5. En este trabajo se utilizaron convertidores de tipo Boost y Buck-Boost, pero se podría analizar el rendimiento del sistema para otro tipo de convertidores que cumplan la misma función.
- Realizar un sistema de control a partir de modelos matemáticos de convertidores más realistas. Para este trabajo se diseñaron los convertidores y controles a partir de un sistema sin pérdidas (a excepción del convertidor tipo Boost), por lo que para considerar un caso más realista se podrían agregar más elementos, como por ejemplo elementos que simulen las pérdidas por efecto Joule.
- Realizar un prototipo físico que permita verificar los resultados obtenidos en este trabajo. En este trabajo solo se analizó el sistema diseñado a partir de simulación, por lo que sería ideal comprobar los resultados obtenidos a partir de la creación de un prototipo físico similar.
- Encontrar maneras de mejorar el rendimiento del sistema, como lo puede ser la optimización de los parámetros de los convertidores que componen el sistema propuesto.



Bibliografía

- [1] Ozcan Atlam, Mohan Kolhe, “Equivalent electrical model for a proton exchange membrane (PEM) electrolyser”, *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issues 8–9, 2011, Pages 2952-2957.
- [2] B. Guzmán, C. Spinsati, “Producción de Hidrogeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica”, Proyecto Final, Catedra Integración IV, 2018.
- [3] EUROPE – SOLAR STORE.COM. BYD Battery-Box Premium LVS 24.0. Accedido Septiembre 2022. [En línea]. Recuperado de: <https://www.europe-solarstore.com/byd-battery-box-premium-lvs-24-0-24-kwh.html>
- [4] HITOUCH 5. CSP18-72H. Accedido Septiembre 2022. [En línea]. Recuperado de: https://elektro.in.ua/system/storage/download/CSP18-72H_530-545W.pdf
- [5] S. Shongwe, Member, IEEE, M. Hanif, Member, IEEE, “Gauss-Seidel Iteration Based Parameter Estimation for a Single Diode Model of a PV Module”, Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, Rondebosch, 7701, South Africa.
- [6] Freddy Fernando Valderrama, Henry Moreno C. y Héctor Manuel Vega, “Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost”, *Ingenium*, vol. 12, N°. 24, 2011, págs. 44-55.
- [7] D’ Alessio, L. A., González, L. G., & Cáceres, R. O. (2014). “Diseño y Construcción de un Convertidor Boost de Pequeña Potencia, con Propósitos Educativos y de Investigación”. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 6(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v6i2.183>
- [8] Carlos Victoriano Gutiérrez, Ignacio Rosales San Martin, “Estudio de convertidores DC-DC e implementación de un convertidor Boost (Elevador)”, Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Concepción, 2019.
- [9] Ramos-Paja, C.A.; Bastidas-Rodríguez, J.D.; González, D.; Acevedo, S.; Peláez-Restrepo, J. “Design and Control of a Buck–Boost Charger-Discharger for DC-Bus Regulation in Microgrids”. *Energies* 2017, 10, 1847. <https://doi.org/10.3390/en10111847>
- [10] MOUSER ELECTRONICS. 300GJ282U6R3B. Accedido Septiembre 2022. [En línea]. Recuperado de: [300GJ282U6R3B Cornell Dubilier - CDE | Mouser Chile](https://www.mouser.com/ProductDetail/300GJ282U6R3B-Cornell-Dubilier-CDE-Mouser-Chile)
- [11] MOUSER ELECTRONICS. 195E100. Accedido Septiembre 2022. [En línea]. Recuperado de: [195E100 Hammond Manufacturing | Mouser Chile](https://www.mouser.com/ProductDetail/195E100-Hammond-Manufacturing-Mouser-Chile)

- [12] MOUSER ELECTRONICS. SIR4602LDP-T1-RE3. Accedido Septiembre 2022. [En línea]. Recuperado de: [SIR4602LDP-T1-RE3 Vishay Semiconductors | Mouser Chile](#)
- [13] MOUSER ELECTRONICS. VS-400UR80D. Accedido Septiembre 2022. [En línea]. Recuperado de: [VS-400UR80D Vishay Semiconductors | Mouser Chile](#)
- [14] MathWorks. PV Array: Implement PV array modules. Accedido Octubre 2022. [En línea]. Recuperado de: <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html;jsessionid=3d7b1cee3701f57f7ebf59275f35>
- [15] Ministerio de energía de Chile. Accedido Octubre 2022. [En línea]. Recuperado de: <https://solar.minenergia.cl/inicio>
- [16] Apuntes de la asignatura de pregrado “Sistemas de Control - 543244”, disponibles en la página personal del Profesor José R. Espinoza C. Sección Asignaturas, <http://www2.udec.cl/jose.espinoza/asignaturas.html>. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [17] Apuntes de la asignatura de pregrado “Sistemas Lineales Dinámicos - 543214”, disponibles en la página personal del Profesor José R. Espinoza C. Sección Asignaturas, <http://www2.udec.cl/jose.espinoza/asignaturas.html>. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [18] Acciona. (s.f.). “EL HIDRÓGENO VERDE: LA ENERGÍA DEL FUTURO CLAVE EN LA DESCARBONIZACIÓN”. Accedido Diciembre 2022. [En línea]. Recuperado de: https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=02021864894
- [19] Bnamericas. (30 de junio de 2022). “Hidrógeno verde: ministro de Energía perfila rol del Estado chileno”. Accedido Diciembre 2022. [En línea]. Recuperado de: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/hidrogeno-verde-ministro-de-energia-perfila-rol-del-estado-chileno>
- [20] 4e Chile. (03 de noviembre de 2020). “Lanzamiento de la Estrategia Nacional de Hidrógeno verde para Chile”. Accedido Diciembre 2022. [En línea]. Recuperado de: <https://4echile.cl/noticias/lanzamiento-de-la-estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde-para-chile/>

- [21] Bnamericas. (24 de junio de 2022). “Chile busca proyectos de optimización de producción de hidrógeno verde”. Accedido Diciembre 2022. [En línea]. Recuperado de: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/hidrogeno-verde-ministro-de-energia-perfila-rol-del-estado-chileno>
- [22] IEA, 2019. The future of hydrogen: Seizing today’s opportunities. Recuperado de: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf
- [23] Punto Solar. Accedido Octubre 2022. [En línea]. Recuperado de: <https://puntosolar.cl/>



Anexo A

Anexo A.1

A continuación, se dan a conocer cómo se obtienen los parámetros del modelo de la celda electrolizadora mostrado en las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3).

Los parámetros p_0 , T_0 , se obtienen de la **Tabla 2-1**. Mientras que, el parámetro e_{rev_0} se obtiene de forma gráfica a partir de la **Figura 2-1**.

El parámetro R_{i0} , se obtiene reemplazando los valores óptimos en las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3), obteniendo:

$$R_{i0} = \frac{2[V] - 1.75[V]}{108[A]} = \frac{1}{432} [\Omega]$$

El parámetro k no se puede calcular debido a que no existe información en [2] para poder ajustarlo apropiadamente. Igualmente, este parámetro no toma relevancia en la ecuación (2.1), ya que se considera que la celda electrolizadora opera en una condición óptima igual a p_0 .

El parámetro dR_t se obtiene mediante la herramienta “Curve Fitting” de Matlab. Primeramente, se obtienen las pendientes que representan a cada una de las gráficas a distintas temperaturas gráficamente de la **Figura 2-5**, obteniendo los siguiente:

Tabla A-0-1: Puntos utilizados para ajustar el parámetro dR_t .

$T [^{\circ}C]$	$R_i(T) [\Omega]$
70	3.125m
60	3.6458m
50	4.1667m
40	4.6875m

Luego, utilizando la ecuación (2.1) se procede a ajustar estos puntos a la siguiente función:

$$R_i(T) - R_{i0} = dR_t(T - T_0) \dots (A.1)$$

Finalmente, utilizando la herramienta “Curve Fitting” se obtiene que el valor de dR_t que mejor se ajusta a la ecuación (A.1) con los valores de la **Tabla A-0-1** es de: $dR_t = -6.173e - 05$.

En la **Figura A-0-1**, se muestra el resultado dado por “Curve Fitting”.

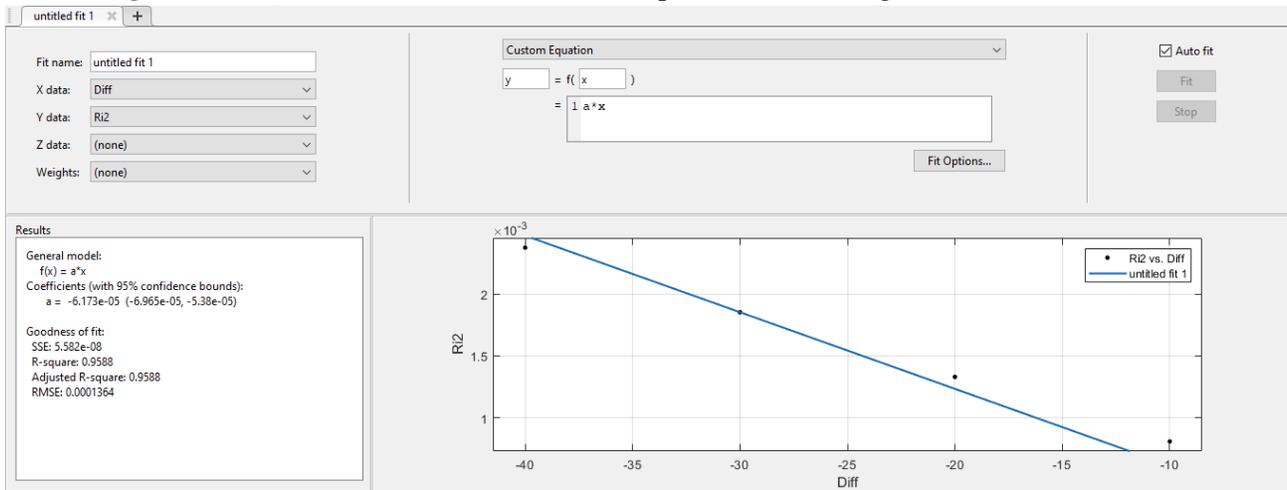


Figura A-0-1: Resultado dado por la herramienta “Curve Fitting” de Matlab.



