

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Desarrollo de modelo matemático de planta desalinizadora energizada por sistema fotovoltaico

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

Desarrollo de modelo matemático de planta desalinizadora energizada por sistema fotovoltaico

Gustavo Adolfo Cuevas Reyes

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Agosto 2017

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio experimental de una celda de electrodiálisis configurada en modo continuo, para la cual se realiza un estudio de las dinámicas eléctricas y la capacidad de remoción de cloruro de sodio bajo distintas condiciones de operación. Se desarrolla el modelo matemático de la planta, que aproxima con aceptable exactitud los resultados obtenidos durante la experimentación. Para regular la conductividad eléctrica a la salida del sistema electrodiálisis, se diseña un controlador PI, que modifica la tensión de entrada al sistema para lograr la referencia de conductividad eléctrica específica. Con el fin de obtener un sistema autónomo y sostenible, se realiza el diseño de un sistema de energización fotovoltaico con un banco de baterías, que es capaz de entregar la energía necesaria al equipo durante el tiempo suficiente para satisfacer las demandas hídricas de un hogar promedio en Chile. Se desarrolla un modelo matemático del sistema de energización que simula las dinámicas eléctricas bajo distintas condiciones de operación ambientales, con un controlador seguidor de punto de máxima potencia (MPPT) que asegura la máxima extracción de energía del arreglo fotovoltaico, y un sistema de control que regula la tensión de salida según la conductividad esperada a la salida del sistema electrodiálisis. Todos los modelos matemáticos y los controladores respectivos han sido implementados y evaluados en Simulink. Al concluir el trabajo se encontró que hubo remoción efectiva de cloruro de sodio por parte del electrodiálisis, donde las dinámicas encontradas fueron satisfactoriamente aproximadas por un sistema de primer orden con retardo. Además, durante el estudio, la celda de electrodiálisis evidencia una componente resistiva no-lineal para voltajes de entrada entre 0 a 5V aproximadamente, en todos los casos estudiados. Se encontró también que el voltaje de entrada a la celda de electrodiálisis incide directamente en las condiciones de remoción de la misma. Por otro lado, el sistema de energización diseñado fue capaz de suministrar la energía necesaria para la operación de la celda de electrodiálisis, donde las señales de salida de voltaje y corriente presentaron niveles de ripple adecuados a los criterios de diseño.

*A mis padres y mi hermano.
Mi familia, mis amigos, y mi yo
del pasado por los frutos del presente.*



Agradecimientos

Llegar hasta aquí, a la conclusión de mi formación profesional, es un triunfo que es posible celebrar gracias al incondicional apoyo de mi madre, padre y hermano; cuyas palabras de aliento, un abrazo, o una simple llamada en aquellos momentos donde los desafíos académicos parecían superar mi temple y mis capacidades, fueron fundamentales para lograr el éxito. En cada certamen, en cada proyecto, en trimestres y semestres; siempre estuvo presente la esencia del incondicional cariño y apoyo depositado por ellos. Durante estos años, volver a Chillán y estar junto a toda mi familia, fue la fuente de energía y alimento espiritual para luego volver renovado a enfrentar mis objetivos. Concretar esta meta ha sido producto del amor otorgado por todos ustedes, y no es posible medir en palabras la gratitud y felicidad que guardo por poder abrazar a mi Mama y a mi Tata, poder decirles otro día más a sus ojos cuanto les amo, y compartir con ellos este importante momento de mi vida. Mamá, Papá, Cristóbal, Mama, Tata, tía Lelita, tía Yoyita, tío Mambi, Nina, Pasita, Rafita, Renata; mi amada familia: les dedico completamente este logro y todos los que vengan. Que estas humildes líneas sean registro de que mi cariño y gratitud hacia ustedes es infinito, y que jamás dejaré de caminar a su lado, pese a la distancia que algún día las circunstancias puedan llegar a imponer entre nosotros.

Si bien mi hogar está en Chillán, quien me cobijó en Concepción fue mi abuelita. Ella, siempre esperando mi llegada a su casa con una habitación tibia, un plato atiborrado de cariño, y una sonrisa totalmente desinteresada. Por su entendimiento frente a mis momentos de frustración cuando sólo quería estar en soledad, por hacerme sentir como en casa, por todos los instantes compartidos y por todo aquello que hizo de estos años de universidad un trayecto mucho más ameno desde el primer día hasta el último; estaré siempre agradecido de usted abuelita.

A mis amigos de la vida, ya mis hermanos: Víctor y Francisco. Tantos años riendo de las mismas bromas retorcidas, totalmente incomprensibles para el resto del mundo. Echar un vistazo al pasado es dar cuenta de incontables buenos momentos, todos ellos “universales y definitivos”. Por todos los recuerdos compartidos desde que no éramos más que un trío de púberes sin objetivo más complejo que pasar de curso, por los buenos consejos entregados, por escuchar las penas y alegrías, por todo aquello gracias amigos míos.

En mi paso por la universidad, conocí a personas con las que se disfrutaron buenas y abundantes cervezas, piscolas, karaokes, eternas conversaciones, risas, días y noches de estudio, paseos en moto, viajes, mucho metal, mucho whisky, mucha comida, y mucha mayo (en extremo). Todos los momentos pasados en su compañía: Timón, Pablo, Wlady, Claudio, Stephi, Oscar, Rubén,

Astete, Pauli, Mati Alvarez, Mati Sandoval, Mauro; hicieron de la universidad una cuna de bonitas experiencias y por sobre todo nobles amistades. Le guardo mucho cariño a cada uno ustedes, y dado que todos empiezan a tomar su propio sendero luego de terminar su carrera profesional (o estar ad portas de ello), aprovecho esta instancia para desearles éxito en la insondable incertidumbre que guarda el futuro.

También agradezco a mi profesor guía, el profesor Sbarbaro, por instarme a desarrollar un trabajo lo más perfecto y completo posible, extrayendo el máximo de mis capacidades hasta el último minuto, para ser depositadas aquí, en este informe. Siempre estuvo disponible y fue paciente para ayudarme a abordar cada desafío planteado durante mis últimos pasos como estudiante. Muchas gracias por ello profesor.

Hubo una época, en mis primeros años de universidad, donde me planteé abandonar la carrera para estudiar música. En aquel entonces acudí a Sole Genua para recibir consejo, y fue ella quién me instó a seguir poniéndole tesón hasta el final de mis estudios. “Luego habrá tiempo para rockear, y gracias a la profesión, plata para comprar buenas guitarras” fue parte de su extensa y honesta respuesta. Gracias Sole por las palabras emitidas desinteresadamente en esos turbios momentos. Aquí estoy ahora, redactando los agradecimientos de mi último trabajo universitario, mientras escucho metal, y con una fantástica guitarra a mis espaldas esperando por ser tocada.

Estas últimas líneas son un homenaje y agradecimiento a Iron Maiden. Tenía 14 años cuando descubrí este grupo y despertó mi pasión por la música. Desde entonces ha sido una fuerte influencia en mi vida y una fuente de inspiración para perseguir mis objetivos. Fue su música la que escuché mientras preparaba algún trabajo, programaba algún algoritmo o estudiaba para algún certamen, casi siempre día y noche. Es de hecho su música la que escucho mientras escribo estas palabras: *The Clansman – Live at Rock in Río '01*. No habría pasado tantas noches despierto de no ser por sus potentes ritmos. No habría tenido tanto entusiasmo para estudiar, o incluso ánimos para superar muchos problemas que surgieron en su momento. La música cambio mi vida desde que la conocí de la mano de estos increíbles viejos de Iron Maiden.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XII
ABREVIACIONES.....	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. INTRODUCCIÓN	2
2.2. TRABAJOS PREVIOS	2
2.2.1 <i>Principio de Funcionamiento de Electrodiálizador.....</i>	2
2.2.2 <i>Experimentación y Factibilidad del Proceso de Electrodiálisis.....</i>	3
2.2.3 <i>Modelación, Diseño y Control de Sistema PV.....</i>	7
2.2.4 <i>Discusión</i>	11
CAPÍTULO 3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	13
3.1. INTRODUCCIÓN	13
3.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO	13
3.3. OBJETIVOS	14
3.3.1 <i>Objetivo General</i>	14
3.3.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	14
3.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	14
3.5. METODOLOGÍA	15
CAPÍTULO 4. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	17
4.1. INTRODUCCIÓN	17
4.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)	17
4.2.1 <i>Sensor de Conductividad y Transmisor.....</i>	17
4.2.2 <i>Módulos de Adquisición</i>	18
4.3. METODOLOGÍAS Y DATA OBTENIDA.....	19
4.3.1 <i>Calibración y Configuración de Transmisor.....</i>	19
4.3.2 <i>Análisis Preliminar.....</i>	20
4.3.3 <i>Pruebas Dinámicas.....</i>	26
CAPÍTULO 5. MODELO MATEMÁTICO DE CELDA ED.....	34
5.1. INTRODUCCIÓN	34
5.2. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	34
5.2.1 <i>Respuesta a Escalón de Voltaje.....</i>	35
5.2.2 <i>Respuesta a Escalón de Conductividad.....</i>	47
5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
5.4. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK	49
CAPÍTULO 6. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ENERGIZACIÓN	51
6.1. INTRODUCCIÓN	51
6.2. CAPACIDAD DE BANCO DE BATERÍAS	51
6.3. TAMAÑO DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO	52
CAPÍTULO 7. ETAPAS DE SISTEMA DE ENERGIZACIÓN PV	54
7.1. INTRODUCCIÓN	54
7.2. MÓDULO FOTOVOLTAICO	54
7.2.1 <i>Modelo Matemático.....</i>	54
7.2.2 <i>Curvas Características</i>	59

7.3.	CONVERTIDOR BUCK	62
7.3.1	<i>Diseño del Convertidor</i>	62
7.3.2	<i>Algoritmo MPPT</i>	63
7.3.3	<i>Banco de Baterías</i>	65
7.4.	CONVERTIDOR BUCK-BOOST.....	68
7.4.1	<i>Diseño del Convertidor</i>	68
7.4.2	<i>Control del Convertidor</i>	69
CAPÍTULO 8. SIMULACIÓN Y RESULTADOS SISTEMA DE ENERGIZACIÓN PV		80
8.1.	INTRODUCCIÓN	80
8.2.	SALIDA CONVERTIDOR BUCK.....	80
8.3.	SALIDA CONVERTIDOR BUCK-BOOST	86
CAPÍTULO 9. CELDA ED ACOPLADA A SISTEMA DE ENERGIZACIÓN PV		90
9.1.	INTRODUCCIÓN	90
9.2.	ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS Y CONTROLADORES	90
9.3.	SINTONIZACIÓN DE CONTROLADOR	91
9.4.	SIMULACIONES	92
9.4.1	<i>Perspectiva de la Celda ED</i>	92
9.4.2	<i>Perspectiva de Sistema de Energización PV</i>	97
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES		100
10.1.	SUMARIO	100
10.2.	CONCLUSIONES	101
10.3.	TRABAJO FUTURO.....	103



Lista de Tablas

TABLA 4-1 Resultados de Pruebas.....	21
TABLA 5-1 Error de estimación y parámetros de F. de T.....	37
TABLA 5-2 Error de estimación y parámetros de F. de T.....	41
TABLA 5-3 Error de estimación y parámetros de F. de T.....	45
TABLA 5-4 Error de estimación y parámetros de F. de T.....	47
TABLA 5-5 Tag de función de transferencia según zona de operación (dinámicas decrementales)...	49
TABLA 5-6 Tag de función de transferencia según zona de operación (dinámicas incrementales) ...	49
TABLA 5-7 Funciones de transferencia y tag asignado.....	50
TABLA 6-1 Coeficientes de eficiencia del sistema PV	52
TABLA 7-1 Parámetros de módulo PV en STC.	55
TABLA 7-2 Cambio de variables.....	56
TABLA 7-3 Parámetros de diseño convertidor Buck	62
TABLA 7-4 Parámetros diseño Buck-Boost.....	68
TABLA 7-5 Zonas de operación convertidor en modo Boost.....	73
TABLA 7-6 Parámetros sintonización PI.....	74



Lista de Figuras

Fig. 4-1 Conductivímetro: Principio de operación.....	17
Fig. 4-2 Sensor de Voltaje.....	19
Fig. 4-3 Curvas Voltaje-Corriente, Corriente-Resistencia y Voltaje-Resistencia.....	23
Fig. 4-4 Curva densidad de corriente vs voltaje para celda ED [6]	24
Fig. 4-5 Aproximación de Resistencia según Conductividad	25
Fig. 4-6 Planta piloto.....	27
Fig. 4-7 Resultados frente a entrada escalón de voltaje	31
Fig. 4-8 Respuesta frente a entrada escalón de σ_{in}	32
Fig. 5-1 Respuesta a escalón 0-5 V.....	35
Fig. 5-2 Respuesta a escalón 5-10 V.....	35
Fig. 5-3 Respuesta a escalón 10-15 V.....	35
Fig. 5-4 Respuesta a escalón 15-20 V.....	35
Fig. 5-5 Respuesta a escalón 20-15 V.....	36
Fig. 5-6 Respuesta a escalón 15-10 V.....	36
Fig. 5-7 Respuesta a escalón 10-5 V.....	36
Fig. 5-8 Respuesta a escalón 5-0 V.....	36
Fig. 5-9 Simulación respuesta a escalón 0-5 V.....	37
Fig. 5-10 Simulación respuesta a escalón 5-10 V.....	37
Fig. 5-11 Simulación respuesta a escalón 10-15 V.....	38
Fig. 5-12 Simulación respuesta a escalón 15-20 V.....	38
Fig. 5-13 Simulación respuesta a escalón 20-15 V.....	38
Fig. 5-14 Simulación respuesta a escalón 15-10 V.....	38
Fig. 5-15 Simulación respuesta a escalón 10-5 V.....	38
Fig. 5-16 Simulación respuesta a escalón 5-0 V.....	38
Fig. 5-17 Respuesta a escalón 0-5 V.....	39
Fig. 5-18 Respuesta a escalón 5-10 V.....	39
Fig. 5-19 Respuesta a escalón 10-15 V.....	39
Fig. 5-20 Respuesta a escalón 15-20 V.....	39
Fig. 5-21 Respuesta a escalón 20-15 V.....	40
Fig. 5-22 Respuesta a escalón 15-10 V.....	40
Fig. 5-23 Respuesta a escalón 10-5 V.....	40
Fig. 5-24 Respuesta a escalón 5-0 V.....	40
Fig. 5-25 Simulación respuesta a escalón 0-5 V.....	41
Fig. 5-26 Simulación respuesta a escalón 5-10 V.....	41
Fig. 5-27 Simulación respuesta a escalón 10-15 V.....	42
Fig. 5-28 Simulación respuesta a escalón 15-20 V.....	42
Fig. 5-29 Simulación respuesta a escalón 20-15 V.....	42
Fig. 5-30 Simulación respuesta a escalón 15-10 V.....	42
Fig. 5-31 Simulación respuesta a escalón 10-5 V.....	42
Fig. 5-32 Simulación respuesta a escalón 5-0 V.....	42
Fig. 5-33 Respuesta a escalón 0-5 V.....	43
Fig. 5-34 Respuesta a escalón 5-10 V.....	43
Fig. 5-35 Respuesta a escalón 10-15 V.....	43
Fig. 5-36 Respuesta a escalón 15-18 V.....	43
Fig. 5-37 Respuesta a escalón 18-15 V.....	44