Anexo A.2

Anexo A.2.1

A continuación, se muestra el procedimiento que se realiza para obtener las ecuaciones (4.3) y (4.4). Primeramente, a partir del circuito mostrado en la **Figura 4-7** se obtienen las ecuaciones de las 2 topologías obtenidas a partir de la señal de activación "u". Al hacer $u = 1$ (Mb encendido) y al hacer $u = 0$ (Mb apagado), quedándonos lo siguiente:

- Con $u = 1$:

$$L_{PV} \frac{di_L}{dt} = v_C + i_C R_C - i_L R_L \quad \dots (A.2)$$

$$C_{PV} \frac{dv_C}{dt} = i_C = \frac{R_{PV} * i_{SC} - R_{PV} * i_L - v_C}{(R_{PV} + R_C)} \quad \dots (A.3)$$

- Con $u = 0$:

$$L_{PV} \frac{di_L}{dt} = v_C + i_C R_C - V_{bus} - i_L R_L \quad \dots (A.4)$$

$$C_{PV} \frac{dv_C}{dt} = i_C = \frac{R_{PV} * i_{SC} - R_{PV} * i_L - v_C}{(R_{PV} + R_C)} \quad \dots (A.5)$$

Además, hay que considerar que: $v_{PV} = v_C + i_C R_C \quad \dots (A.6)$

Por lo tanto, relacionando las ecuaciones (A.2) con (A.4) y (A.3) con (A.5), se obtiene el modelo conmutado:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_C + i_C R_C - i_L R_L - V_{bus}(1 - u)}{L_{PV}} \quad \dots (A.7)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{R_{PV} * i_{SC} - R_{PV} * i_L - v_C}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} \quad \dots (A.8)$$

Luego, considerando una aproximación de pequeño rizado, podemos obtener el modelo promediado simplemente reemplazando u por el ciclo de trabajo "d" en las ecuaciones (A.7) y (A.8), obteniendo así:

$$F_1: \frac{di_L}{dt} = \frac{v_C + i_C R_C - i_L R_L - V_{bus}(1 - d)}{L_{PV}} \quad \dots (A.9)$$

$$F_2 := \frac{dv_C}{dt} = \frac{R_{PV} * i_{SC} - R_{PV} * i_L - v_C}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} \dots (A.10)$$

Notar que, estas ecuaciones obtenidas son las mismas que las mostradas en (4.3) y (4.4).

Anexo A.2.2

A continuación, se muestra el procedimiento para obtener las matrices de estados a partir de las ecuaciones (A.9) y (A.10), las cuales se obtienen a través de las matrices jacobianas de la siguiente manera.

En primer lugar, recordar que para este caso se definieron:

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \dots (A.11)$$

$$u = \begin{bmatrix} d \\ V_{bus} \\ i_{SC} \end{bmatrix} \dots (A.12)$$

$$y = [v_{PV}] \dots (A.13)$$

Luego, nuestras matrices jacobianas tienen la siguiente forma:

$$A_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial i_L} & \frac{\partial F_1}{\partial v_C} \\ \frac{\partial F_2}{\partial i_L} & \frac{\partial F_2}{\partial v_C} \end{bmatrix} \dots (A.14)$$

$$B_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial d} & \frac{\partial F_1}{\partial V_{bus}} & \frac{\partial F_1}{\partial i_{SC}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial d} & \frac{\partial F_2}{\partial V_{bus}} & \frac{\partial F_2}{\partial i_{SC}} \end{bmatrix} \dots (A.15)$$

$$C_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial i_L} & \frac{\partial y}{\partial v_C} \end{bmatrix} \dots (A.16)$$

$$D_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial d} & \frac{\partial y}{\partial V_{bus}} & \frac{\partial y}{\partial i_{SC}} \end{bmatrix} \dots (A.17)$$

Realizando las operaciones de derivadas parciales en cada matriz, se obtiene:

$$A_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{PV} * R_C}{L_{PV}(R_{PV} + R_C)} - \frac{R_L}{L_{PV}} & \frac{1}{L_{PV}} - \frac{R_C}{L_{PV}(R_{PV} + R_C)} \\ \frac{-R_{PV}}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} & \frac{-1}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} \end{bmatrix} \dots (A.18)$$

$$B_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{V_{bus}}{L_{PV}} & \frac{-(1-d)}{L_{PV}} & \frac{R_{PV} * R_C}{L_{PV}(R_{PV} + R_C)} \\ 0 & 0 & \frac{R_{PV}}{C_{PV}(R_{PV} + R_C)} \end{bmatrix} \dots (A.19)$$

$$C_{PV} = \begin{bmatrix} R_C \left(\frac{-R_{PV}}{R_{PV} + R_C} \right) & 1 - \frac{R_C}{R_{PV} + R_C} \end{bmatrix} \dots (A.20)$$

$$D_{PV} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{R_{PV} * R_C}{R_{PV} + R_C} \end{bmatrix} \dots (A.21)$$

Notar que, las matrices obtenidas son las mismas que las mostradas en (4.13), (4.14), (4.15) y (4.16).



Anexo A.2.3

A continuación, se muestra el código del algoritmo MPPT que fue implementado en Matlab.

```
function Vref= RefGen(V,I)

ns=2;
Vrefmax=42*ns;
Vrefmin=10*ns;
Vrefinit=41.93*ns;
deltaVref=500e-3;
persistent Vold Pold Vrefold;

dataType='double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Vrefold=Vrefinit;
end

P=V*I;
dV=V-Vold;
dP=P-Pold;
tol=1e-2;

if dP~=0
    if dP<0
        if dV<0
            Vref=Vrefold+deltaVref;
        else
            Vref=Vrefold-deltaVref;
        end
    else
        if dV<0
            Vref=Vrefold-deltaVref;
        else
            Vref=Vrefold+deltaVref;
        end
    end
else
    Vref=Vrefold;
end
if Vref>=Vrefmax || Vref<=Vrefmin
    Vref = Vrefold;
end

Vold=V;
Pold=P;
Vrefold=Vref;
```

Anexo A.2.4

A continuación, se muestra el circuito en Psim diseñado para obtener el diagrama de bode mostrado en la **Figura 4-9** y del modelo obtenido en la ecuación (4.25).

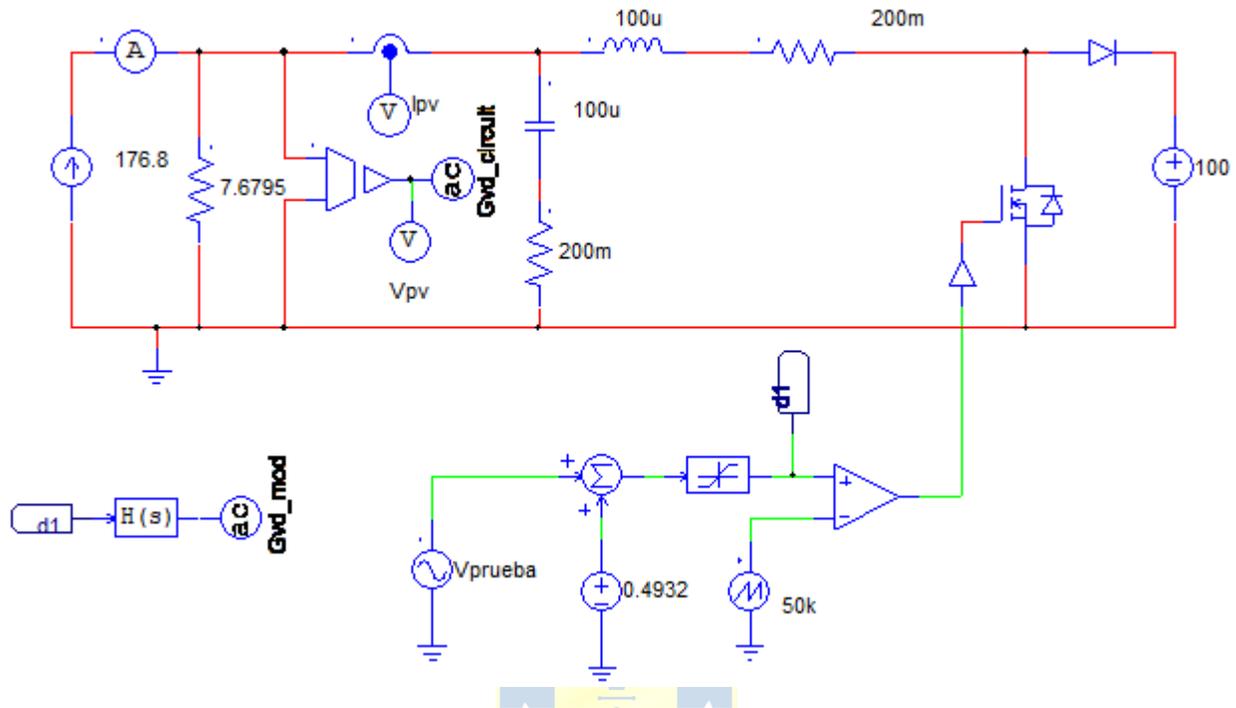


Figura A-0-2: Circuito diseñado en Psim para obtener la Figura 4-9.