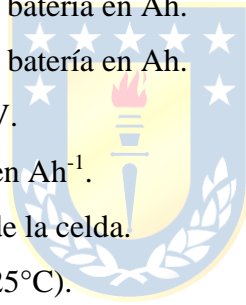
Fig. 5-38 Respuesta a escalón 15-10 V	44
Fig. 5-39 Respuesta a escalón 10-5 V	44
Fig. 5-40 Respuesta a escalón 5-0 V	44
Fig. 5-41 Simulación respuesta a escalón 0-5 V	45
Fig. 5-42 Simulación respuesta a escalón 5-10 V	45
Fig. 5-43 Simulación respuesta a escalón 10-15 V	46
Fig. 5-44 Simulación respuesta a escalón 15-18 V	46
Fig. 5-45 Simulación respuesta a escalón 18-15 V	46
Fig. 5-46 Simulación respuesta a escalón 15-10 V	46
Fig. 5-47 Simulación respuesta a escalón 10-5 V	46
Fig. 5-48 Simulación respuesta a escalón 5-0 V	46
Fig. 5-49 Simulación respuesta a escalón 10-25 mS/cm.....	47
Fig. 5-50 Simulación respuesta a escalón 25-40 mS/cm.....	47
Fig. 5-51 Simulación respuesta a escalón 40-25 mS/cm.....	48
Fig. 5-52 Simulación respuesta a escalón 25-10 mS/cm.....	48
Fig. 6-1 Diagrama de bloques sistema energización.....	51
Fig. 7-1 Modelo diodo único de celda PV	54
Fig. 7-2 Curvas para $T=25[^\circ\text{C}]$ y distintos niveles de irradiación	60
Fig. 7-3 Curvas para $G = 1000[\text{W}/\text{m}^2]$ y temperatura variable.....	61
Fig. 7-4 Diagrama circuito convertidor Buck	62
Fig. 7-5 Diagrama de flujo del controlador MPPT (P&O)	64
Fig. 7-6 Circuito equivalente de batería [26]	65
Fig. 7-7 Ventana de ingreso de parámetros modelo batería.....	66
Fig. 7-8 Curvas características típicas de carga y descarga para el modelo de baterías [26].....	67
Fig. 7-9 Diagrama convertidor Buck-Boost.....	68
Fig. 7-10 Circuito equivalente convertidor en modo Buck.....	70
Fig. 7-11 Circuito equivalente convertidor en modo Boost.....	72
Fig. 7-12 Desempeño controlador Buck	74
Fig. 7-13 Respuesta a escalón modo Buck.....	75
Fig. 7-14 Lugar de la raíz modo I para Z_1	76
Fig. 7-15 Lugar de la raíz modo PI para Z_1	76
Fig. 7-16 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_1	76
Fig. 7-17 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_1	76
Fig. 7-18 Respuesta a escalón modo I para Z_1	76
Fig. 7-19 Respuesta escalón modo PI para Z_1	76
Fig. 7-20 Lugar de la raíz modo I para Z_2	77
Fig. 7-21 Lugar de la raíz modo PI para Z_2	77
Fig. 7-22 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_2	77
Fig. 7-23 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_2	77
Fig. 7-24 Respuesta a escalón modo I para Z_2	77
Fig. 7-25 Respuesta escalón modo PI para Z_2	77
Fig. 7-26 Lugar de la raíz modo I para Z_3	78
Fig. 7-27 Lugar de la raíz modo PI para Z_3	78
Fig. 7-28 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_3	78
Fig. 7-29 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_3	78
Fig. 7-30 Respuesta a escalón modo I para Z_3	78
Fig. 7-31 Respuesta escalón modo PI para Z_3	78
Fig. 7-32 Lugar de la raíz modo I para Z_4	79

Fig. 7-33 Lugar de la raíz modo PI para Z_4	79
Fig. 7-34 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_4	79
Fig. 7-35 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_4	79
Fig. 7-36 Respuesta a escalón modo I para Z_4	79
Fig. 7-37 Respuesta escalón modo PI para Z_4	79
Fig. 8-1 Módulo PV acoplado a convertidor Buck	80
Fig. 8-2 Curvas de Salida Módulo PV	81
Fig. 8-3 Régimen transitorio y estacionario para escalón de temperatura e irradiación	82
Fig. 8-4 Respuesta de módulo PV frente a escalón de temperatura e irradiación.....	82
Fig. 8-5 Respuesta de convertidor Buck frente a escalón incremental de temperatura e irradiación	83
Fig. 8-6 Respuesta de convertidor Buck frente a escalón decremental de temperatura e irradiación	84
Fig. 8-7 Curvas de Salida convertidor Buck	84
Fig. 8-8 Ripple de salida Buck	85
Fig. 8-9 Análisis dinámico de sistema de energización	86
Fig. 8-10 Respuesta a escalón y señales peak en modo Buck.....	87
Fig. 8-11 Respuesta a escalón de referencia de voltaje, convertidor en modo Boost.	88
Fig. 8-12 Potencia de entrada/salida y voltaje/corriente salida de Buck-Boost.....	89
Fig. 9-1 Diagrama de Control	90
Fig. 9-2 Desempeño del controlador	91
Fig. 9-3 Resultados de simulación para entrada constante de 11 mS/cm	92
Fig. 9-4 Resultados de simulación para entrada constante de 25 mS/cm	93
Fig. 9-5 Resultados de simulación para entrada constante de 40 mS/cm	94
Fig. 9-6 Respuesta a perturbaciones próximas a 11 mS/cm.....	95
Fig. 9-7 Respuesta a perturbaciones próximas a 25 mS/cm.....	96
Fig. 9-8 Respuesta a perturbaciones próximas a 38 mS/cm.....	96
Fig. 9-9 Dinámicas eléctricas para 12.35 Ω (10 mS/cm).....	98
Fig. 9-10 Dinámicas eléctricas para 5.01 Ω (25 mS/cm).....	98
Fig. 9-11 Dinámicas eléctricas para 3.92 Ω (40 mS/cm)	99

Nomenclatura

σ	: conductividad eléctrica en mS/cm.
R_{celda}	: resistencia eléctrica de la celda de electrodiálisis
τ	: constante de tiempo en segundos.
K	: ganancia del proceso (adimensional).
T_0	: tiempo de retardo en segundos.
EC	: conductividad eléctrica en $\mu\text{S/cm}$.
C_{NaCl}	: concentración de NaCl, en mg/l.
E_{PV}	: energía demandada del módulo PV.
$P_{\text{peak_pk}}$: potencia peak requerida del módulo PV.
I	: corriente de salida del módulo.
I_{ph}	: corriente foto-generada para STC.
I_0	: corriente de saturación del diodo (en oscuridad) para STC.
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.
k	: constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).
T	: temperatura de juntura en $^{\circ}\text{K}$.
A	: factor de calidad del diodo.
q	: carga del electrón ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).
V_{oc}	: voltaje de circuito abierto en STC.
V_{mp}	: voltaje en el punto MP en STC.
I_{mp}	: corriente en el punto MP en STC.
P_{mp}	: potencia en el punto MP en STC.
k_i	: coeficiente de temperatura de la corriente de corto-circuito.
k_v	: coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto.
G	: irradiación (en W/m^2).
$I_{sc}(G)$: corriente de corto-circuito en función de G .

$I_{ph}(G)$: corriente foto-generada en función de G .
T	: temperatura en °C.
T_{stc}	: temperatura en °C para STC (dato de fabricante).
η	: factor de eficiencia.
P_{pv}	: potencia de salida del módulo PV.
P_{mppt}	: potencia de salida del convertidor que implementa MPPT.
E_{batt}	: voltaje no lineal de la batería en V.
E_0	: constante de voltaje en V.
$Exp(s)$: dinámicas de voltaje en la zona exponencial en V.
$Sel(s)$: representa el modo de funcionamiento de la batería. Tiene valor 0 durante la descarga, y valor 1 durante la carga.
K	: constante de polarización en Ah^{-1} .
i^*	: corriente de la batería en A.
it	: capacidad extraída de la batería en Ah.
Q	: capacidad máxima de la batería en Ah.
A	: voltaje exponencial en V.
B	: capacidad exponencial en Ah^{-1} .
T_C	: temperatura de trabajo de la celda.
T_a	: temperatura ambiente (25°C).
G	: irradiación en W/m^2 .
$NOCT$: temperatura de operación nominal de la celda (45°C).



Abreviaciones

Mayúsculas

CEM	: membrana de intercambio catiónico (en Inglés Cation-Exchange Membrane).
AEM	: membrana de intercambio aniónico (en Inglés Anion-Exchange Membrane).
CCM	: modo de conducción continua (en Inglés Continuous Conduction Mode).
DCM	: modo de conducción discontinua (en Inglés Discontinuous Conduction Mode).
ED	: electrodiálisis.
PV	: fotovoltaico (en Inglés Photo-Voltaic).
MP	: máxima potencia (en Inglés Maximum Power).
DC	: corriente continua (en Inglés direct current).
STC	: condiciones estándar de prueba (en Inglés Standard Test Condition).
SOC	: estado de carga de batería (en Inglés State of Charge).
DOD	: profundidad de descarga de batería (en Inglés Deep of Discharge).
MPPT	: seguimiento de punto de máxima potencia (en Inglés Max. Power Point Tracking).
DAQ	: adquisición de datos (en Inglés Data Acquisition).

Minúsculas

c.i.	: condiciones iniciales.
s.s.	: estado estacionario.



Capítulo 1. Introducción

En la actualidad, las fuentes de agua potable de buena calidad constituyen un recurso cuya disponibilidad disminuye progresivamente en el tiempo a causa de diversos factores, siendo de consideración para este proyecto la contaminación por desechos minerales provenientes de la industria minera. En el norte de Chile en particular, la contaminación de agua a causa de la infiltración de relaves mineros es un problema vigente y de alta prioridad. Todo esto sin mencionar la escasa disponibilidad de agua potable en comunidades sin acceso a una red hídrica de calidad.

Por otro lado, también son conocidos los perjuicios ambientales provocados por los principales métodos de generación energética de los que dispone el país. De este modo, es importante innovar en métodos de producción energética, y maximizar los factores de eficiencia en los sistemas y equipos ya existentes, todo ello en pro de la sustentabilidad.

Luego, bajo estas máximas, se tiene que desarrollar un sistema autónomo aprovechando las nuevas tecnologías en términos de sistemas fotovoltaicos, que sea capaz de potabilizar aguas contaminadas con diversos minerales, o que incluso pueda potabilizar el agua de mar; es una tarea sumamente atractiva que implica importantes beneficios. Una tecnología que posea esos atributos, que sea eficiente, y que primordialmente sea factible desde el punto de vista económico; puede convertirse en una alternativa de emprendimiento que otorgaría un beneficio a aquellas comunidades con escaso (y hasta nulo) acceso al agua potable, beneficio que es extrapolable al resto del mundo.

Capítulo 2. Revisión Bibliográfica

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza la revisión y análisis de publicaciones que guardan relación con la etapa de estudio, experimentación y modelación del sistema de energización fotovoltaico; y del proceso ejecutado por la celda de electrodiálisis (celda ED). Los trabajos encontrados resultan una fuente crucial para desarrollar un modelo matemático de la planta de electrodiálisis que permita realizar predicciones en cuanto a la capacidad de remoción para determinadas condiciones de operación.

2.2. Trabajos Previos

Para la revisión bibliográfica se consideran cuatro aspectos fundamentales en el desarrollo del trabajo: principios de funcionamiento del equipo electrodiálizador y fenómenos electroquímicos involucrados en el proceso de electrodiálisis, revisión de plantas piloto en las que se lleva a cabo la experimentación que verifican o refutan la factibilidad del proceso para llevar a cabo tareas de desalación de agua, el desarrollo de un modelo matemático y posterior simulación del proceso en una celda ED; y finalmente modelación, diseño y control del sistema de energización PV. Así entonces, se divide la investigación según los tópicos mencionados.

2.2.1 Principio de Funcionamiento de Electrodiálizador

- ♣ P.E. Troncoso, R.J. Mantz and P.E. Battaiotto, “Electrodialysis Processes Assisted by Photovoltaic Panels. Concentration Control,” Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, Aug. 2014, [1].

En este trabajo se presenta el principio de funcionamiento de una celda de electrodiálisis, mostrando cómo un potencial DC aplicado entre los electrodos del equipo, provoca el transporte de los iones (contenidos en el fluido a purificar) hacia las membranas correspondientes según su polaridad, siendo estas: membranas de intercambio catiónico (CEM) y membranas de intercambio aniónico (AEM). Estas membranas están intercaladas dentro de la celda, y dependiendo de la configuración del equipo, existe un determinado número de stacks definidos según criterios de diseño. Así, los iones al ser transportados, quedan retenidos entre ellas, produciendo una disminución en la

concentración iónica del fluido a la salida del proceso. Por otro lado, para energizar la celda, los autores implementan un sistema de alimentación fotovoltaico que cumple con las condiciones eléctricas apropiadas para el proceso ED, de modo que la remoción de sal sea satisfactoria. Por otro lado, se expone también un modelo de la concentración iónica de salida del proceso, evidenciando que es una función dependiente de la concentración iónica de entrada a la celda, del flujo volumétrico del fluido a través del equipo y de la tensión DC aplicada a los electrodos del electrodiálizador. Finalmente, se muestran curvas del comportamiento de la concentración para distintas condiciones de operación.

- ♣ H. Strathmann, “Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications,” *Desalination*, vol. 264, pp. 268-288, Dec. 2010, [2].

En este trabajo se describe el principio de electrodiálisis y los procesos relacionados, listando sus ventajas y limitaciones en diferentes aplicaciones. Además, se detallan: la estructura y funcionamiento de una celda ED, parámetros críticos de funcionamiento y los modos de operación del equipo. Se aborda también el motivo de la utilización de membranas de intercambio iónico en el proceso, la estructura que poseen y sus propiedades físico-químicas. Por otro lado, se hace un estudio de: costos del proceso, costos operacionales, y demanda energética de la celda de electrodiálisis y del proceso en general. También se detallan los parámetros a considerar con el objetivo de dimensionar el tamaño de la celda, tomando en cuenta que en el ensamblaje de un equipo de electrodiálisis, es fundamental la selección del tipo de membranas y el número requerido de ellas.

2.2.2 Experimentación y Factibilidad del Proceso de Electrodiálisis

- ♣ Natasha C. Wright, Georgia D. Van de Zande, Amos G. Winter V., “Design of a Village-Scale PV Powered Electrodialysis Reversal System for Brackish Water Desalination in India,” Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139, USA, Sep. 2015, [3].

En el trabajo se muestra la construcción de una planta piloto que integra, entre otros elementos, el sistema desalinizador y un sistema de alimentación fotovoltaico. También se determinan los requerimientos energéticos del sistema en su totalidad. Además, se expone el modelo matemático de la celda de electrodiálisis, con la finalidad de predecir el desempeño de la misma para distintas condiciones de operación. En el trabajo se muestra que es posible acoplar el sistema fotovoltaico a un sistema desalinizador con resultados satisfactorios en la purificación de agua, siendo una tarea

importante la optimización del sistema para minimizar los costos asociados a la construcción de la planta, y así obtener un producto comercialmente factible.

- ♣ Laura J. Banasiak, Thomas W. Kruttschnitt, and Andrea I. Schäfer, “Desalination using electro dialysis as a function of voltage and salt concentration,” in EuroMed ‘06 conf., Montpellier, France, 21-25 May 2006, pp. 38-46, [4].

En esta publicación se expone el proceso de desalinización mediante electrodiálisis para determinados fluidos en estudio. La experimentación se lleva a cabo en una planta piloto cuya alimentación es provista por una fuente DC. En el trabajo se estudia la dinámica de la concentración de salida del fluido para distintas condiciones de voltaje en la celda de electrodiálisis, y para distintos niveles de concentración iónica en el flujo de entrada, siendo el voltaje una variable crítica en el proceso de desalinización, pues determina la corriente en la celda y por lo tanto la eficiencia del proceso. Los resultados del estudio dan cuenta que la electrodiálisis es un método efectivo para realizar procesos de desalación y que es posible obtener agua potable a partir de agua contaminada con sales minerales.

- ♣ David Valero, Vicente García-García, Eduardo Expósito, Antonio Aldaz and Vicente Montiel, “Application of electro dialysis for the treatment of almond industry wastewater,” *Journal of Membrane Science*, vol. 476, pp. 580-589, Nov. 2014, [5].

En el trabajo se prueba que la electrodiálisis es una técnica adecuada para reducir la conductividad en aguas contaminadas con sales. Para las pruebas se utilizan aguas residuales reales (provenientes de una industria de almendras), que ha sido previamente tratada por otros procesos de filtración para reducir contaminación orgánica, sólidos en suspensión y turbiedad. En el trabajo se considera la hipótesis que dicta que en el proceso de electrodiálisis, el voltaje entre las membranas de intercambio iónico es un parámetro crítico, pues provoca la variación de la densidad de corriente a través de las mismas; por lo tanto, influye directamente en la eficiencia de extracción de minerales. Para valores críticos de densidad de corriente, se pueden producir fenómenos como *fouling*, que merman la eficiencia del proceso ED. Es por esto que en la publicación se desarrolla un método de medición de voltaje basado en el uso de capilares, para así determinar la tensión para la cual ocurre la densidad de corriente límite.

- ♣ Daniella Cardoso Buzzi, Lucas Stéphano Viegas, Marco Antônio Siqueira Rodrigues, Andréa Moura Bernardes, Jorge Alberto Soares Tenório, “Water recovery from acid mine drainage by electro dialysis,” *Minerals Engineering*, vol. 40, pp. 82-89, Ene. 2013, [6].

En este trabajo se investiga la posibilidad de utilizar electrodiálisis para el tratamiento de aguas contaminadas con metales disueltos provenientes de drenaje minero ácido. Para la determinación de las curvas de polarización (requeridas para obtener la densidad de corriente límite) se aplicaron variaciones de corriente graduales, cada dos minutos, entre los electrodos de la celda de electrodiálisis: Luego se midió la diferencia de tensión entre dos membranas adyacentes, CEM y AEM. Las pruebas de ED fueron ejecutadas aplicando corrientes de acuerdo a los valores obtenidos en las curvas de polarización para una celda de cinco compartimientos, en cada uno de los cuales fue medido el pH y la conductividad de las soluciones correspondientes. Los resultados en cuanto a la obtención de las curvas de polarización, evidencian la existencia de tres zonas de operación, siendo estas: región lineal, región tipo meseta y región de sobre límite. Los resultados en cuanto al proceso de ED describen una disminución en la conductividad del diluido (solución por purificar), eliminando hasta un 97% de los minerales contaminantes. De aquí se obtiene que la ED es efectiva para efectos de desalación, sin embargo las curvas expuestas en el trabajo muestran que el tiempo necesario fue mucho más alto de lo que sugiere el fabricante de la celda en estudio. Esto puede ser debido a que, en primer lugar, en el trabajo no se consideró la influencia del flujo volumétrico de entrada sobre la capacidad de extracción salina; y en segundo lugar a causa de que la superficie de las membranas de intercambio iónico es bastante pequeña (16 cm^2).

- ♣ Ahmed Abou-Shady, Huizhen Xu, Changsheng Peng, “Production of pure water suitable for laboratory experiments by electro dialysis technology,” Collage of Engineering, Ocean, University of China (OUC), Qingdao, China, May. 2011, [7].

En este trabajo se pretende obtener agua pura cuyos estándares son suficientes para ser utilizada en condiciones de laboratorio (conductividad menor a $10 \mu\text{S/cm}$). También se realizan experimentos para analizar la posibilidad de obtener agua ultra pura (conductividad menor a $1.0 \mu\text{S/cm}$). Para los experimentos se utilizó una celda de electrodiálisis de 110 pares de CEM y AEM. La superficie efectiva de CEM y AEM es de 390 cm^2 . El agua a filtrar presentaba una conductividad de $175.5 \mu\text{S/cm}$, y luego del proceso se obtuvo una disminución de hasta aproximadamente $5.5 - 6.5 \mu\text{S/cm}$. En las curvas expuestas se observa que la conductividad disminuye rápidamente entre los 5 y 25V (entre los electrodos de la celda). Para la densidad de corriente límite, se encuentra su valor para los 20-25V, pues para magnitudes superiores de tensión, la disminución de conductividad del diluido (el flujo al cual se le pretende extraer la sal, se conoce como diluido) es despreciable. El consumo de energía, por su parte, aumenta de forma lineal con respecto a un aumento de tensión, sin embargo luego de la zona de polarización, el consumo de energía aumenta de forma intensiva. De

aquí que, económicamente, no exista necesidad de aumentar el voltaje en la celda más allá de los 30V. En cuanto a los resultados, para el caso de obtención de agua para propósitos de laboratorio, se concluyó un resultado exitoso.

Para el caso de la obtención de agua ultra pura, se utilizó agua con propiedades de conductividad de $6.1\mu\text{S}/\text{cm}$. Luego del experimento se obtuvo un mínimo de conductividad de $3.6\mu\text{S}/\text{cm}$ para valores de tensión entre 5-15 V. Para magnitudes más grandes de tensión, se generó disociación de agua, además de un fenómeno de pérdida en las membranas, provocando el aumento de la conductividad en la solución. Finalmente, la obtención de agua ultra-pura es complicada mediante electrodiálisis, pues el proceso requiere mayor superficie útil de membranas, además de un algoritmo de control más sofisticado asociado a las variables críticas del proceso; como flujo y voltaje, siendo contraproducente en términos económicos.

- ♣ M. Sadrzadeh, T. Mohammadi, "Sea water desalination using electro dialysis," *Desalination*, vol. 221, pp. 440-447, Mar. 2008, [8].

En este trabajo se presenta la utilización del proceso de ED para filtrar soluciones de agua con NaCl, mediante una celda ED implementada a escala de laboratorio. Los experimentos se realizan para diferentes niveles de voltaje entre los electrodos del equipo ED, y a diferencia de los trabajos anteriores; se realizan para diferentes niveles de temperatura, flujo volumétrico y concentración de minerales en el flujo de entrada. El área efectiva de las membranas de intercambio iónico es de 39 cm^2 . De los resultados se verifica que la temperatura y el voltaje son directamente proporcionales al porcentaje de separación de la sal en sus iones, donde el desempeño incrementa para altos niveles de dichas variables (siempre que la densidad de corriente límite no sea sobrepasada). Al igual que en [7], se encuentra que existe un punto para el cual aumentos de voltaje no implican un aumento en la extracción iónica. En el caso del flujo volumétrico, se obtuvo que un aumento del mismo conlleva una disminución del porcentaje de descomposición de la sal en sus iones. Finalmente, para la concentración iónica del flujo de entrada, se tiene que el porcentaje de separación es más alto para bajas concentraciones de sal. Así se concluye que se logra mayor extracción de sal para un punto de operación que considera alta temperatura (Aprox. 40°C para este experimento), alto voltaje (cerca al punto para el cual se logra la densidad de corriente límite) y baja concentración de entrada (10 000 ppm para el experimento). Sin embargo, en el trabajo no se considera el estudio para la densidad de corriente límite, parámetro que según lo estudiado, afecta críticamente la eficiencia del proceso de electrodiálisis. Aun así, del trabajo se observa que es posible encontrar un punto de operación cercano al óptimo mediante análisis del comportamiento del fluido para distintos niveles de temperatura,

voltaje y flujo volumétrico; método que resulta poco práctico.

- ♣ Jing Guolin, Xing Lijie, Li Shulin, “Study of mathematical model in electro dialysis of desalination,” in *The 4th int. conf. on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Jun. 2010, [9].

En este trabajo se presenta la experimentación en una planta de electrodiálisis para evaluar el efecto de distintos niveles de voltaje, flujo volumétrico y concentración de entrada del diluido; sobre el desempeño de la celda ED, y de esta forma realizar un modelo matemático que prediga el comportamiento de la celda para distintas condiciones de operación. Para la experimentación, se considera que la relación entre la concentración del mineral (en este caso NaCl) y la conductividad del fluido es de carácter aproximadamente lineal. En cuanto al modelo matemático del proceso ED efectuado por la celda, se desarrolla a partir de una ecuación diferencial que caracteriza el balance de masa en estado estacionario en un compartimiento del diluido, y también a partir de ecuaciones fundamentales de electroquímica. Luego, se tiene que hay una excelente consistencia entre los valores obtenidos en el modelo y los obtenidos en el experimento. Así, se tiene que utilizar el modelo presentado en el trabajo resulta adecuado para realizar predicciones en el proceso de desalinización mediante electrodiálisis.

2.2.3 Modelación, Diseño y Control de Sistema PV

- ♣ Zubair Mehmood, Yumna Bilal, Muniba Bashir, and Ali Asghar, “Performance Analysis of MPPT Charge Controller with Single and Series/Parallel Connected PV Panels,” Department of Electrical Engineering, University of Gujrat, Gujrat, Pakistan, Jan. 2016, [10].

En el trabajo se lleva a cabo el análisis del desempeño de un controlador de carga basado en estrategia MPPT para tres configuraciones: múltiples paneles en serie, múltiples paneles en paralelo y panel único. En el trabajo se muestra un controlador basado en un convertidor DC-DC Buck-Boost, cuyo duty cycle es modificado mediante un algoritmo MPPT del tipo P&O, con la finalidad de extraer la máxima potencia del arreglo fotovoltaico. Los resultados del análisis muestran que la configuración de múltiples paneles en paralelo ofrece mejor salida de potencia para bajos niveles de radiación, mientras que la configuración de múltiples paneles en serie tiene mejor salida de potencia para altos niveles de radiación. Por otro lado, para el caso de panel único, la salida de potencia es menor en todos los niveles de radiación.

- ♣ Ganesh Baliram Ingale, Subhransu Padhee, and Umesh C. Pati, “Design of stand alone PV system for DC-micro grid,” Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India, Apr. 2016, [11].

En este trabajo se lleva a cabo el diseño de un sistema PV autónomo para alimentar cargas DC. Se efectúa un modelo detallado de una celda fotovoltaica y se implementa un algoritmo de control MPPT del tipo P&O en un convertidor DC-DC Boost. En la publicación, se presenta detalladamente el algoritmo P&O aplicado en un convertidor cuyo trabajo de diseño también ha sido abarcado. Se muestra la respuesta del sistema para distintos niveles de irradiación, encontrando el punto MP en cada situación. Es importante notar que para realizar un correcto estudio en la respuesta del algoritmo se requiere un modelo del módulo fotovoltaico que sea preciso

- ♣ *Off Grid PV Power Systems. System Design Guidelines*, SEI-API in collaboration with PPA, Issue 1, Copyright 2012, Sep. 2012, [12].

Este documento es un manual para dimensionar un sistema de alimentación fotovoltaico autónomo. El manual considera, entre otras cosas, el número de paneles requeridos para la aplicación específica, y la capacidad de almacenamiento energético necesario para garantizar el funcionamiento en situaciones donde los módulos PV no entregan suficiente potencia.

- ♣ *Basic Calculation of a Buck Converter’s Power Stage*, Texas Instruments, SLVA477B, Dec. 2011, [13].

Este documento es un manual para el diseño de un convertidor DC-DC Buck en aplicaciones de baja potencia.

- ♣ *Input and Output Capacitor Selection*, Texas Instruments, SLTA055, Feb. 2006, [14].

Este documento es un manual para la selección del tamaño de un capacitor que disminuya el rizado de voltaje de entrada o salida de un regulador, según sea el caso.

- ♣ *Design Calculations for Buck-Boost Converters*, Texas Instruments, SLVA535A, Aug. 2012, [15].

Este documento es un manual para el diseño de un convertidor DC-DC Buck-Boost de modo que se garantiza la operación en CCM.

- ♣ S. Shongwe and M. Hanif, “Gauss-Seidel Iteration Based Parameter Estimation for a Single Diode Model of a PV Module,” *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Oct. 26-28, 2015, pp. 278-284, [16].

El trabajo desarrollado expone la identificación de parámetros del modelo de un módulo PV mediante el método numérico de Gauss-Seidel. En la publicación, se muestra en detalle la implementación del algoritmo y la forma en la cual deben ser expresadas las ecuaciones del modelo matemático para que el método logre converger a la solución. Además, se desarrolla en detalle la construcción del modelo matemático del panel fotovoltaico.

- ♣ Abir Chatterjee, Ali Keyhani, and Dhruv Kappor, “Identification of Photovoltaic Source Models,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 883-889, Jun. 2011, [17].

En el trabajo se construye el modelo matemático de un panel fotovoltaico para cualquier valor de irradiación y temperatura en la celda. Esto a partir de la información del módulo entregada por el fabricante en la hoja de datos. El estudio se ciñe al modelo de diodo único de una celda fotovoltaica, para luego obtener los parámetros asociados mediante el método numérico de Gauss-Seidel.

- ♣ Dezso Sera, Remus Teodorescu, and Pedro Rodriguez, “PV panel model based on datasheet values,” in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE '07*, pp. 2392-2396, Jun. 4-7, 2007, [18].

El trabajo desarrollado tiene el mismo objetivo de lo que expone [17]: desarrollar un modelo matemático de un panel fotovoltaico para cualquier valor de irradiación y temperatura en la celda. El desarrollo del modelo y la obtención de los parámetros se hacen de forma muy similar en ambos trabajos, sin embargo, pese a las similitudes, este trabajo a diferencia de [17] aborda con mayor detalle la dependencia de determinados parámetros con respecto a valores de irradiación y temperatura que difieren de las establecidas como STC.

- ♣ Iñigo Larrea, and Sridhar Seshagiri, “Voltage Mode SMC of DC-DC Buck Converters,” in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2016*, pp. 534-539, Jun. 8-10, 2016. [19]

En este trabajo se diseñan controladores avanzados para la regulación de voltaje a la salida de un convertidor Buck DC-DC, operando en modo de conducción continua (CCM). Para el diseño de los controladores, se obtiene el modelo promedio en espacio de estados del convertidor.

- ♣ Lopamudra Mitra, and Nibedita Swain, “Closed Loop Control of Solar Powered Boost Converter with PID Controller,” in *Proc. of IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers and Energy Systems PEDES 2014*, Dec. 16-19, 2014. [20]

En el trabajo, se presenta el diseño de un convertidor Buck-Boost con aplicación en un sistema de energización fotovoltaico. El voltaje a la salida del convertidor es regulado por un controlador PID, el cual es diseñado y sintonizado a partir de la obtención de un modelo promedio en espacio de estados del convertidor. El desarrollo de este modelo es abordado de forma análoga a lo revisado en [19]

- ♣ (2014) Ingelibre blog. Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica. Accessed december 2016. [Online]. Available: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>, [21].

La página ilustra la influencia de la irradiación en varios parámetros de funcionamiento del módulo PV, siendo de interés para este proyecto la influencia de la irradiación sobre la temperatura de operación de la celda PV.

- ♣ Química del Agua. Accessed december 2016. [Online]. Available: <http://www.quimicadelagua.com/Conceptos.Analiticos.Conductividad.html>, [22].

La página muestra valores típicos en la conductividad del agua para distintas aplicaciones, siendo de relevancia para este trabajo en el sentido de la condición que debe presentar el fluido a la salida del sistema.

- ♣ Ministerio de energía de Chile. Accessed november 2016 [Online]. Available: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>, [23].

El trabajo contenido en la página muestra datos de irradiación para distintos lugares a nivel nacional.