Anexo A.3

Anexo A.3.1

A continuación, se muestra el procedimiento que se realiza para obtener las ecuaciones (4.29) y (4.30). Primeramente, a partir del circuito mostrado en la **Figura 4-11** se obtienen las ecuaciones de las 2 topologías obtenidas a partir de la señal de activación "u". Al hacer $u = 1$ (Mbat_1 encendido - Mbat_2 apagado) y al hacer $u = 0$ (Mbat_1 apagado - Mbat_2 encendido), quedándonos lo siguiente:

- Con $u = 1$:

$$L_{bat} \frac{di_L}{dt} = V_{bat} \quad \dots (A.22)$$

$$C_{bat} \frac{dv_C}{dt} = -i_0 \quad \dots (A.23)$$

- Con $u = 0$:

$$L_{bat} \frac{di_L}{dt} = -v_C \quad \dots (A.24)$$

$$C_{bat} \frac{dv_C}{dt} = i_L - i_0 \quad \dots (A.25)$$

Por lo tanto, relacionando las ecuaciones (A.22) con (A.24) y (A.23) con (A.25), se obtiene el modelo conmutado:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{bat} * u - v_C(1 - u)}{L_{bat}} \quad \dots (A.26)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L(1 - u) - i_0}{C_{bat}} \quad \dots (A.27)$$

Luego, considerando una aproximación de pequeño rizado, se puede obtener el modelo promediado simplemente reemplazando u por el ciclo de trabajo " d " en las ecuaciones (A.26) y (A.27), obteniendo así:

$$F_1 := \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{bat} * d - v_C(1 - d)}{L_{bat}} \quad \dots (A.28)$$

$$F_2 := \frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L(1 - d) - i_0}{C_{bat}} \quad \dots (A.29)$$

Notar que, estas ecuaciones obtenidas son las mismas que las mostradas en (4.29) y (4.30).

Anexo A.3.2

A continuación, se muestra el procedimiento para obtener las matrices de estados a partir de las ecuaciones (A.28) y (A.29), las cuales se obtienen a través de las matrices jacobianas de la siguiente manera.

En primer lugar, recordar que para este caso se definieron:

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad \dots (A.30)$$

$$u = \begin{bmatrix} d \\ V_{bat} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad \dots (A.31)$$

$$y_1 = [i_L] \quad \dots (A.32)$$

$$y_2 = [v_c] \dots (A.33)$$

Luego, nuestras matrices jacobianas tendrán la siguiente forma:

$$A_{bat} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial i_L} & \frac{\partial F_1}{\partial v_c} \\ \frac{\partial F_2}{\partial i_L} & \frac{\partial F_2}{\partial v_c} \end{bmatrix} \dots (A.34)$$

$$B_{bat} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial d} & \frac{\partial F_1}{\partial V_{bat}} & \frac{\partial F_1}{\partial i_0} \\ \frac{\partial F_2}{\partial d} & \frac{\partial F_2}{\partial V_{bat}} & \frac{\partial F_2}{\partial i_0} \end{bmatrix} \dots (A.35)$$

$$C_{bat} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial i_L} & \frac{\partial y}{\partial v_c} \end{bmatrix} \dots (A.36)$$

$$D_{bat} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial d} & \frac{\partial y}{\partial V_{bat}} & \frac{\partial y}{\partial i_0} \end{bmatrix} \dots (A.37)$$

Realizando las operaciones de derivadas parciales en cada matriz, se obtiene:

$$A_{bat} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L_{bat}} \\ \frac{1-D}{C_{bat}} & 0 \end{bmatrix} \dots (A.38)$$

$$B_{bat} = \begin{bmatrix} \frac{V_{bat} + V_C}{L_{bat}} & \frac{D}{L_{bat}} & 0 \\ -\frac{I_L}{C_{bat}} & 0 & -\frac{1}{C_{bat}} \end{bmatrix} \dots (A.39)$$

$$C_{bat,1} = [1 \quad 0] \dots (A.40)$$

$$C_{bat,2} = [0 \quad 1] \dots (A.41)$$

$$D_{bat} = [0 \quad 0 \quad 0] \dots (A.42)$$

Notar que, las matrices obtenidas son las mismas que las mostradas en (4.39), (4.40), (4.41), (4.42) y (4.43).

Anexo A.3.3

A continuación, se muestra el circuito en Psim diseñado para obtener el diagrama de bode mostrado en la **Figura 4-12** y del modelo obtenido en la ecuación (4.54).

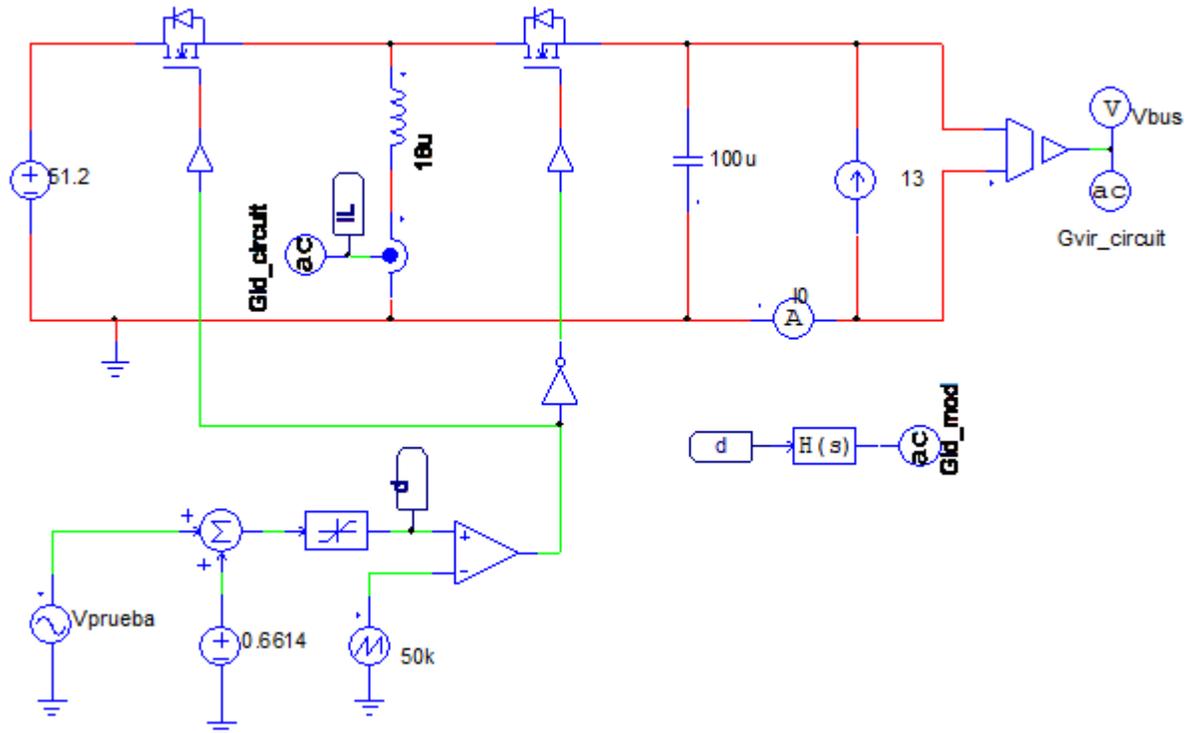


Figura A-0-3: Circuito diseñado en Psim para obtener la Figura 4-12.

Anexo A.4

Anexo A.4.1

A continuación, se muestra el procedimiento que se realizó para obtener las ecuaciones (4.60) y (4.61). Primeramente, a partir del circuito mostrado en la **Figura 4-17** obtenemos las ecuaciones de las 2 topologías obtenidas a partir de la señal de activación "u". Al hacer $u = 1$ (Mload_1 encendido - Mload_2 apagado) y al hacer $u = 0$ (Mload_1 apagado - Mload_2 encendido), quedándonos lo siguiente:

- Con $u = 1$:

$$L_{load} \frac{di_L}{dt} = V_{bus} \dots (A.43)$$

$$C_{load} \frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{R} \dots (A.44)$$

- Con $u = 0$:

$$L_{load} \frac{di_L}{dt} = -v_C \dots (A.45)$$

$$C_{load} \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R} \dots (A.46)$$

Por lo tanto, relacionando las ecuaciones (A.43) con (A.45) y (A.44) con (A.46), se obtiene el modelo conmutado:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{bus} * d - v_C(1 - u)}{L_{load}} \dots (A.47)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L(1 - u) - \frac{v_C}{R}}{C_{load}} \dots (A.48)$$

Luego, considerando una aproximación de pequeño rizado, se puede obtener el modelo promediado simplemente reemplazando u por el ciclo de trabajo " d " en las ecuaciones (A.47) y (A.48), obteniendo así:

$$F_1 := \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{bus} * d - v_C(1 - d)}{L_{load}} \dots (A.49)$$

$$F_2 := \frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L(1 - d) - \frac{v_C}{R}}{C_{load}} \dots (A.50)$$

Notar que, estas ecuaciones obtenidas son las mismas que las mostradas en (4.60) y (4.61).

Anexo A.4.2

A continuación, se muestra el procedimiento para obtener las matrices de estados a partir de las ecuaciones (A.49) y (A.50), las cuales se obtienen a través de las matrices jacobianas de la siguiente manera.

En primer lugar, recordar que para este caso se definieron:

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \dots (A.51)$$

$$u = \begin{bmatrix} d \\ V_{bus} \end{bmatrix} \dots (A.52)$$

$$y_1 = [i_L] \dots (A.53)$$

$$y_2 = [v_c] \dots (A.54)$$

Luego, las matrices jacobianas tendrán la siguiente forma:

$$A_{load} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial i_L} & \frac{\partial F_1}{\partial v_c} \\ \frac{\partial F_2}{\partial i_L} & \frac{\partial F_2}{\partial v_c} \end{bmatrix} \dots (A.55)$$

$$B_{load} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial d} & \frac{\partial F_1}{\partial V_{bus}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial d} & \frac{\partial F_2}{\partial V_{bus}} \end{bmatrix} \dots (A.56)$$

$$C_{load} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial i_L} & \frac{\partial y}{\partial v_c} \end{bmatrix} \dots (A.57)$$

$$D_{load} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial d} & \frac{\partial y}{\partial V_{bus}} \end{bmatrix} \dots (A.58)$$

Realizando las operaciones de derivadas parciales en cada matriz, se obtiene:

$$A_{load} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L_{load}} \\ \frac{1-D}{C_{load}} & -1 \end{bmatrix} \dots (A.59)$$

$$B_{load} = \begin{bmatrix} \frac{V_{bus} + V_C}{L_{load}} & \frac{D}{L_{load}} \\ -I_L & 0 \\ C_{load} & \end{bmatrix} \dots (A.60)$$

$$C_{load,1} = [1 \ 0] \dots (A.61)$$

$$C_{load,2} = [0 \ 1] \dots (A.62)$$

$$D_{load} = [0 \ 0] \dots (A.63)$$

Notar que, las matrices obtenidas son las mismas que las mostradas en (4.70), (4.71), (4.72), (4.73) y (4.74).

Anexo A.4.3

A continuación, se muestra el circuito en Psim diseñado para obtener el diagrama de bode del circuito de la **Figura 4-18** y del modelo obtenido en la ecuación (4.82).

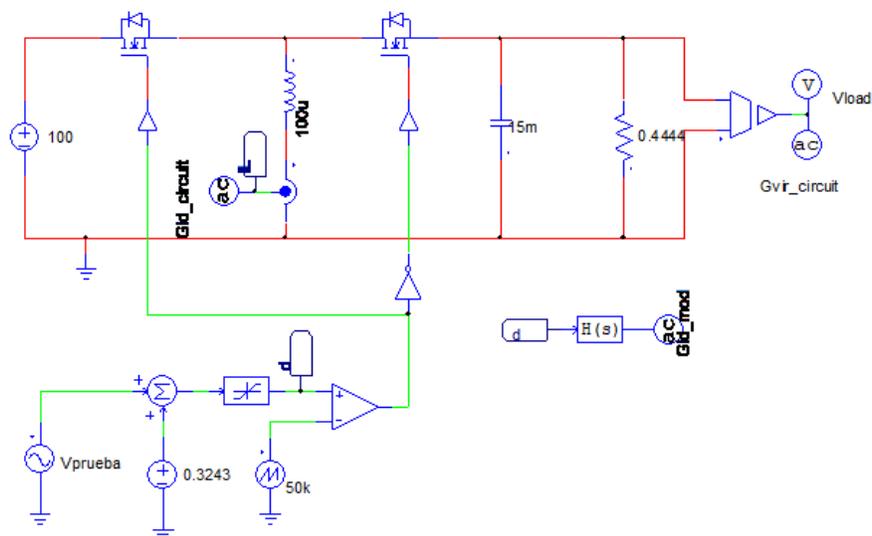


Figura A-0-4: Circuito diseñado en Psim para obtener la Figura 4-18.

Anexo A.5

A continuación, se muestran expandidos los bloques que se muestran en la **Figura 5-1**.

Bloque Sistema FV

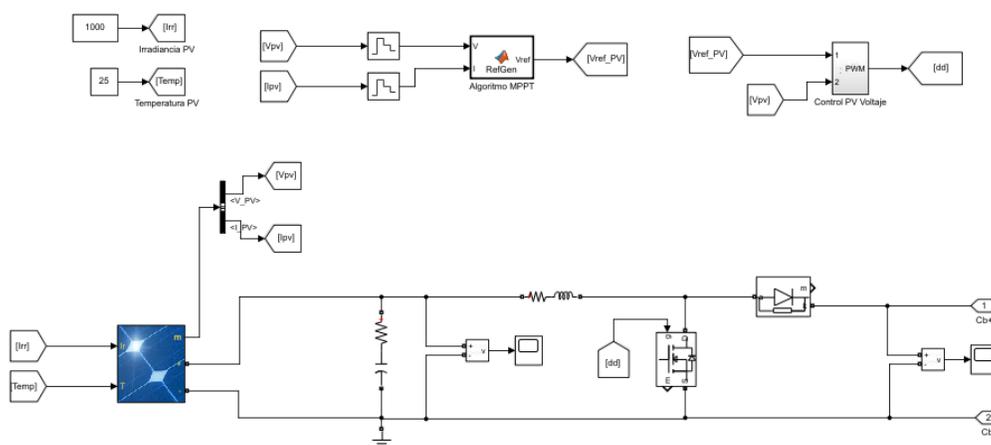


Figura A-0-5: Bloque Sistema FV expandido.

Bloque Sistema de Baterías

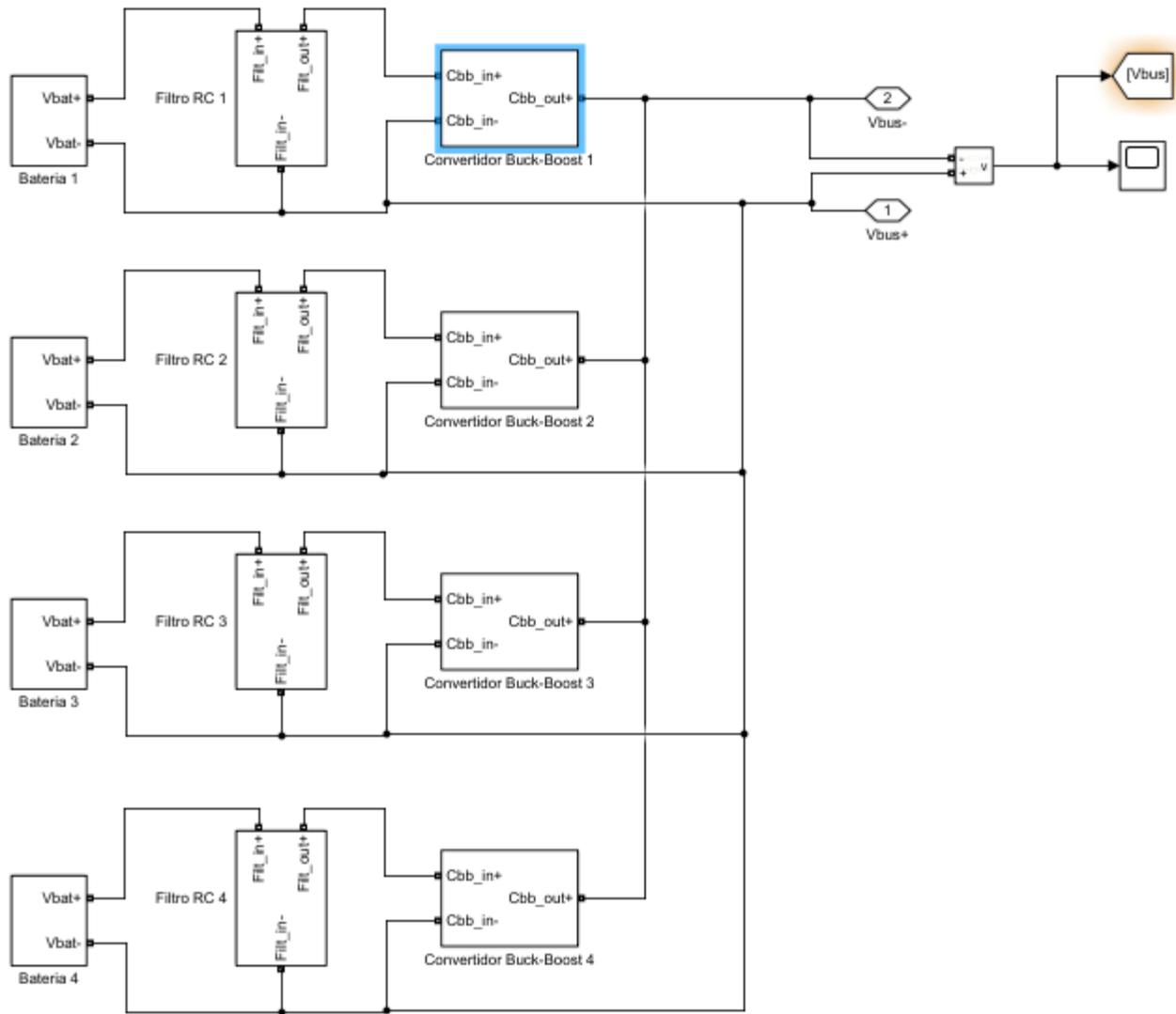


Figura A-0-7: Bloque Sistema de Baterías expandido.

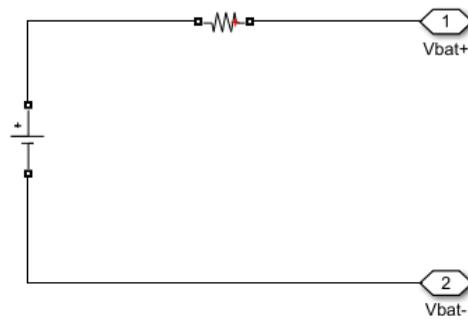


Figura A-0-6: Bloque Batería 1 expandido.

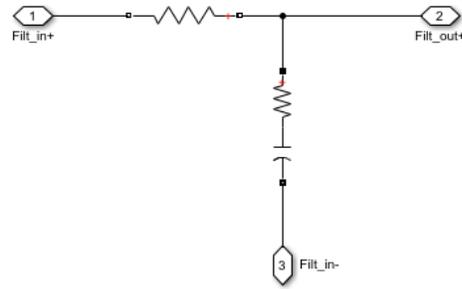


Figura A-0-8: Bloque Filtro RC 1 expandido.