- ♣ Propiedades químicas del agua de Mar: Salinidad, Clorinidad y pH. Accessed december 2016. [Online]. Available: http://www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros_1/ciencia2/12/htm/SEC_17.HTM, [24].

El documento presentado en la página web entrega datos de concentración salina en el agua de mar. La información es importante pues el agua de mar es el fluido de referencia para las

simulaciones del equipo ED.

- ♣ (2008) Instituto Nacional de Estadísticas. Población y sociedad, aspectos demográficos. Accessed december 2016 [Online]. Available: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/demografia_y_vitales/demografia/pdf/poblacion_sociedad_enero09.pdf, [25]

La publicación muestra en forma resumida distintos aspectos demográficos de la población y sociedad chilena.

- ♣ MathWorks. Battery: Implement generic battery model. Accessed december 2016 [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>, [26]

La página es un fragmento de la documentación de Matlab, donde se muestran los detalles del modelo genérico de baterías que está incorporado en las librerías de Simulink

2.2.4 Discusión

De la revisión, se tiene que la desalación de agua mediante ED tiene resultados satisfactorios, siendo especialmente efectivo en aplicaciones como desalinización de aguas subterráneas [3], tratamiento de aguas residuales industriales [5], desmineralización de agua para propósitos de laboratorio [7], desalación de agua de mar [8], y tratamiento de aguas contaminadas con drenaje ácido minero [6]. Sin embargo, de los datos expuestos en [3] se tiene que el proceso puede llegar a consumir mucha energía, resultando poco factible en términos económicos. Sin embargo, es posible utilizar alternativas sustentables de energización, como lo es un sistema de energización fotovoltaico [1]-[3]. Luego, es crucial diseñar las estrategias de control de forma que el proceso funcione en óptimas condiciones para una determinada muestra a desmineralizar [5]-[8].

Según [13]-[3]-[1], el voltaje aplicado a la celda desalinizadora es uno de los parámetros fundamentales que determina la concentración salina del fluido a la salida del proceso. Por lo tanto, se considera que la tensión de salida del sistema de alimentación es la variable de entrada al proceso de desalación. Luego, el trabajo se desarrollará considerando que el sistema de alimentación debe ser capaz de ajustar el voltaje de salida según lo requiera el controlador de la celda ED para cierta conductividad esperable a la salida de la planta. Por otro lado, durante la experimentación con la planta real, es requisito garantizar que se opera con valores inferiores a la densidad de corriente límite. Esto será evidenciado a partir de las magnitudes de corriente a través de la celda ED registrados para cada valor de voltaje, cuyas dinámicas deberán permanecer en un régimen lineal, de acuerdo a [6].

En cuanto al diseño del sistema de alimentación, se obtuvo que en su mayoría se opta por la utilización de convertidores Boost para regular el voltaje de salida del módulo PV. En este trabajo, en cambio, se optará por un convertidor Buck que reduzca el alto voltaje de salida del módulo PV para ajustarse a la tensión del banco de baterías, y un convertidor Buck-Boost que ajuste el voltaje de dicho banco a los valores requeridos para el proceso de desalación, dentro del rango permitido por la celda: 0 a 20 V. También se implementará el algoritmo MPPT mostrado en [11], pues maximiza la cantidad de energía extraída de los paneles. Su implementación en código no es de alta complejidad, y se evidencia un excelente comportamiento frente a la no-linealidad de las curvas características de un módulo solar, encontrando en todo momento el punto de MP. Para regular la salida de voltaje del convertidor Buck-Boost (voltaje de entrada a celda ED), se implementarán controladores PID, por ser efectivos en este tipo de aplicación [20], donde la sintonización será realizada a partir del modelo promedio del convertidor en cada modo de operación, de acuerdo a la base teórica presentada en [19] y [20]

Para desarrollar el modelo matemático de la celda PV en STC, se procederá de acuerdo al modelo de diodo simple que postula [17], realizando la identificación de parámetros mediante el método numérico de Gauss-Seidel, según lo propuesto en [16]. Luego, para agregar la dependencia de los parámetros con aquellos niveles de irradiación y temperatura en la celda que sean distintos a los establecidos como STC, se procede según [18].

Al momento de ejecutar las simulaciones del módulo PV, se tiene que las perturbaciones del sistema son la temperatura en la celda y la irradiación. Estas variables están relacionadas según lo que se expone en [21].

La información provista por [26] es necesaria para entender de modo global el modelo de una batería. Sin embargo, el estudio de los detalles no es de relevancia por cuanto no corresponden con el objetivo del presente trabajo.

Finalmente, es relevante la información expuesta en [23]-[24]-[25], pues será requerida para establecer la dimensión del sistema de energización de acuerdo a las condiciones de irradiación que tiene Concepción, la concentración salina media en el agua de mar y la cantidad media de personas que hay por vivienda en Chile.

Capítulo 3. Definición del Problema

3.1. Introducción

En el Norte de Chile, la escasez de agua potable es un problema de considerable magnitud. Muchas de las reservas de agua están contaminadas por diversos minerales provenientes de la industria minera, como por ejemplo el drenaje ácido. Muchas de estas fuentes son utilizadas por aquellos poblados sin acceso a una red de agua potable de calidad, situación que vulnera los derechos de éstas personas, provocando distintas enfermedades tanto físicas como psicológicas. En vista de esta situación, y considerando que muchos de estos poblados tampoco tienen acceso a la red eléctrica, se tiene que el desarrollo de un sistema de desmineralización de agua energizado por sistemas fotovoltaicos, corresponde a una potente solución que, al ser factible en términos económicos, es una importante oportunidad de emprendimiento en pro de la sociedad y la sustentabilidad.

Así, para el estudio y desarrollo del modelo matemático de la planta de electrodiálisis energizada por un sistema PV, se exponen en este capítulo la hipótesis sobre la que se desarrollará el presente trabajo, los objetivos que se esperan obtener al concluirlo, las limitaciones asumidas para el desarrollo del mismo, y la metodología que será abordada durante su transcurso.

3.2. Hipótesis de Trabajo

La celda de electrodiálisis PCCELL ED 64002 presenta una componente resistiva no lineal. Ésta, configurada en modo continuo, es capaz de remover cloruro de sodio disuelto en agua, donde el voltaje aplicado a los electrodos de la misma incide directamente en la capacidad de remoción. Por otro lado, el sistema de energización fotovoltaico es capaz de suministrar energía suficiente y con las condiciones adecuadas para energizar el electrodiálizador.

3.3. Objetivos

3.3.1 Objetivo General

Desarrollar modelo matemático de la unidad de electrodiálisis PCELL ED64002 y de sistema de energización fotovoltaico. Luego, diseñar e implementar estrategias de control que verifiquen condiciones de operación, adecuadas para el funcionamiento del sistema electrodiálizador.

3.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar y simular modelo matemático de sistema de energización fotovoltaico.
- Desarrollar y simular modelo matemático de electrodiálizador PCELL ED64002.
- Diseñar e implementar controladores que gobiernen parámetros fundamentales para el funcionamiento del sistema fotovoltaico y desalinizador.

3.4. Alcances y Limitaciones

- Las condiciones eléctricas de salida del sistema de alimentación están ceñidas a los requerimientos de la celda electrodiálizadora PCELL ED64002, disponible en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica Ambiental, en la UdeC.
- Las simulaciones del sistema de energización PV serán desarrolladas según los parámetros de los módulos FVG 245M-MC, implementados en el Laboratorio de Control Digital Aplicado (LCDA) del DIE, en la UdeC.
- El sistema de energización estará diseñado para funcionamiento en DC, y para cargas resistivas puras con un valor mínimo de 3Ω .
- El sistema de energización está diseñado sólo para energizar la unidad de electrodiálisis especificada. No se considera la alimentación de dispositivos pertenecientes a la planta real, como por ejemplo bombas hidráulicas, controladores, etc.
- El sistema de energización estará diseñado para entregar una magnitud de tensión máxima de 20 V, y una magnitud máxima de corriente de 5 A, según lo especificado por el fabricante de la celda ED. En la práctica, la tensión máxima varía en función de la cantidad de membranas montadas en la celda (2V por cada par de membranas, según Fig. A-1, Anexo A). Luego, como la celda ED implementada en la planta piloto tiene 10 pares de membranas, entonces se determina la tensión máxima de 20V para el desarrollo del trabajo.

- Los modelos matemáticos, las simulaciones, y las estrategias de control; serán todos desarrollados en Matlab y Simulink.
- Se utilizarán disoluciones de agua y sal común (NaCl) para las pruebas realizadas en la planta piloto, ubicada en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica Ambiental, en la UdeC; que incorpora la unidad PCCELL ED64002.
- La celda de electrodiálisis será estudiada para funcionamiento en modo continuo, es decir, no habrá recirculación ni de diluido ni de concentrado.
- El desarrollo del modelo matemático de la celda será abordado de forma empírica (modelo de “caja negra”). Se generará una función de transferencia que aproxime las dinámicas para distintas zonas de operación.

3.5. Metodología

En primer lugar se realizará la experimentación y desarrollo del modelo matemático de la celda. Se comenzará montando el sistema de adquisición de datos, fundamental para registrar los resultados de las pruebas. Luego, se llevarán a cabo pruebas con la planta piloto para evaluar la capacidad de remoción en distintos puntos de operación, determinados por la conductividad de entrada y voltaje aplicado a la celda. De este modo se evaluará si las variaciones de conductividad del diluido tienen una magnitud representativa (según la precisión del sistema de adquisición) para los valores de voltaje en estudio (5, 10, 15, y 20 V), y para los valores de conductividad de entrada establecidos (10, 25, y 60 mS/cm). De estas pruebas, también se obtendrá el flujo de corriente a través de la celda para cada punto de operación, y con ello, la resistencia eléctrica de la misma. Gracias a esta información, se validará empíricamente si se está trabajando con una densidad de corriente inferior al valor límite.

Una vez validados los puntos de operación en estudio, se ejecutarán las pruebas dinámicas, aplicando escalones incrementales y decrementales de voltaje para cada valor de conductividad de entrada. También se aplicarán escalones incrementales y decrementales de conductividad de entrada para 0V, con el objetivo de estudiar las dinámicas de conductividad a la salida de la celda frente a cambios en la conductividad de entrada (perturbaciones).

Finalmente, a partir de los resultados registrados, se desarrollará y validará el modelo matemático que aproxime las dinámicas de la celda ED en cada zona de operación.

Luego de haber validado el modelo matemático de la celda, se abordará el diseño del sistema de energización fotovoltaico, dividiendo el proceso en distintas etapas.

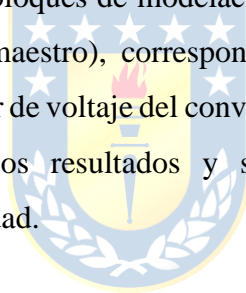
En primer lugar se construirá el modelo matemático del arreglo PV, para después simular bajo

distintas condiciones de temperatura e irradiación. Luego, se diseñará el convertidor Buck que intercede entre el arreglo PV y el banco de baterías (ajusta el voltaje de entrada al banco de baterías, reduciendo el voltaje de salida del arreglo PV), y se programará su correspondiente control MPPT, para extraer la mayor cantidad de energía del arreglo fotovoltaico. Para el banco de baterías, se utilizará el bloque incluido en las librerías de Simulink, que caracteriza el comportamiento general de las baterías de plomo-ácido.

Una vez concluido el diseño del convertidor Buck (reductor de voltaje), se diseñará el convertidor Buck-Boost (que ajusta el voltaje de salida de 12V nominales del banco de baterías a los 0-20 V de entrada a la celda de electrodiálisis), y se programarán e implementarán los controladores que regulan el voltaje de salida del convertidor. Para efectos de diseño, se considerará como carga el mínimo valor de resistencia que adquiere la celda ED (esto es para el máximo valor de conductividad de entrada).

Una vez validado el diseño del sistema de energización y el modelo matemático de la celda de electrodiálisis, serán acoplados ambos bloques de modelación. Luego, se diseñará el controlador de conductividad de salida (controlador maestro), correspondiente a la celda ED, el cual estará en configuración cascada con el controlador de voltaje del convertidor Buck-Boost (controlador esclavo).

Finalmente serán analizados los resultados y se obtendrán conclusiones respecto al funcionamiento del sistema en su totalidad.



Capítulo 4. Adquisición de Datos

4.1. Introducción

En el siguiente capítulo se expone y detalla el funcionamiento de los sensores y módulos utilizados para adquirir la data resultante de las diversas pruebas aplicadas al electrodiador. Se profundiza en la metodología utilizada durante las mismas, y se exponen y analizan los resultados obtenidos.

4.2. Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

4.2.1 Sensor de Conductividad y Transmisor

El conductivímetro corresponde a un InduMax CLS50. Es un sensor de tipo inductivo, donde una bobina transmisora (3) genera un campo magnético alterno que induce un potencial eléctrico en un medio líquido. Los iones presentes en la solución permiten un flujo de corriente que incrementa según aumente la concentración de iones, la que sirve como medida de conductividad. La corriente (8) en el líquido genera un campo magnético alterno en la bobina receptora (5) y finalmente, la corriente resultante inducida en esta bobina, es medida y usada para determinar el valor de conductividad del medio.

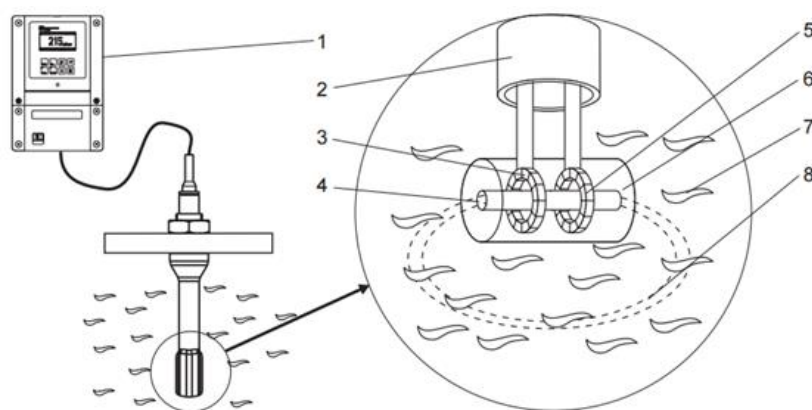


Fig. 4-1 Conductivímetro: Principio de operación

El transmisor es un MyPro CLM 431. Tiene un rango de medición de 0 a 2000 mS/cm, con una máxima resolución de 0.1 μ S/cm y una frecuencia de medición de 2 kHz. La señal de salida es de

corriente, y se configura el rango de 4 a 20 mA. Durante las pruebas, se ajusta el *span* transmisor para un rango entre 5 y 65 mS/cm.

4.2.2 Módulos de Adquisición

A. Lecturas de Conductividad

Para registrar la conductividad a la salida de la celda de electrodiálisis, se tiene el conductivímetro (CLS50) sumergido en un recipiente de acumulación (detallado en el Capítulo 4.3) cuya lectura es recibida, procesada y escalada por el transmisor CLM 431, siendo su salida la corriente del proceso (4...20 mA). Luego, la señal de corriente que proviene del transmisor es recibida por el módulo 5B32, la cual fluye por una resistencia de precisión de 20 Ω produciendo un voltaje a través de la misma, que es leído y luego escalado entre 0 y +5 V (con una precisión de $\pm 0.05\%$ *span*, y no-linealidad de $\pm 0.02\%$ *span*), que corresponde a la salida del módulo (detalles en Anexo A.3).

La señal de voltaje proveniente del módulo 5B32 es recibida entonces por el dispositivo USB1208FS. Éste dispositivo recibe la señal en uno de sus canales de entrada análoga, con un rango máximo de entrada de -10 a +10 V, luego convierte la data análoga recibida en señal de tipo digital, procesándola y luego enviándola al computador, que permite la visualización de la data en tiempo real a través del software provisto por el fabricante. El USB-1208FS tiene un ratio de muestreo máximo de 50 kS/s (que disminuye según aumenta la cantidad de canales utilizados), con un error típico de ± 9.77 mV y una ganancia en el error de $\pm 0.2\%$ (± 20 mV). Para los experimentos se ocuparán 2 canales: uno para el sensor de voltaje y otro para el sensor de conductividad. El ratio de muestreo será de 10 S/s, es decir, un tiempo de muestreo de 0.1 s.

B. Lecturas de Voltaje

Para realizar las lecturas de voltaje aplicado a la celda de electrodiálisis, se utiliza un transductor de voltaje LEM LV25-P, configurado para efectuar lecturas de hasta 20 V, escalado entre 0 a 10 V (salida sensor), adecuado a lo especificado por el dispositivo DAQ para los puertos de entrada analógica.

Para realizar el escalamiento de la señal medible, primero se fija el fondo de escala. Se tiene que el fabricante especifica una corriente máxima de entrada de 10 mA, de acuerdo a la hoja de datos (Anexo A.7), de modo que para un voltaje máximo de entrada de 20 V:

$$R_1 = \frac{V_{inmax}}{i_{max}} = \frac{20 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 2 \text{ k}\Omega \quad (4.1)$$

En segundo lugar, para definir el voltaje a la salida del transductor, se debe calcular la resistencia de medición. Para ello, se tiene a partir de la hoja de datos (Anexo A.7), que la corriente nominal de medición es de 25 mA, por lo tanto, para obtener 10 V a la salida del transductor se tiene:

$$R_M = \frac{V_{outmax}}{i_M} = \frac{10 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 400 \Omega \quad (4.2)$$

Finalmente, de todo lo anterior se garantizan los rangos de entrada y salida especificados para la experimentación. En la Fig. 4-2 se muestra un breve esquemático de la topología utilizada, donde el voltaje de entrada es la señal medible, y el voltaje de salida es la señal emitida al dispositivo DAQ.

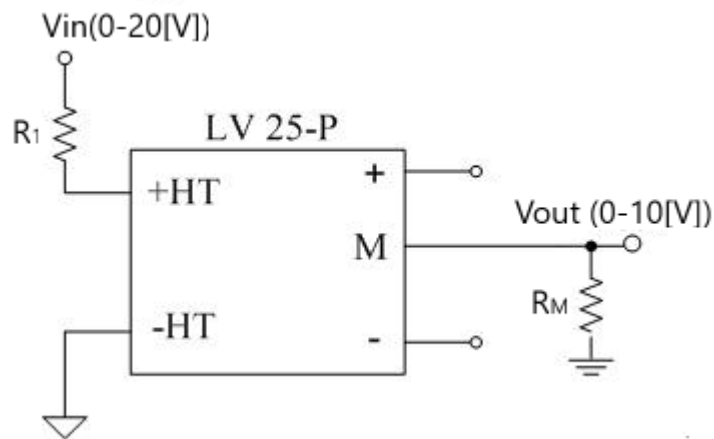


Fig. 4-2 Sensor de Voltaje

4.3. Metodologías y Data Obtenida

4.3.1 Calibración y Configuración de Transmisor

Antes de realizar los experimentos, se realiza el procedimiento de calibración del transmisor de conductividad, y se tiene como instrumento de referencia el conductivímetro de laboratorio HQ40D con una resolución de 5 dígitos enteros y 2 dígitos decimales y una precisión de $\pm 0.5\%$ para lecturas de $1 \mu\text{S/cm}$ a 200 mS/cm (ver Anexo A.8).

Para efectuar la calibración del transmisor, se ingresan los siguientes parámetros según indica el fabricante (Anexo A.4):

- Fondo de escala: se establece en 5 mS/cm a 4 mA , y 65 mS/cm a 20 mA .
- Cero de lectura: el cero de lectura se establece para una medición en agua ultra pura, obtenida en el laboratorio de hidráulica, en la UdeC, cuya conductividad es inferior a los $10 \mu\text{S/cm}$.

- Coeficiente de temperatura: este parámetro permite que el transmisor compense la lectura de conductividad según la temperatura del fluido, sin embargo se fija en cero, pues la temperatura ambiente dentro del laboratorio es constante (22°C) y la temperatura del fluido durante la experimentación permanece constante.
- Constante de celda de medición (CLS50): de la hoja de datos (Anexo A.3) se tiene que la constante de celda de medición es de 2 cm^{-1} .
- Factor de instalación: este parámetro permite que el transmisor realice una compensación de lectura de conductividad de acuerdo al tipo de material que enclaustra a la celda de medición (usualmente cañerías industriales). Sin embargo, si la distancia entre la estructura y la celda es superior a 30 mm entonces no se considera el factor de instalación ($f=1.00$, ver Anexo A.3). En la implementación se cumple esta condición, por lo tanto este parámetro se ingresa con valor igual a uno.

A posteriori de configurar los parámetros del transmisor, se procede a preparar una solución de calibración, que consiste en la mezcla de agua y cloruro de sodio, con una concentración 13.839 g/L de NaCl, y correspondiente conductividad de 25 mS/cm (lectura realizada con el conductímetro de referencia). Luego, se sumerge la celda de medición en la solución de calibración, separada a más de 30 mm del límite del recipiente que la contiene, y se ingresa el valor de conductividad de la solución mediante la interfaz del transmisor, según lo indica el fabricante (Anexo A.4). Finalmente se hacen pruebas para soluciones con distintas conductividades, confirmando las lecturas con el conductímetro de referencia, dando por válido y satisfactorio el proceso de calibración.

4.3.2 Análisis Preliminar

A. Análisis de capacidad de remoción

Con el objetivo de determinar si la remoción de sal es significativa para los puntos de operación escogidos, y determinar si se trabaja según las tolerancias eléctricas especificadas por el fabricante de la celda ED, se ejecutan experimentos preliminares para tres soluciones de agua con NaCl, cada una con una conductividad aproximada de 10 mS/cm (5.51 g/l de NaCl), 40 mS/cm (22.17 g/l de NaCl), y 60 mS/cm (33.28 g/L de NaCl). Además, durante el experimento, ambas soluciones circulan con un flujo constante de 40 lt/h, el mínimo indicado para la celda ED (Anexo A.1), en vista que a menor flujo volumétrico, mayor será la capacidad de remoción de sales [8]. Así, para cada solución de entrada, se efectúa la desalación aplicando 5, 10, 15 y 20 V en los electrodos de la celda ED.

El procedimiento consiste en circular de forma continua, y con igual flujo (40 lt/h), un litro de solución como diluido y un litro de la misma solución como concentrado, con igual conductividad, mientras se aplica una tensión fija a la celda.

Luego de que ha circulado la totalidad del fluido, se mide la conductividad resultante en el recipiente de salida de diluido del proceso. En la Fig. 4-6 se observa un esquema de montaje. En la **TABLA 4-1** se exponen los resultados de las pruebas, donde σ es la conductividad eléctrica del diluido.

TABLA 4-1 Resultados de Pruebas

Parámetro	Valor de entrada (mS/cm)	Voltaje aplicado a celda ED (V)	Valor de salida (mS/cm)	Variación	Variación porcentual
σ	10.99	5	10.69	0.30	-2.73%
		10	10.29	0.70	-6.37%
		15	9.88	1.11	-10.10%
		20	9.34	1.65	-15.01%
	25.29	5	24.89	0.40	-1.58%
		10	24.04	1.25	-4.94%
		15	23.24	2.05	-8.11%
		20	22.19	3.10	-12.26%
	38.88	5	38.59	0.29	-0.75%
		10	37.93	0.95	-2.44%
		15	37.26	1.62	-4.17%
		17.6	36.81	2.07	-5.38%

A partir de los datos mostrados en la **TABLA 4-1**, se tiene que la capacidad de desalación de la celda ED, para las distintas zonas de operación escogidas, es superior al 1% aproximadamente. Además, notar que la conductividad de entrada difiere de los valores especificados en un principio. Esto debido que para conductividades superiores a 40 mS/cm, la celda tiene una resistencia muy baja, por lo que se sobrepasa la tolerancia de corriente (5 A) para voltajes muy por debajo de los 20 V. De modo que se redefine la conductividad de entrada en estudio a los valores mostrados en la tabla. Aun así, para 40 mS/cm aprox., se alcanzó el nivel máximo de corriente permitido para 17.6 V. Se decidió mantener este valor de conductividad pues es representativo en comparación a la conductividad del agua de mar, fijada como líquido de referencia para este trabajo. Valores inferiores de conductividad implicarían un distanciamiento considerable de la premisa.

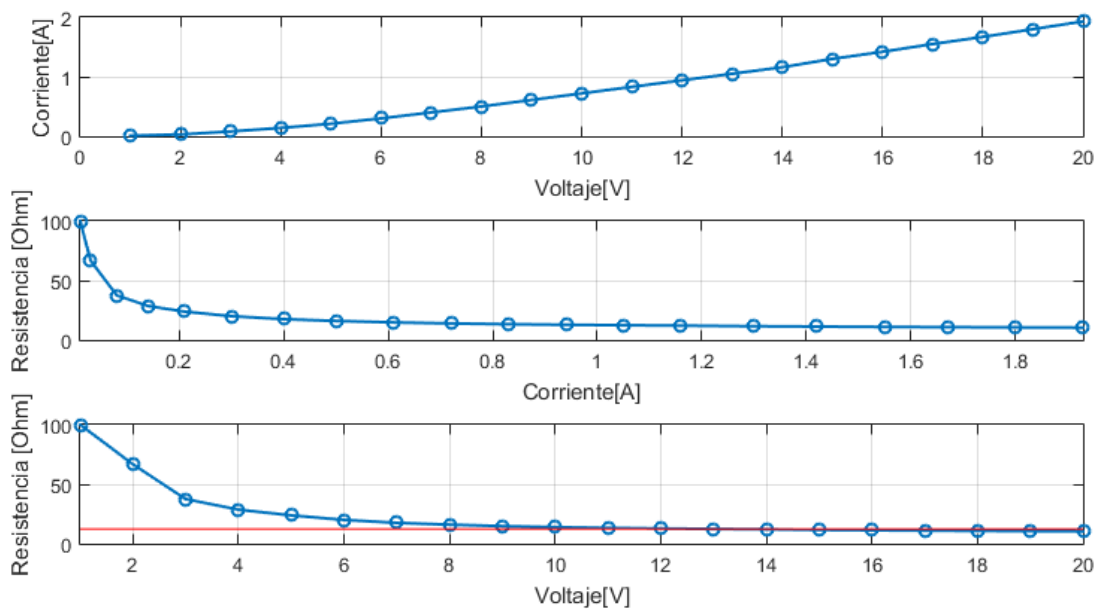
De los resultados se infiere también que para mayor voltaje incrementa la capacidad de remoción, lo cual da cuenta que el flujo molar de iones dentro del fluido es proporcional a la intensidad de corriente a través de la celda ED, y por lo tanto, proporcional al voltaje aplicado sobre ella [9]. Por otro lado, resulta interesante el hecho de que la máxima remoción se obtuvo para la solución de 25.29

mS/cm, debido posiblemente a trabajar con valores cercanos o inclusive superiores a la densidad de corriente límite, aspecto abordado en el análisis de resistencia eléctrica.

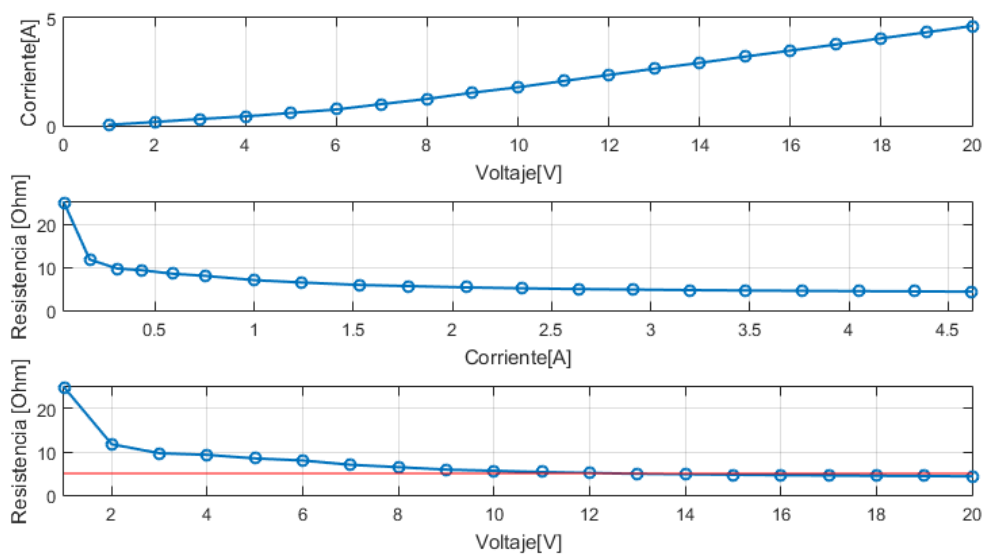
Finalmente, quedan determinados los valores de conductividad que tendrán las tres soluciones en estudio para las pruebas dinámicas, siendo 10, 25 y 40 mS/cm; y se mantienen los valores de escalón de voltaje, acotando para el último caso a 17.6 V en lugar de 20 V. Cabe destacar que en la práctica, la magnitud de conductividad no será exactamente el valor especificado, a consecuencia de que se requiere gran volumen de cada solución (25 litros aproximadamente). Por ello se considera una tolerancia de ± 3 mS/cm.

B. Análisis de Resistencia Eléctrica de Celda ED

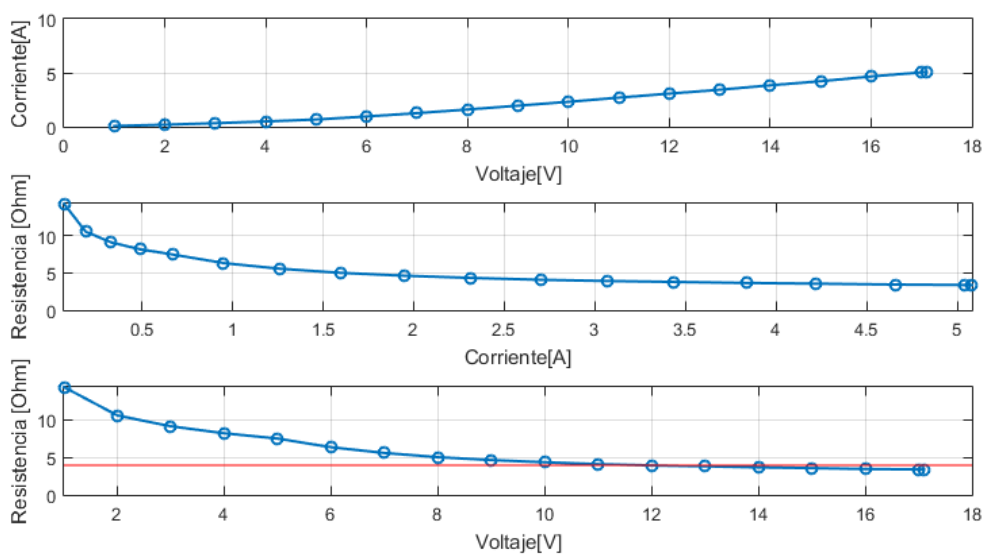
Para estudiar el comportamiento óhmico del electrodiálizador, se aplica voltaje a la celda y se lee la corriente que fluye por ella mediante la pantalla de la fuente DC, luego se calcula la resistencia mediante ley de Ohm. La experimentación es realizada para las tres soluciones en estudio, y se exponen los resultados en la Fig. 4-3.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-3 Curvas Voltaje-Corriente, Corriente-Resistencia y Voltaje-Resistencia

(a) resultados para 10.99 mS/cm; (b) resultados para 25.29 mS/cm; (c) resultados para 38.88 mS/cm

De la Fig. 4-3, se observa en primer lugar que para los puntos de operación escogidos, se trabaja bajo la densidad de corriente límite, pues para todos los casos, la corriente aumenta de forma aproximadamente lineal desde los 5 V aprox. hasta los 20 V (17.6 V en caso de (c)), sin generarse la curva con forma de meseta que se describe en [6] (Fig. 4-4), donde se menciona que, para esta zona, la eficiencia de remoción disminuye drásticamente.