Bloque Convertidor Buck-Boost

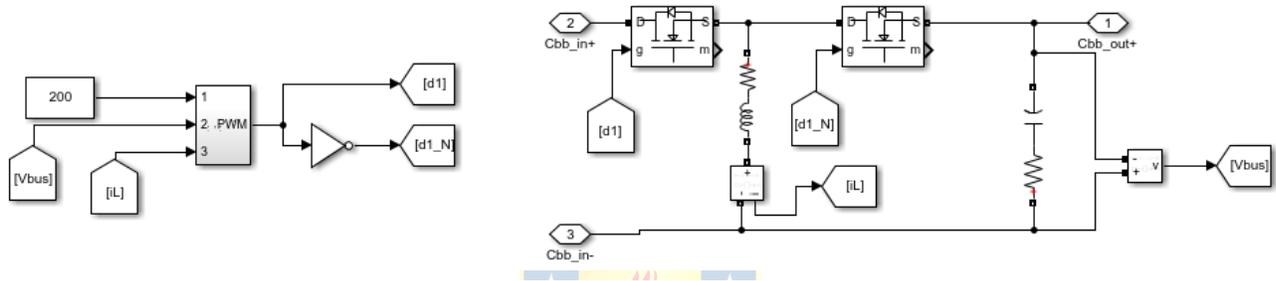


Figura A-0-10: Bloque Convertidor Buck-Boost 1 expandido.

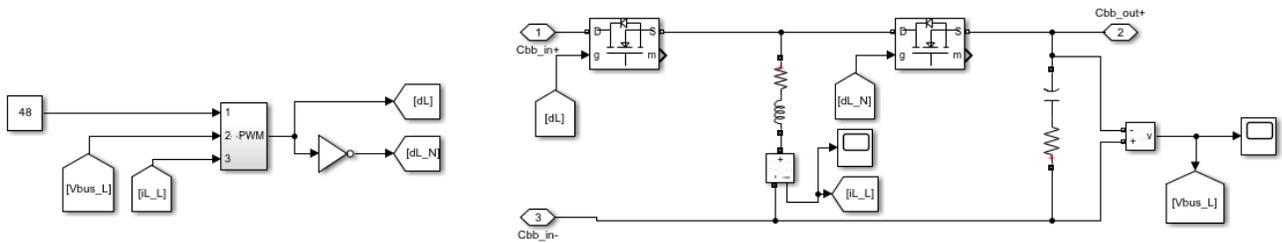


Figura A-0-9: Bloque Convertidor Buck-Boost expandido.

Bloque Electrolizador

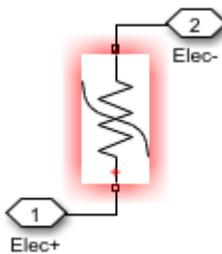


Figura A-0-11: Bloque Electrolizador expandido.

Anexo B: Sistema Propuesto considerando pérdidas

Anexo B.1. Introducción

En este anexo, se añaden resistencias a los elementos que componen al sistema mostrado en la **Figura 5-1**, simulando así las pérdidas producidas por el efecto joule. En particular, se añade un valor resistivo en serie característico a los condensadores e inductores que componen el sistema. Y para el caso de los diodos y Mosfet además de las perdidas resistivas se considera el voltaje de conducción directa (V_f).

Añadiendo estas pérdidas al sistema se podrá a analizar el comportamiento de este ante los mismos eventos presentado en el Capítulo 5, luego se realiza un análisis comparativo de los resultados.

En la **Tabla B-0-1**, se muestran los valores y resistencia de pérdidas de los elementos que serán utilizados.

Tabla B-0-1: Valores característicos de los elementos utilizados para el Sistema de la Figura 5-1.

Sistema	Descripción	Elemento	Valor	Resistencia serie	Valor
Fotovoltaico	Condensador del Convertidor Boost	C_{pv}	100[μF]	$R_{C,pv}$	100[m Ω]
	Inductor del Convertidor Boost	L_{pv}	100[μH]	$R_{L,pv}$	200[m Ω]
Baterías	Condensador del Convertidor Buck-Boost/Batería	C_{bat}	100[μF]	$R_{C,bat}$	20[m Ω]
	Inductor del Convertidor Buck-Boost/Batería	L_{bat}	18[μH]	$R_{L,bat}$	20[m Ω]
	Batería	V_{bat}	51.2[V]	$R_{int,bat}$	40[m Ω]
	Resistencia Filtro RC	R_{filt}	40[m Ω]	-	-
	Condensador Filtro RC	C_{filt}	40[mF]	$R_{C,filt}$	1[m Ω]
Electrolizador	Condensador del Convertidor Buck-Boost/Carga	C_{load}	15[mF]	$R_{C,pv}$	0.2[m Ω]
	Inductor del Convertidor Buck-Boost/Carga	L_{load}	100[μH]	$R_{L,pv}$	20[m Ω]
General	Mosfet	$V_{f,mosfet}$	1.1[V]	$R_{on,mosfet}$	10[m Ω]
	Diodo	$V_{f,diodo}$	0.8[V]	$R_{d,diodo}$	10[m Ω]

En [10] se encuentran los capacitores que se toman como referencia para obtener la resistencia en serie de este elemento.

En [11] se encuentran los inductores que se toman como referencia para obtener la resistencia en serie de este elemento.

En [3] se encuentra la batería que se toma como referencia para obtener la resistencia en serie de este elemento.

En [12] se encuentran los Mosfet que se toman como referencia para obtener la resistencia en serie de este elemento.

En [13] se encuentran los diodos que se toman como referencia para obtener la resistencia en serie de este elemento.

Anexo B.2. Simulaciones

A continuación, se analiza el comportamiento del sistema propuesto de la **Figura 5-1** considerando pérdidas ante distintos eventos. Para lo cual se grafican cada una de las variables de interés y se hacen los comentarios relevantes de lo obtenido en cada evento.

En particular se dividirán los eventos en:

- Eventos de cambios en la Carga.
- Eventos de cambios en el Arreglo FV.
- Eventos de cambios en las Baterías.



Anexo B.2.1. Eventos de cambios en la Carga

A continuación, se analizan distintos eventos de cambios de carga. En particular se simulan los eventos de conexión de carga y desconexión de carga, además de eventos de cambios en los parámetros en el electrolizador.

A. Evento de conexión y desconexión de carga

En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en 0.1[s] y desconectarla en 0.3[s]. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una temperatura de $25^{\circ}C$.
- El electrolizador está operando en condiciones óptimas, es decir a una temperatura $80^{\circ}C$ y presión de 6[bar].
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

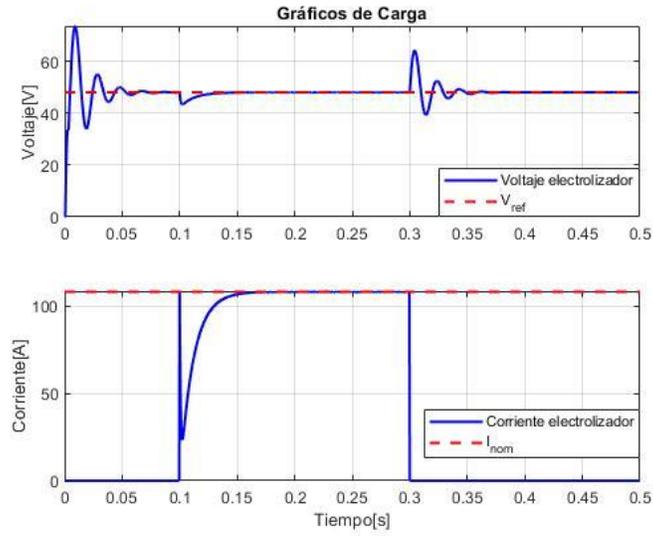


Figura B-0-1: Gráficas de carga ante el evento de conexión y desconexión de carga.

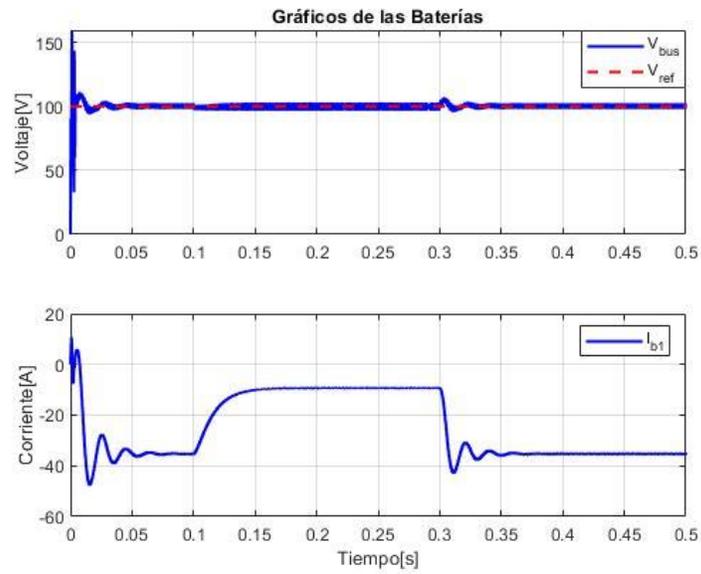


Figura B-0-2: Gráficas de las baterías ante el evento de conexión y desconexión de carga.

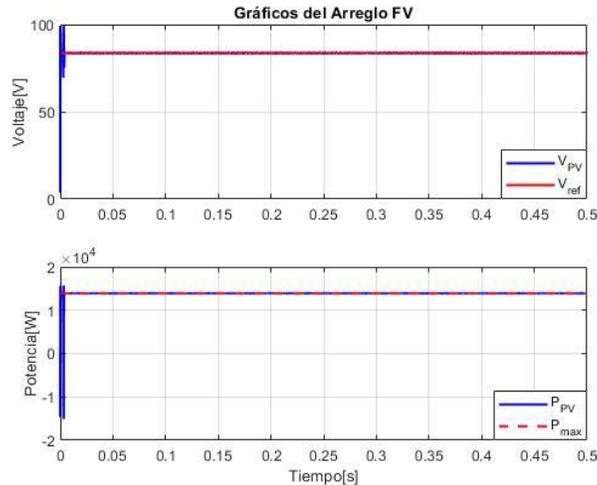


Figura B-0-3: Gráficas del arreglo FV ante el evento de conexión y desconexión de carga.