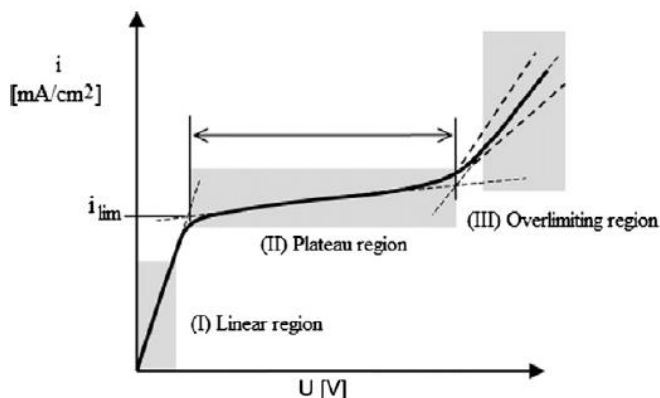


Fig. 4-4 Curva densidad de corriente vs voltaje para celda ED [6]

En segundo lugar, se observa una no-linealidad en la resistencia para voltajes por debajo de los 5 V aprox. Esta no-linealidad es producida por las membranas de intercambio iónico y la interacción de ellas con los iones presentes en el fluido, pues para bajo voltaje no todos los iones pueden atravesar la capa de las membranas, provocándose polarización [6] (esto también se hace evidente en la menor capacidad de remoción a bajo voltaje, como se observó en el apartado anterior). Para valores superiores de tensión, por sobre el umbral, hay transferencia iónica real entre las membranas, por lo tanto existe una mayor distribución iónica en las cámaras de diluido y concentrado, de forma que el flujo de corriente es efectivo a lo largo de la celda ED, incrementando linealmente según aumentos de voltaje, como se evidencia en los resultados. Luego, se observa que para valores superiores a 5 V aprox., las características de las curvas son visiblemente lineales.

Finalmente, a partir de los resultados observados de la **TABLA 4-1**, se define que la planta operará, en general, con tensiones superiores a los 5 V, por cuanto la remoción es más eficiente mientras más cercano se está al punto de densidad de corriente límite [6].

De lo anterior entonces, con el fin de simplificar la modelación del proceso, se decide utilizar un valor de resistencia constante para cada caso, siendo calculada como la media de resistencias resultantes para voltajes superiores a 5 V, dando como resultado 12.35Ω para la solución de 10.99 mS/cm, 5.01Ω para la solución de 25.29 mS/cm y 3.92Ω para la solución de 38.88 mS/cm. Luego, se debe establecer una relación entre estos puntos, expuesta en la Fig. 4-5.

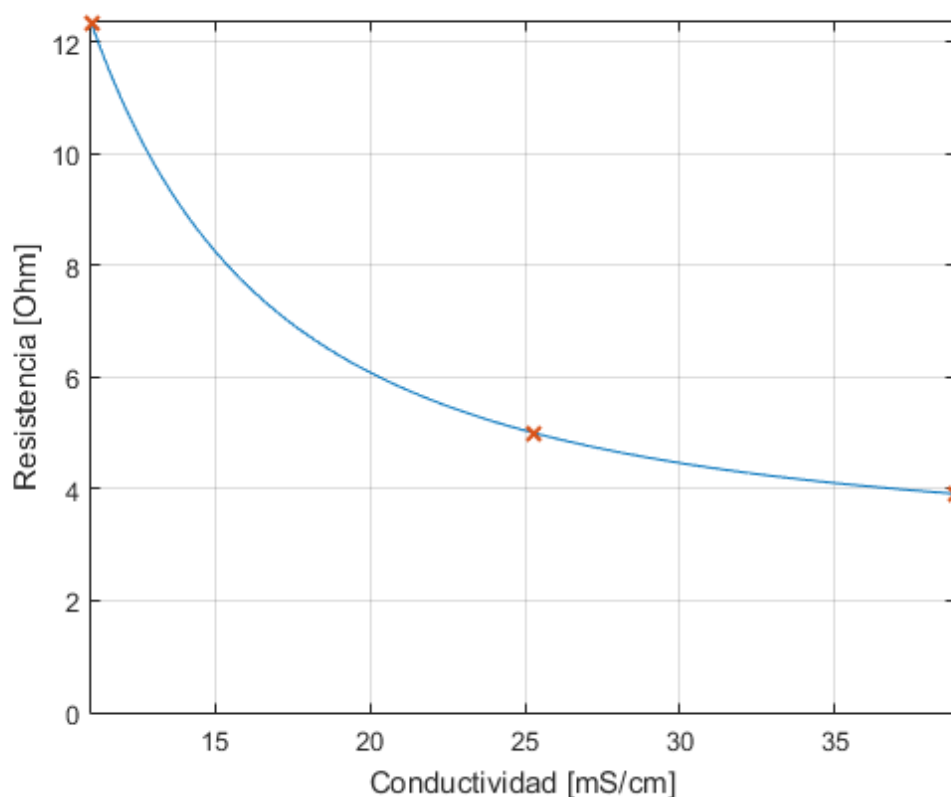


Fig. 4-5 Aproximación de Resistencia según Conductividad

Para estimar la relación entre resistencia y conductividad, se toman los 3 puntos encontrados anteriormente, y se observa que entre ellos hay una relación no-lineal, por lo tanto se decide utilizar una función potencia que pase por los tres puntos. Esta se obtiene mediante la herramienta *Curve Fitting* de Matlab, siendo el rango de interés entre los 10 y 40 mS/cm. La curva encontrada está definida según:

$$R_{Celda} = 808.1\sigma_{in}^{-1.862} + 3.03 \quad (4.3)$$

donde,

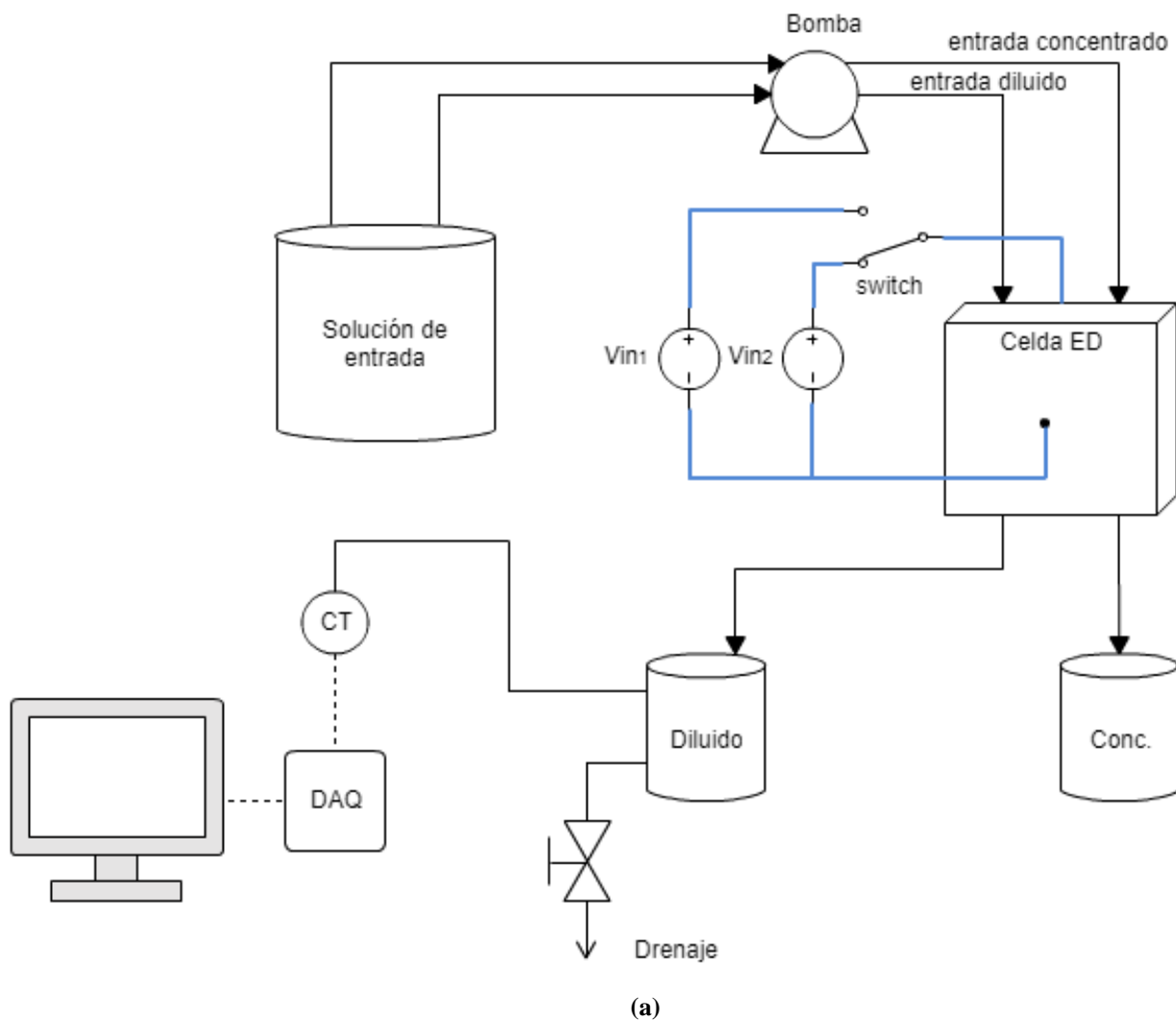
σ_{in} : Conductividad eléctrica a la entrada de la celda ED.

Así entonces queda establecida la dependencia matemática entre resistencia y conductividad a la entrada del desalinizador.

4.3.3 Pruebas Dinámicas

A. Montaje de Planta y Metodología de Pruebas

En la Fig. 4-6 se observa la planta piloto para la ejecución de las pruebas dinámicas y la correspondiente adquisición de datos.





(b)

Fig. 4-6 Planta piloto

(a) esquema de planta; (b) planta real

En (a), se tiene que la solución de entrada fluye por los canales de concentrado y diluido, empujada por la bomba peristáltica, garantizando igual flujo y presión por ambos canales. Para el estudio, es de interés la salida del diluido, que es acumulado en el recipiente de medición, donde está sumergida la celda de medición del sensor-transmisor de conductividad (CT), como se aprecia en (b). El recipiente de adquisición mantiene un volumen constante de 1 litro de diluido, que es controlado mediante la válvula manual ilustrada en el esquema. La lectura de conductividad es entonces enviada al sistema DAQ, y finalmente visualizada y almacenada en el computador. El switch ilustrado en (a) se utiliza para conmutar fácilmente entre las fuentes de alimentación. De esta forma es posible generar un escalón de voltaje.

Para el caso de las dinámicas de conductividad de salida frente a entrada escalón de voltaje, primero se preparan 25 litros de cada una de las soluciones en estudio. También se prepara una solución de sulfato de sodio con una conductividad igual a la máxima conductividad en estudio (40

mS/cm), según lo indica [4]. Esta solución recircula por los canales de limpieza de electrodos de la celda ED, y no cumple un rol ponderativo en el proceso. Para la preparación de cada solución de agua con NaCl, de acuerdo a la conductividad deseada, se tiene de [4] la relación entre conductividad y concentración de NaCl dada por:

$$C_{NaCl} = \frac{EC - 89.4}{1.8} \quad (4.4)$$

Donde,

EC : conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$

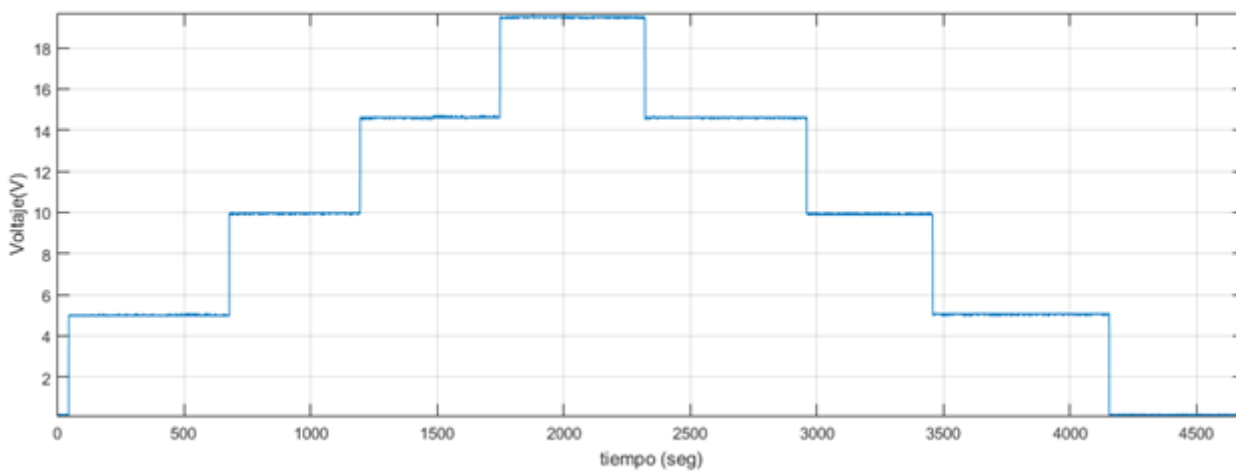
C_{NaCl} : concentración de NaCl en mg/l

Luego, se llena el estanque de entrada (matraz de 5 litros, apreciable en (c)) con la solución en estudio, y se ceba la celda ED. Entonces se enciende y prepara todo el sistema de adquisición, se encienden las fuentes DC (cada una configurada según su magnitud de voltaje correspondiente), y se verifica volumen constante de diluido en el recipiente de medición. Luego de tener todo preparado y verificar s.s., se procede a ejecutar escalones incrementales de 5 V (acotado entre 0 V y 20 V) esperando a que se cumpla s.s. para cada caso. Al haber alcanzado el máximo voltaje, se continúa mediante la aplicación de escalones decrementales de voltaje, para regresar finalmente a 0 V. El procedimiento es análogo para los tres casos bajo análisis.