De la **Figura B-0-1**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

De la **Figura B-0-3**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

De la **Figura B-0-2**, se puede observar que:

- De la curva en el voltaje del bus DC, no se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.
- En la curva de corriente de las baterías ya se pueden ver cambios con respecto al caso sin pérdidas, donde en el tiempo en que la carga esta desconectada se puede ver que la corriente en estado estacionario está cerca de los $-35[A]$. Mientras que, en el tiempo que la carga está conectada, la corriente en estado estacionario está un poco debajo de los $-10[A]$. Esta disminución de corriente es debido a las pérdidas agregadas al sistema, notándose más en el caso en que la carga se encuentra conectada ya que en este caso se consideran las pérdidas del convertidor conectado a la carga.

B. Evento de cambios de parámetros en el electrolizador

Es normal que el electrolizador a lo largo del día cambie su temperatura de operación.

Por lo anterior, en este evento se analiza la respuesta del sistema al cambiar el parámetro de temperatura del electrolizador.

En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en 0.1[s] y desconectarla en 0.3[s]. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una temperatura de $25^\circ C$.
- El electrolizador está operando a una temperatura $40^\circ C$ y presión de 6[bar].
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

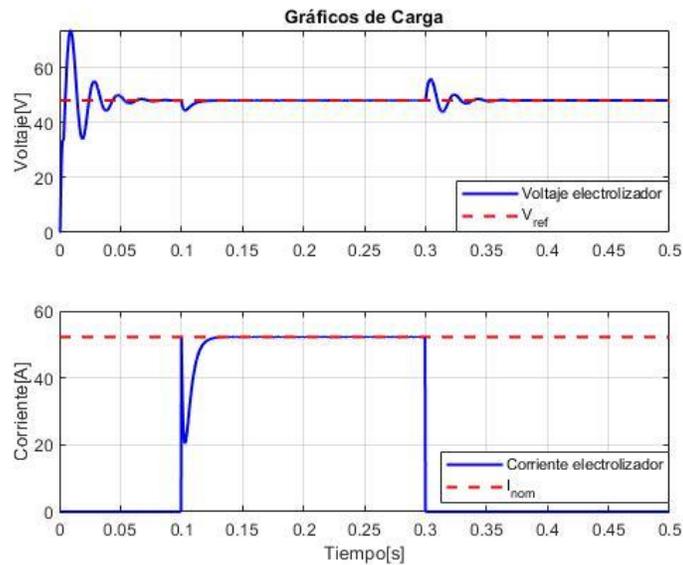


Figura B-0-4: Gráficas de carga ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.

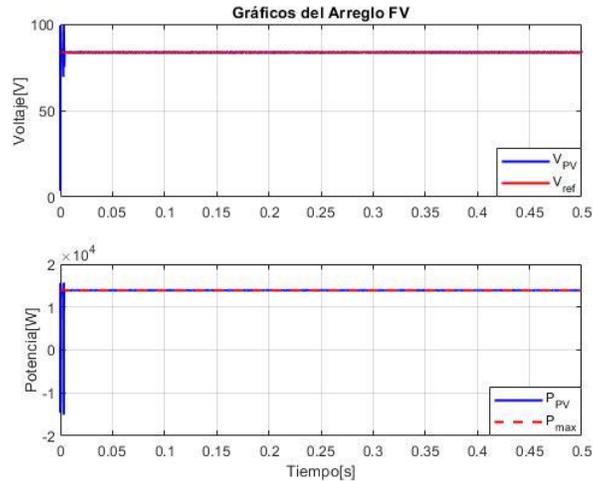


Figura B-0-5: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.

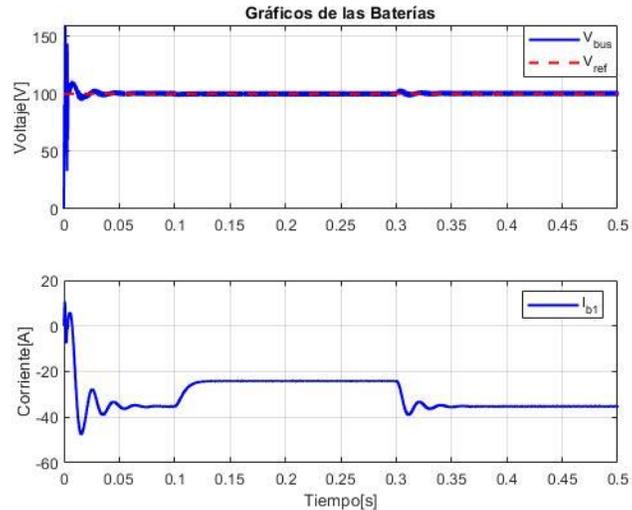


Figura B-0-6: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de parámetros en el electrolizador.

De la **Figura B-0-4**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

De la **Figura B-0-5**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

De la **Figura B-0-6**, se puede observar que:

- De la curva en el voltaje del bus DC, no se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

- En la curva de corriente de las baterías se pueden ver cambios con respecto al caso sin pérdidas, donde en el tiempo en que la carga esta desconectada se puede ver que la corriente en estado estacionario está cerca de los $-35[\text{A}]$. Mientras que, en el tiempo que la carga está conectada, la corriente en estado estacionario está cerca de los $-25[\text{A}]$. Esta disminución de corriente es debido a las pérdidas agregadas al sistema, notándose más en el caso en que la carga se encuentra conectada, ya que en este caso se consideran las pérdidas del convertidor conectado a la carga.

C. *Rizado de voltaje y corriente*

A continuación, se analiza el rizado de voltaje y corriente de las distintas curvas características que se producen en este evento de desconexión y conexión de carga.

Se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en $0.1[\text{s}]$ y desconectarla en $0.3[\text{s}]$. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}]$ y una temperatura de 25°C .
- El electrolizador está operando en condiciones óptimas, es decir a una temperatura 80°C y presión de $6[\text{bar}]$.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de $51.2[\text{V}]$.

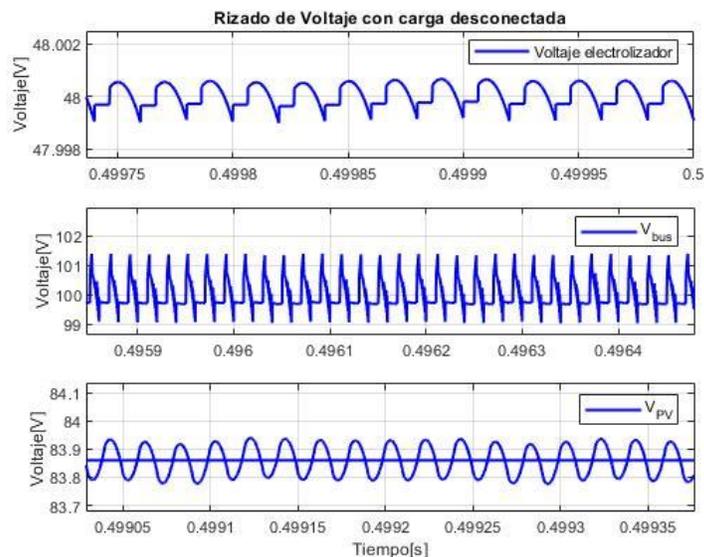


Figura B-0-7: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga desconectada.

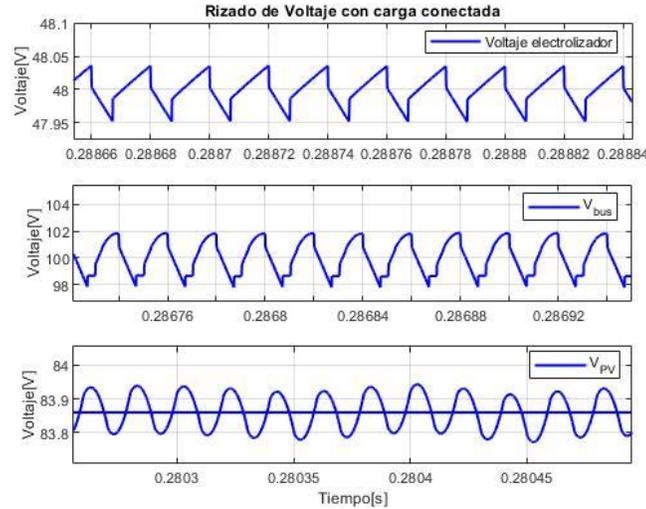


Figura B-0-8: Rizado de voltaje de carga, bus DC y arreglo FV con la carga conectada.

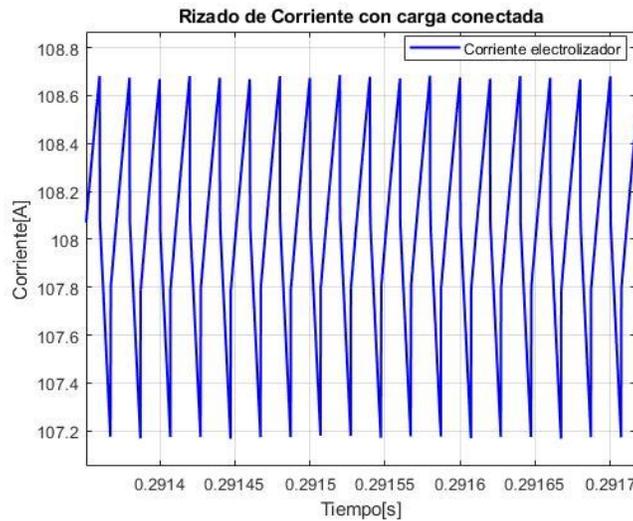


Figura B-0-9: Rizado de corriente de carga con la carga conectada.