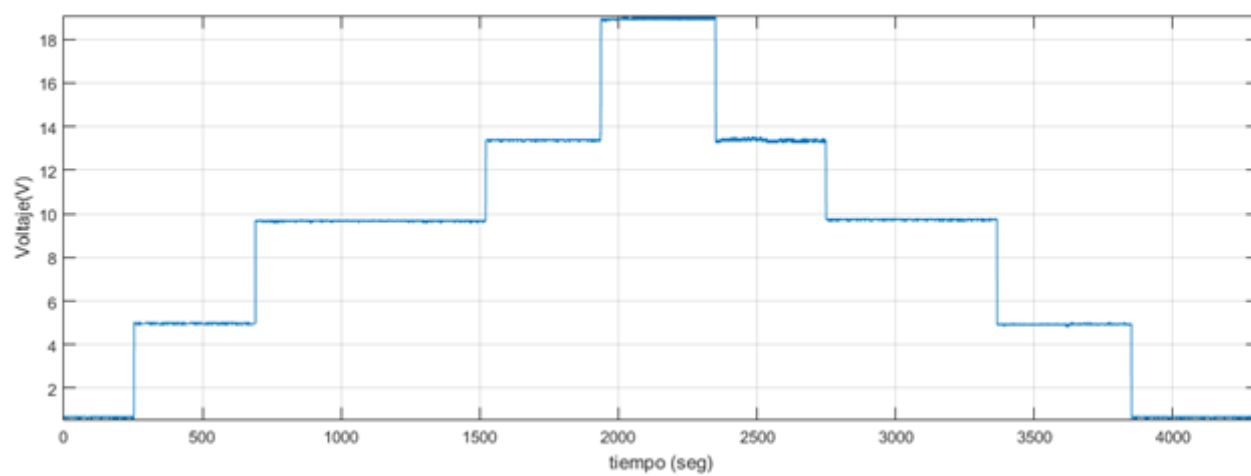
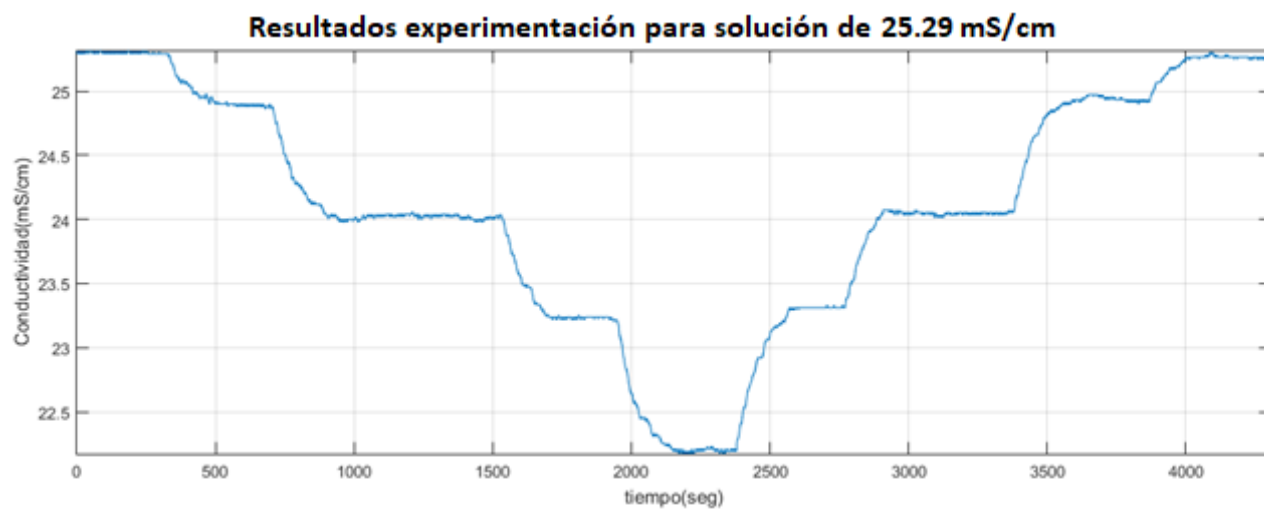
Por otro lado, para el caso de las dinámicas de conductividad de salida en respuesta a un escalón de conductividad de entrada, primero se fija voltaje nulo en los electrodos de la celda ED, luego se inicia la circulación de la solución de mínima conductividad (10 mS/cm), y al verificarse s.s., se realiza un escalón de conductividad cambiando rápidamente a la solución de 25 mS/cm. Luego, al cumplirse s.s. se cambia a la siguiente solución, de 40 mS/cm. Al verificarse s.s., se continúa el estudio realizando escalones decrementales al sistema, repitiendo el procedimiento hasta terminar con la solución de mínima conductividad.

B. Data Obtenida y análisis de resultados

En las siguientes figuras se tienen los resultados para las tres soluciones de prueba: 10.99 mS/cm (6.06 g/l de NaCl), 25.29 mS/cm (14.00 g/l de NaCl), y 38.88 mS/cm (21.55 g/l de NaCl).



(a)



(b)

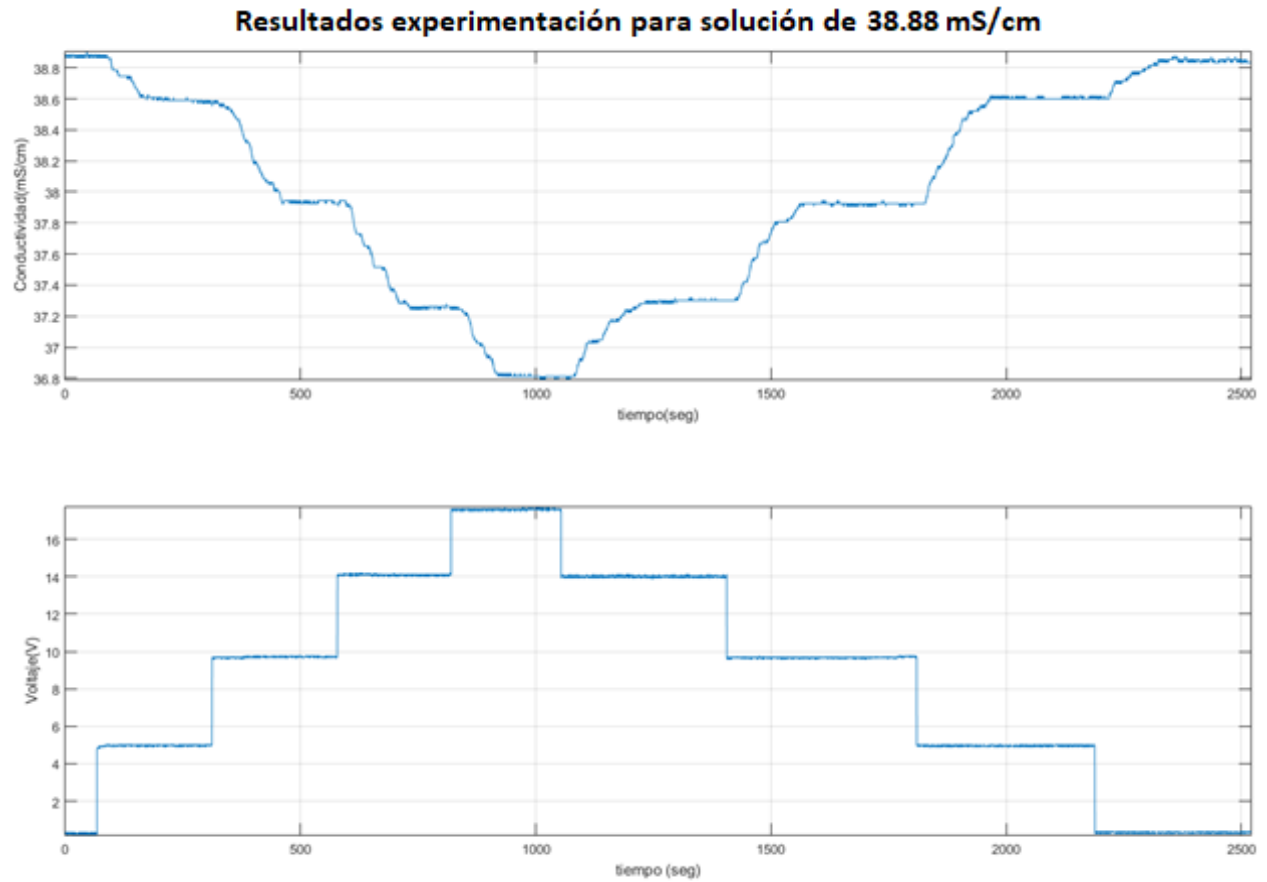


Fig. 4-7 Resultados frente a entrada escalón de voltaje

(a) solución de 10.99 mS/cm; (b) solución de 25.29 mS/cm; (c) solución de 38.88 mS/cm

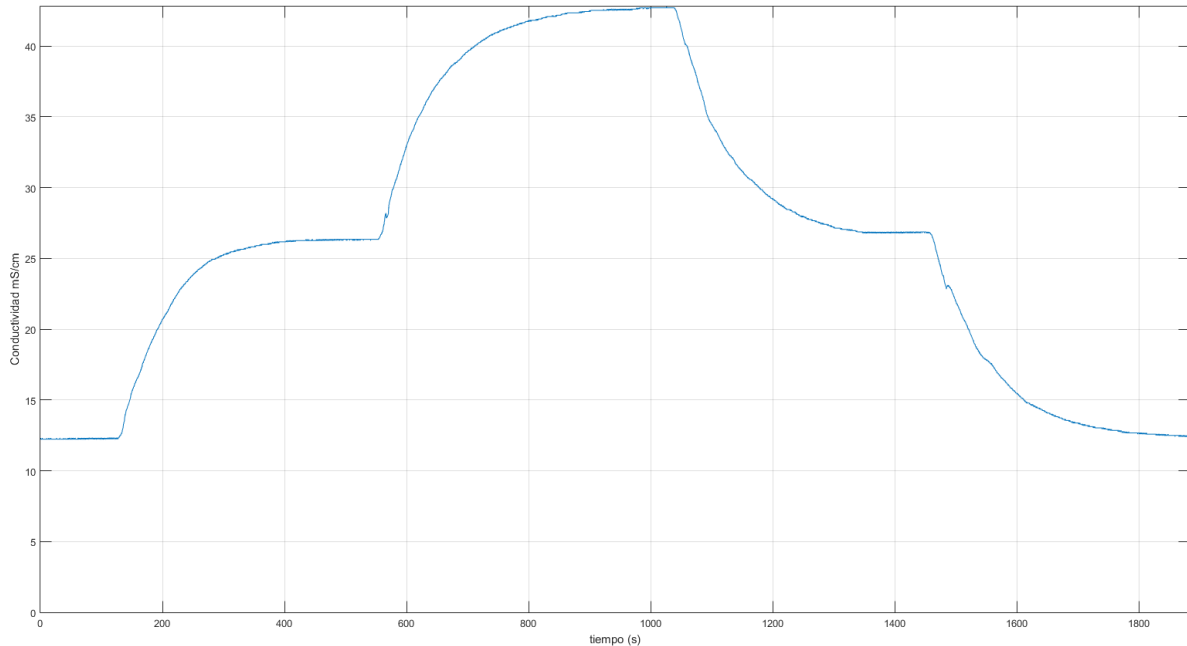


Fig. 4-8 Respuesta frente a entrada escalón de σ_{in}

De los resultados, es evidente que las dinámicas son aproximables por un sistema de primer orden con retardo, notable sobre todo en la Fig. 4-8. Por otro lado, es apreciable en la Fig. 4-7 (c) la presencia de no-linealidades en la respuesta de salida de la planta.

En general, se observa que las dinámicas de conductividad incremental son más rápidas que las dinámicas decrementales, y que las ganancias son distintas en cada prueba escalón, lo cual anticipa que será necesario definir parámetros distintos en el modelo matemático, definidos según la región de operación del proceso, y según si la dinámica es incremental o decremental. Además, existe un tiempo de retardo considerable para cada caso, y una evidente lentitud en las dinámicas del proceso. Todos aspectos serán estudiados en detalle durante el capítulo de modelación matemática de la planta ED. Sin embargo, es importante destacar que el elemento más ponderativo en la lentitud de las dinámicas corresponde al volumen del recipiente de adquisición donde está inmerso el conductivímetro (asumiendo flujo constante), por cuanto a mayor sea el volumen de este recipiente (1 litro para este caso), más lentas serán las dinámicas (y viceversa), pues tardará más tiempo en renovarse el fluido dentro del mismo. Luego es importante mencionar que los resultados obtenidos (y por tanto el modelo matemático por desarrollar), también son afectados por fenómenos hidráulicos dentro del recipiente de adquisición, añadiendo no-linealidades en las mediciones, siendo estos fenómenos un motivo de estudio que escapa al alcance de este trabajo.

En la Fig. 4-7, para (a) y (b), como se determinó en apartados anteriores, la máxima remoción se obtiene para una entrada escalón de 15 a 20 V. En el caso de (c) probablemente habría sucedido de forma similar, sin embargo no es determinable, pues el voltaje máximo aplicado fue de 17 V aprox., por lo tanto el escalón superior tuvo una variación de 2 V. Aun así, se observa una tendencia incremental en la capacidad de remoción para mayores voltajes. Notar que esta última afirmación sólo es válida mientras la densidad de corriente sea inferior al límite, que, como se vio anteriormente, es un criterio satisfecho.



Capítulo 5. Modelo Matemático de Celda ED

5.1. Introducción

A continuación se estudiará en detalle la información obtenida durante el capítulo anterior. Se expondrán y detallarán todos los criterios considerados durante el desarrollo de modelo matemático de la celda de electrodiálisis y la implementación de ellos en entorno Simulink, para finalizar con el análisis y verificación de los resultados de simulación, de forma que se evidencie consistencia entre estos y los resultados de la planta real. Todos los códigos y algoritmos utilizados para el desarrollo del modelo matemático pueden ser revisados en el Anexo B y Anexo C.

5.2. Desarrollo del Modelo Matemático

Para desarrollar el modelo matemático de la Celda ED, se analiza la información recopilada y expuesta en el Capítulo 4, y se realiza el estudio ciñendo el análisis de acuerdo a la dinámica resultante para cada entrada escalón de voltaje. Luego, los datos son filtrados aplicando un filtro de media móvil de 100 puntos para el caso de conductividad (comando *smooth* de Matlab); y calculando la media simple de cada nivel de escalón para el caso de la data de voltaje. El mismo procedimiento es realizado para cada situación estudiada.

Como se determinó anteriormente, las dinámicas pueden ser aproximadas según la respuesta de un sistema de primer orden con retardo. Así, la función de transferencia de cada sistema estará definida según:

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot e^{-T_o \cdot s} \quad (5.1)$$

donde,

- K : ganancia,
- τ : constante de tiempo, y
- T_o : tiempo de retardo.

Luego, existirá una función de transferencia para cada zona de operación, y se generará una tabla que resumirá los parámetros asociados, cuyos valores de K y T_o serán obtenidos por método gráfico, mientras que τ se obtendrá de modo que minimice el error cuadrático medio entre la media móvil de la data obtenida, y la salida del modelo matemático. Este algoritmo de minimización se expone en el Anexo B.4.

5.2.1 Respuesta a Escalón de Voltaje

A. Solución de $\sigma = 10 \text{ mS/cm}$

A continuación se expone un set de figuras donde se muestran las dinámicas obtenidas según cada escalón de voltaje.