De la **Figura B-0-7**, se puede observar que:

- El rizado de voltaje de carga es de aproximadamente 0.00208%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-3**.
- El rizado de voltaje en el bus DC es de aproximadamente 2%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-2**.
- El rizado de voltaje del arreglo FV es de aproximadamente 0.24%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-1**.

De la **Figura B-0-8**, se puede observar que:

- El rizado de voltaje de carga es de aproximadamente 0.1042%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-3**.
- El rizado de voltaje en el bus DC es de aproximadamente 2%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-2**.
- El rizado de voltaje del arreglo FV es de aproximadamente 0.24%, lo cual cumple con el criterio de diseño mostrado en la **Tabla 4-1**.

De la **Figura B-0-9**, se puede observar que:

- El rizado de corriente de carga es de aproximadamente 0.741%, lo cual nos da una idea de la alta sensibilidad que tiene la curva del electrolizador ante cambios en el voltaje.

Anexo B.2.2. Eventos de cambios en el Arreglo FV

Un aspecto importante del sistema propuesto es ver cómo se comporta este ante variaciones bruscas de irradiancia, que es común que se produzcan a lo largo del día.

Por lo anterior, se analizan distintos eventos de cambios en el arreglo FV. En particular se simulan los cambios de irradiancia en estado de conexión de carga y desconexión de carga.

En este evento se comenzó con una irradiancia de $1000\left[\frac{W}{m^2}\right]$, que a los 0.1[s] bajo hasta los $50\left[\frac{W}{m^2}\right]$ y luego volvió a subir a los $1000\left[\frac{W}{m^2}\right]$ a los 0.3[s].

- La carga se mantuvo desconectada.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

A. Evento de cambios de irradiancia con carga desconectada

En este evento se analiza la respuesta del sistema al cambiar la irradiancia del arreglo FV en estado de desconexión de carga.

En este evento se comenzó con una irradiancia de $1000\left[\frac{W}{m^2}\right]$, que a los 0.1[s] bajo hasta los $50\left[\frac{W}{m^2}\right]$ y luego volvió a subir a los $1000\left[\frac{W}{m^2}\right]$ a los 0.3[s].

- La carga se mantuvo desconectada.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de 51.2[V].

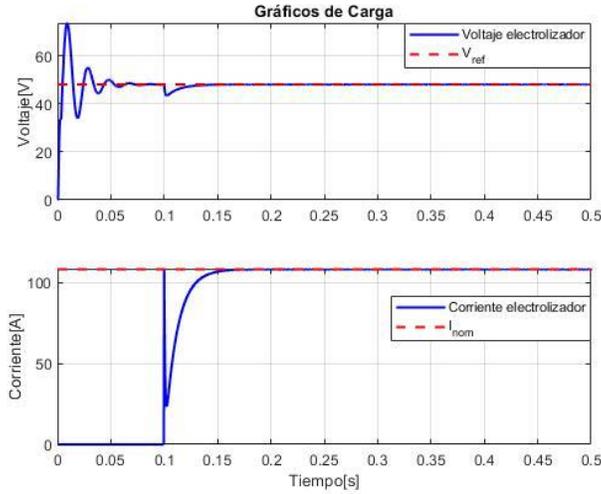


Figura B-0-10: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.

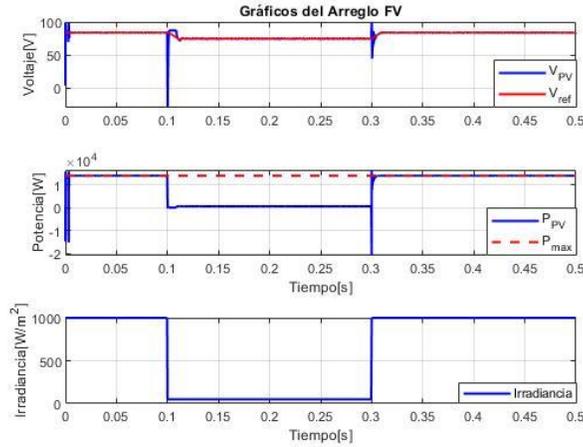


Figura B-0-11: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.

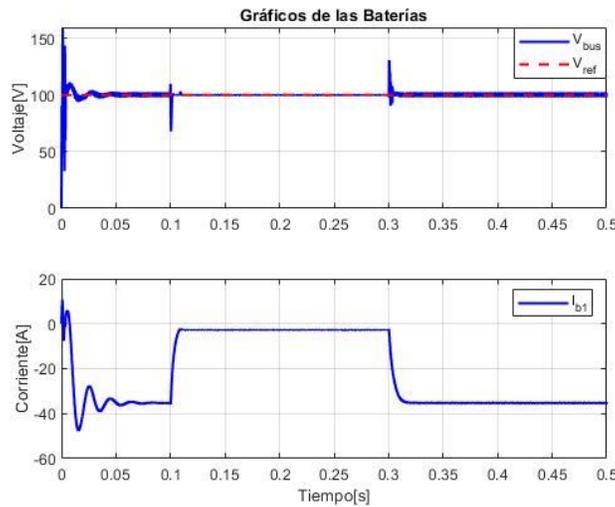


Figura B-0-12: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga desconectada.

De la **Figura B-0-10**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

De la **Figura B-0-11**, se puede observar que:

- En la curva de voltaje del arreglo FV, la referencia se sigue más rápidamente cuando se aumenta la irradiancia en $t=0.3[s]$ con respecto a lo visto en el Capítulo 5. Esto puede ser debido, porque para diseñar el control se utilizó un caso con pérdidas.

De la **Figura B-0-12**, se puede observar que:

- En la curva de voltaje en el bus DC, los cambios de irradiancia producen variaciones menos bruscas que las observadas en el caso sin pérdidas.
- La corriente de la batería para una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ en estado estacionario es de aproximadamente $-35[A]$. Mientras que, cuando la irradiancia es de $50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ la corriente en la batería está un poco debajo de los $0[A]$.

B. Evento de cambios de irradiancia con carga conectada

En este evento se analiza la respuesta del sistema al cambiar la irradiancia del arreglo FV en estado de conexión de carga.

En este evento se comenzó con una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, que a los $0.1[s]$ bajo hasta los $50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y luego volvió a subir a los $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ a los $0.3[s]$.

- La carga se mantuvo conectada.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de $51.2[V]$.

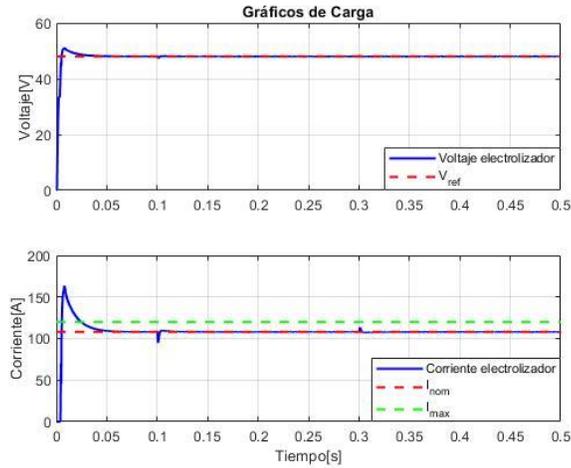


Figura B-0-13: Gráficas de carga ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.

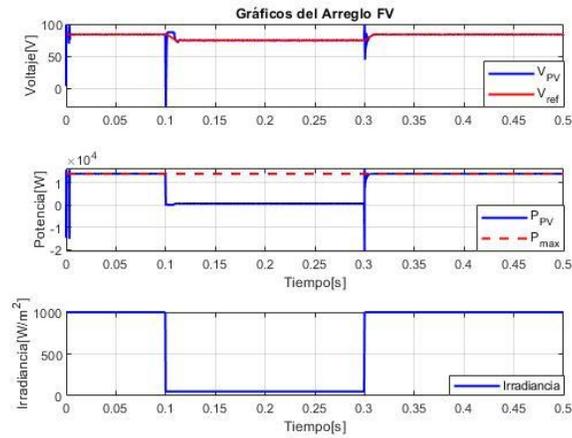


Figura B-0-14: Gráficas del arreglo FV ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.

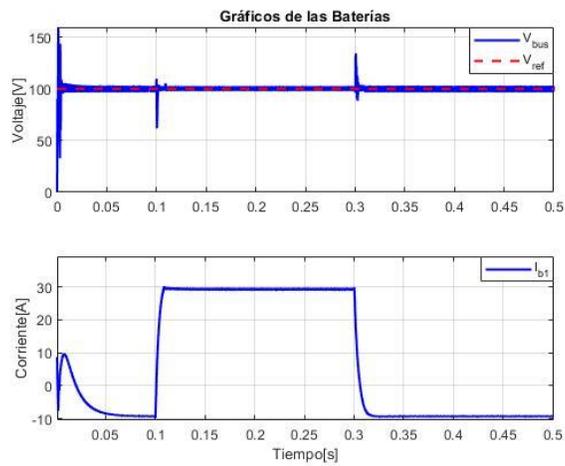


Figura B-0-15: Gráficas de las baterías ante el evento de cambios de irradiancia con carga conectada.

De la **Figura B-0-13**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

De la **Figura B-0-14**, se puede observar que:

- No se observan mayores cambios con respecto al caso A.

De la **Figura B-0-15**, se puede observar que:

- No se observan mayores cambios con respecto al caso A.
- La corriente de la batería para una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ en estado estacionario es de aproximadamente $-10[A]$. Mientras que, cuando la irradiancia es de $50 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ la corriente en la batería es de aproximadamente $30[A]$.

Anexo B.2.3. Eventos de cambios en las Baterías

A continuación, se analizan distintos eventos en las baterías. En particular, se simula el comportamiento del sistema con dos baterías y con el arreglo FV desconectado.

A. Evento de baterías con dos baterías

A lo largo de este trabajo se observó que mientras más baterías con sus respectivos convertidores se conectaban al bus DC, este se hacía más robusto ante las perturbaciones.

Por lo anterior, en este evento se analiza la respuesta del sistema al tener dos baterías con sus respectivos convertidores conectas al bus DC.

En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en $0.1[s]$. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema FV opera a una irradiancia constante de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una temperatura de $25^{\circ}C$.
- El electrolizador está operando a una temperatura $80^{\circ}C$ y presión de $6[bar]$.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de $51.2[V]$.

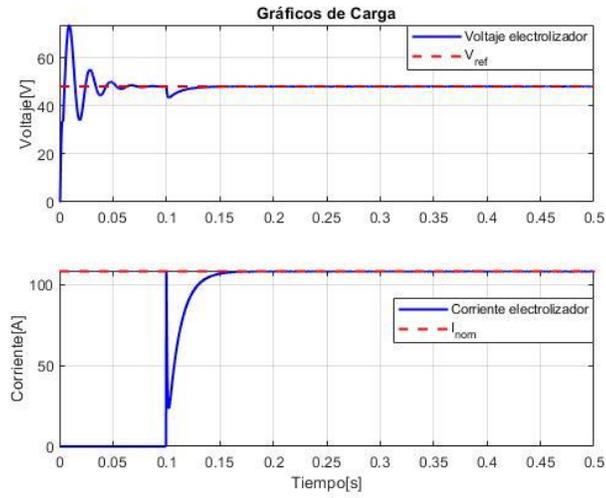


Figura B-0-16: Gráficas de carga ante el evento de baterías con dos baterías.

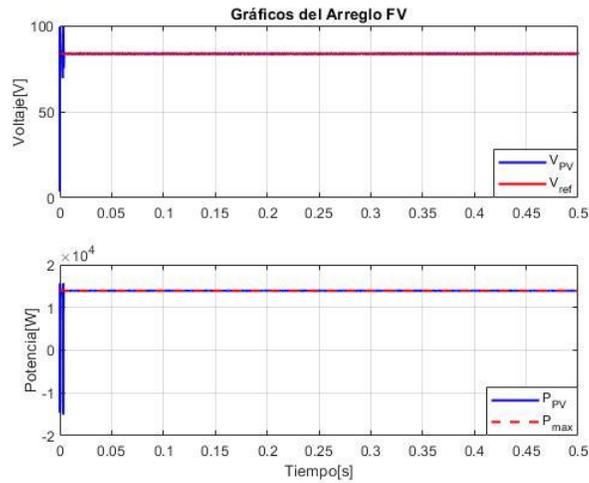


Figura B-0-17: Gráficas del arreglo FV ante el evento de baterías con dos baterías.

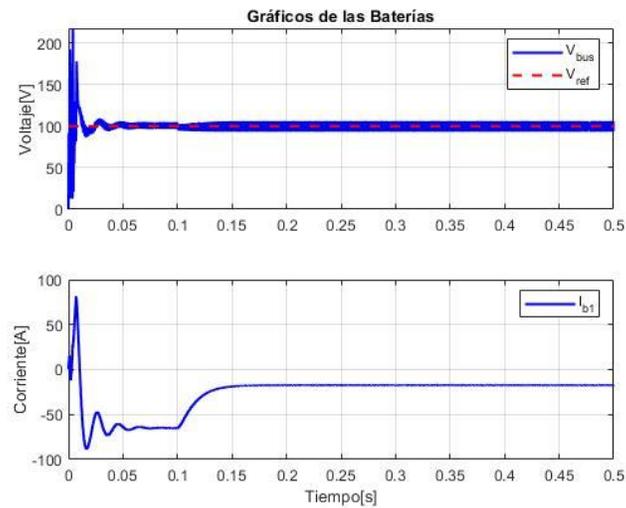


Figura B-0-18: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías con dos baterías.

De la **Figura B-0-16**, se puede observar que:

- Las curvas de voltaje y corriente de carga son iguales a las observadas en el evento de carga.

De la **Figura B-0-17**, se puede observar que:

- Las curvas de voltaje y potencia del arreglo FV son iguales a las observadas en el evento de carga.

De la **Figura B-0-18**, se puede observar que:

- En la curva de voltaje del bus DC ya se pueden ver cambios, donde se observa que las primeras oscilaciones son mayores en magnitud que las vistas al tener las 4 baterías.

Lo anterior, se puede deber a que al tener más baterías controlando el bus DC, la potencia que es entregada o recibida disminuye, lo que hace que los transitorios se atenúen.

- En la curva de corriente en las baterías también se pueden ver cambios, donde en el tiempo en que la carga esta desconectada podemos ver una corriente en estado estacionario cerca de $-70[A]$, mientras que en el tiempo que la carga está conectada, la corriente en estado estacionario es de aproximadamente $-20[A]$. Como se puede observar, los valores son mayores a los vistos en el evento de carga, y esto es debido a que debe existir un balance de potencias en el sistema, por lo que al desconectar dos baterías se incrementará la corriente de las baterías que se encuentran conectadas.

B. Evento de baterías solo con la carga conectada

Uno de los casos más importante a analizar en nuestro sistema es cómo se comporta este sin tener el apoyo del arreglo FV, ya que es algo común que pasara por ejemplo si se quiere operar el electrolizador por la noche.

Por lo anterior, en este evento se analiza la respuesta del sistema al tener solo la carga conectada al banco de baterías, es decir que tendremos el arreglo FV desconectado del sistema.

En este evento se partió con la carga desconectada, para luego conectarla en $0.1[s]$. Además, se hicieron las siguientes consideraciones:

- El electrolizador está operando a una temperatura $80^{\circ}C$ y presión de $6[bar]$.
- Las baterías están operando en su voltaje nominal de $51.2[V]$.

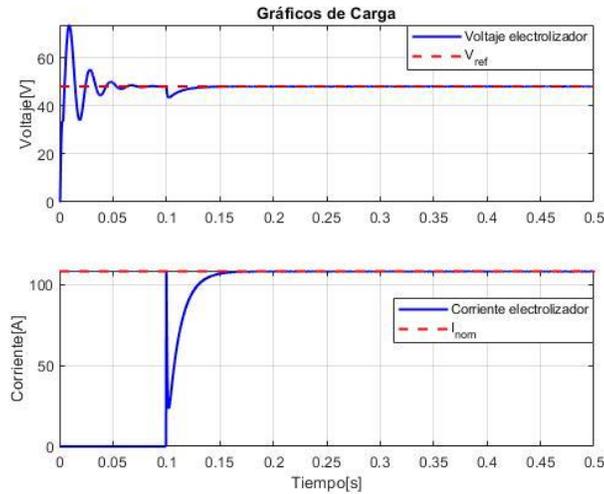


Figura B-0-19: Gráficas de carga ante el evento de baterías solo con la carga conectada.

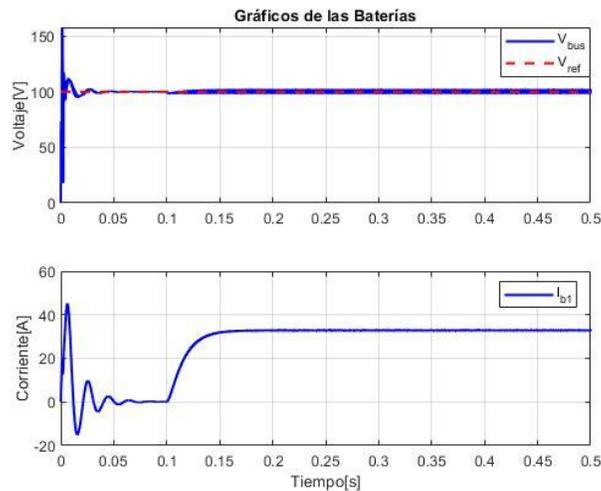


Figura B-0-20: Gráficas de las baterías ante el evento de baterías solo con la carga conectada.

De la **Figura B-0-19**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.

De la **Figura B-0-20**, se puede observar que:

- No se observan cambios con respecto al caso sin pérdidas mostrado en el Capítulo 5.
- En la curva de corriente de las baterías ya se pueden ver cambios, donde en el tiempo en que la carga esta desconectada podemos ver una corriente en estado estacionario de 0[A], debido a que ya no se encuentra el suministro de energía dado por el arreglo FV. Mientras que, en el tiempo que la carga está conectada, la corriente en estado estacionario es de aproximadamente 30[A].

Anexo B.2.4. Discusión de resultados

De los resultados obtenidos en este anexo y del capítulo 5, se puede destacar lo siguiente:

- Uno de los principales cambios que se pueden observar a lo mostrado en el capítulo 5 es en la corriente en las baterías, ya que al considerar pérdidas resistivas la corriente en las baterías varía en intensidad. Es decir, en el momento en que el flujo de potencia se dirige del sistema FV al sistema de baterías la corriente que llega a estas es menor a las mostradas en el caso ideal, mientras que cuando el flujo de potencia se dirige del sistema baterías hacia la carga la corriente que aporta cada batería es mayor a la observada en el caso ideal.
- El rizado de voltaje y corriente cambian sus formas de onda con respecto a las observadas en el capítulo 5. Esto es principalmente debido a la resistencia en serie que es agregada al condensador.
- Los transitorios de las figuras a los eventos aplicados al sistema propuesto para el caso ideal y el caso considerando pérdidas son prácticamente iguales, por lo que se puede deducir que con las consideraciones del esquema de control impartidas en el capítulo 4 efectivamente se obtiene un sistema robusto.