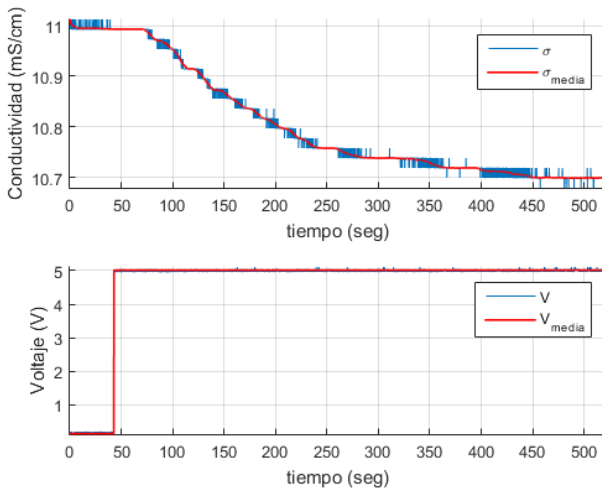


Fig. 5-1 Respuesta a escalón 0-5 V

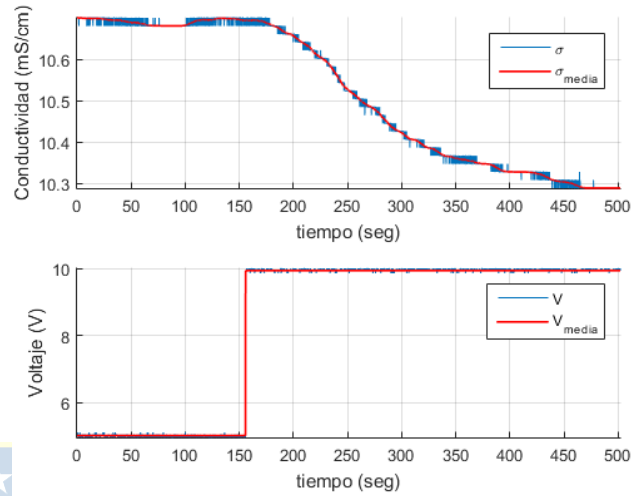


Fig. 5-2 Respuesta a escalón 5-10 V

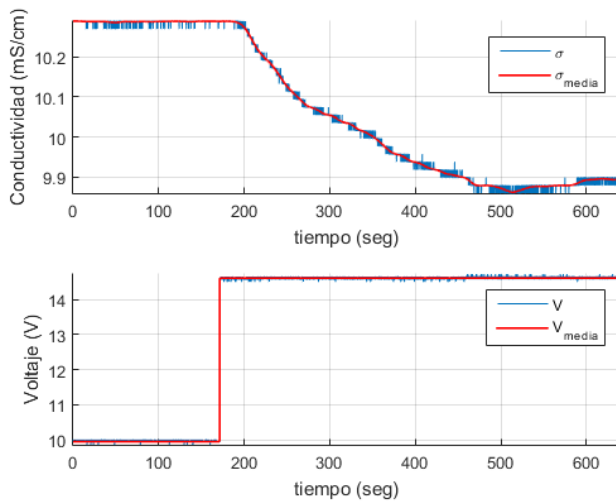


Fig. 5-3 Respuesta a escalón 10-15 V

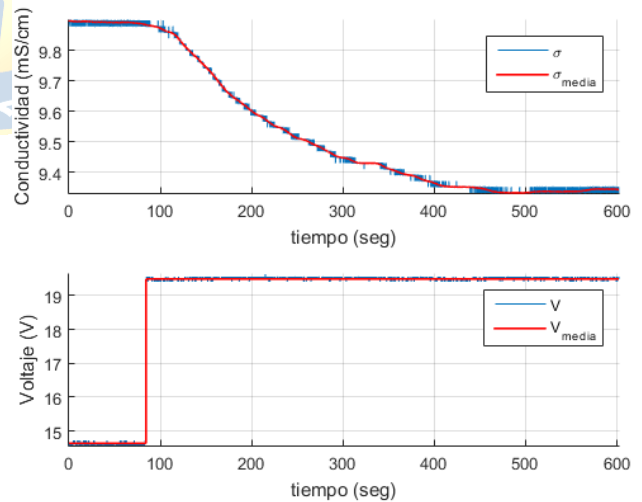


Fig. 5-4 Respuesta a escalón 15-20 V

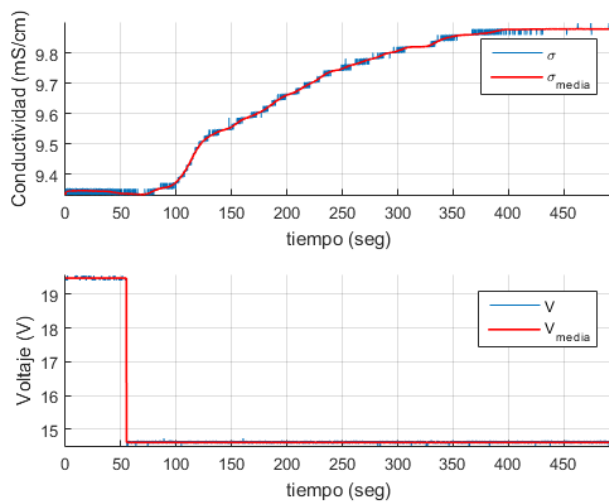


Fig. 5-5 Respuesta a escalón 20-15 V

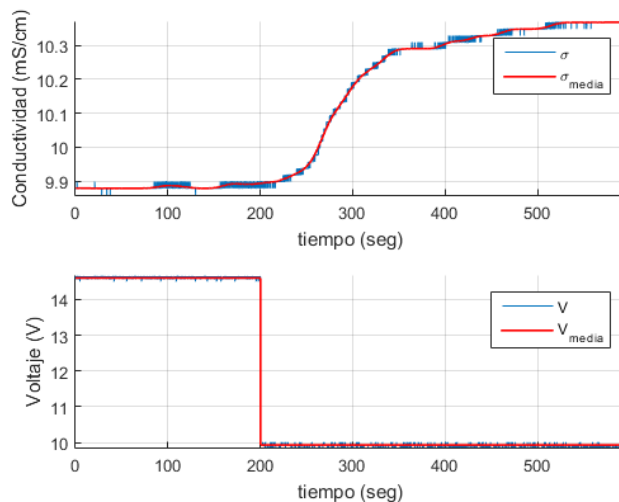


Fig. 5-6 Respuesta a escalón 15-10 V

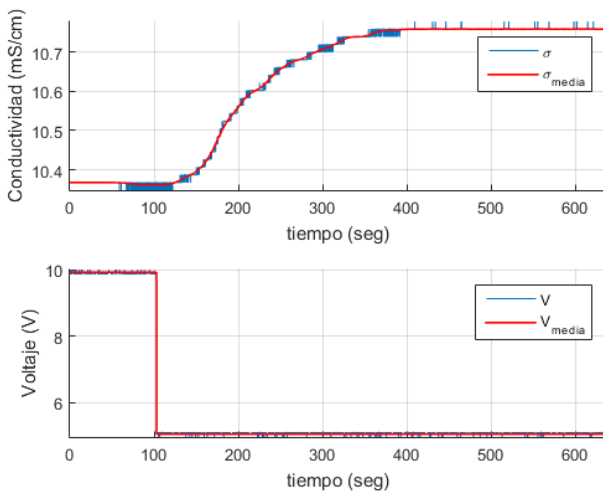


Fig. 5-7 Respuesta a escalón 10-5 V

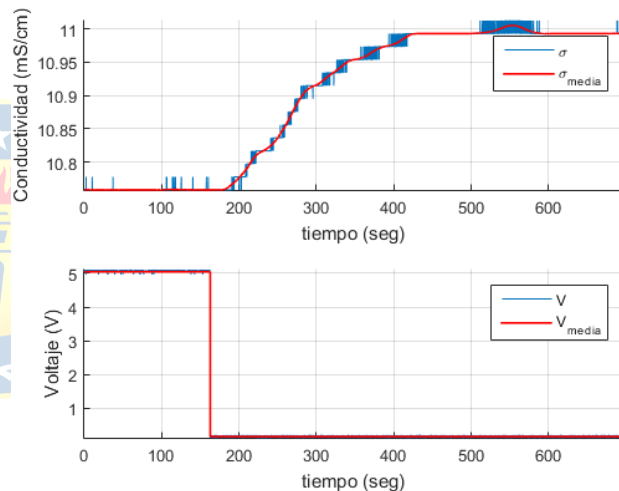


Fig. 5-8 Respuesta a escalón 5-0 V

Luego, a partir de las figuras, se obtienen los parámetros de las funciones de transferencia que describirán las dinámicas de cada zona de operación, enlistados en la **TABLA 5-1**. También se calcula el error absoluto medio porcentual para cada modelo.

TABLA 5-1 Error de estimación y parámetros de F. de T.

Escalón	K	To (s)	τ (s)	Error Absoluto Medio (%)
0-5 V	-0.0607	33.1	112.7	0.0499
5-10 V	-0.0822	30.5	97.9	0.0831
10-15 V	-0.0855	31.4	92.3	0.0982
15-20 V	-0.1128	19.0	119.3	0.1061
20-15 V	-0.1109	34.9	107.0	0.0901
15-10 V	-0.1039	44.3	62.7	0.0652
10-5 V	-0.0798	42.7	78.6	0.0396
5-0 V	-0.0471	39.2	80.4	0.0510

Al simular según los parámetros encontrados, se tienen los resultados expuestos en las siguientes figuras:

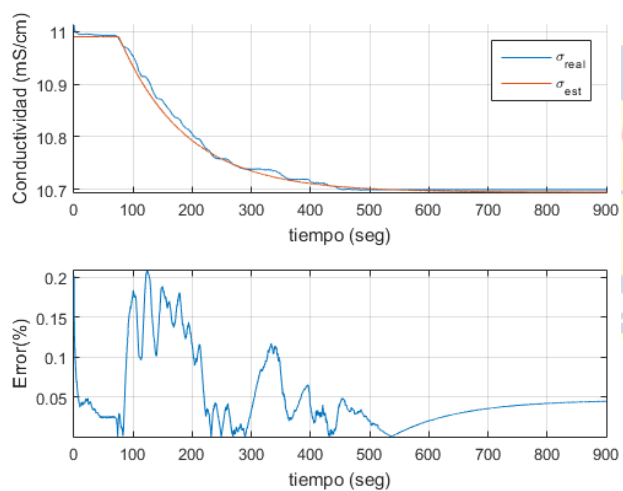


Fig. 5-9 Simulación respuesta a escalón 0-5 V

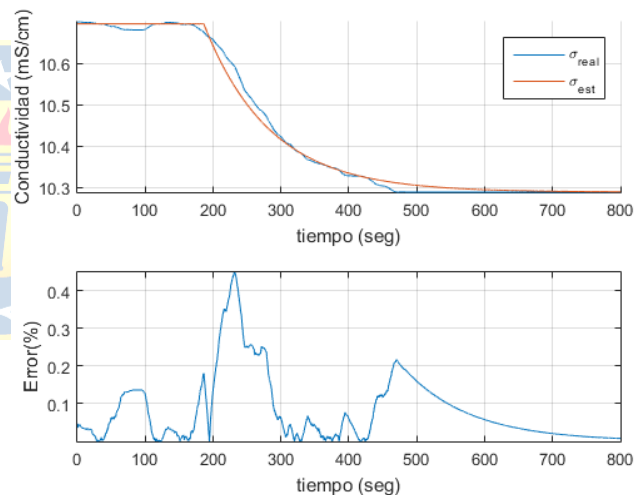


Fig. 5-10 Simulación respuesta a escalón 5-10 V

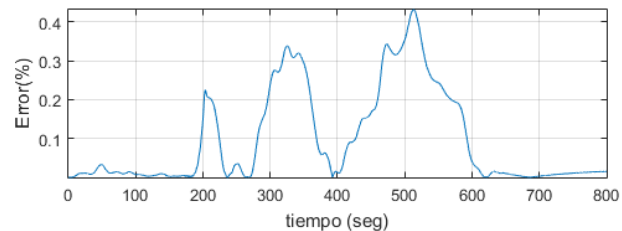
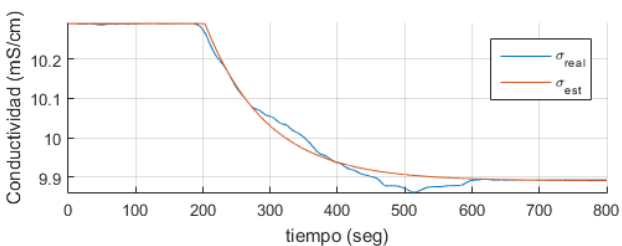


Fig. 5-11 Simulación respuesta a escalón 10-15 V

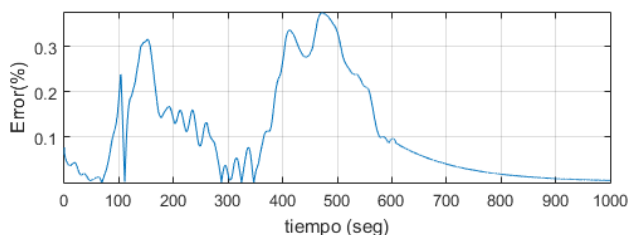
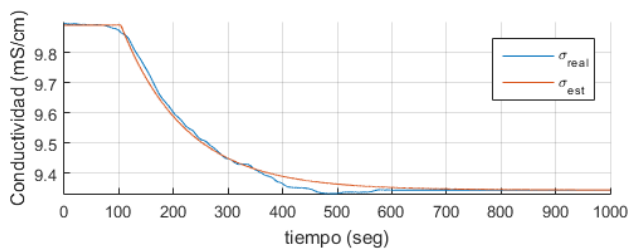


Fig. 5-12 Simulación respuesta a escalón 15-20 V

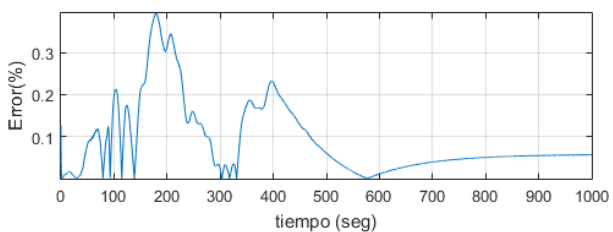
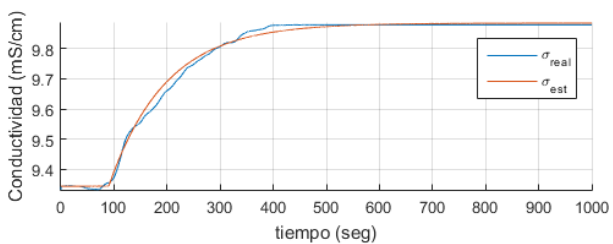


Fig. 5-13 Simulación respuesta a escalón 20-15 V

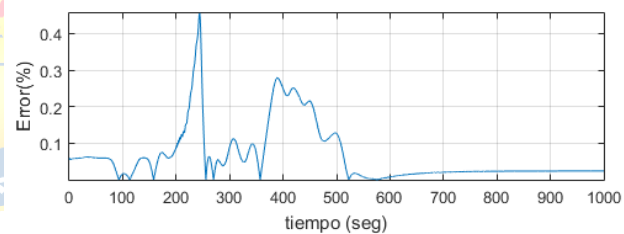
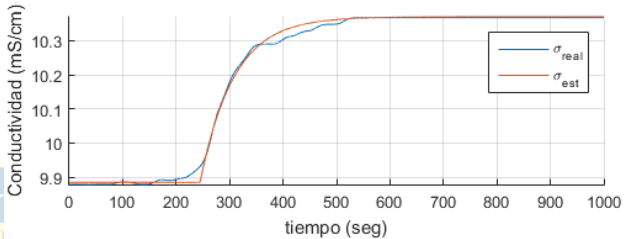


Fig. 5-14 Simulación respuesta a escalón 15-10 V

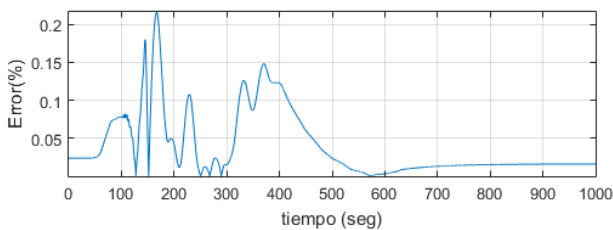
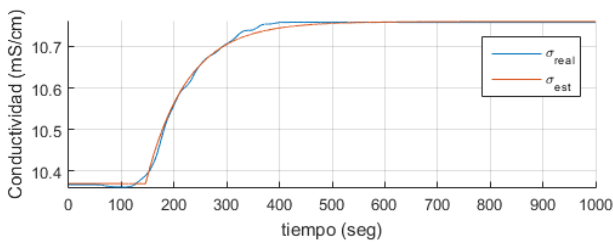


Fig. 5-15 Simulación respuesta a escalón 10-5 V

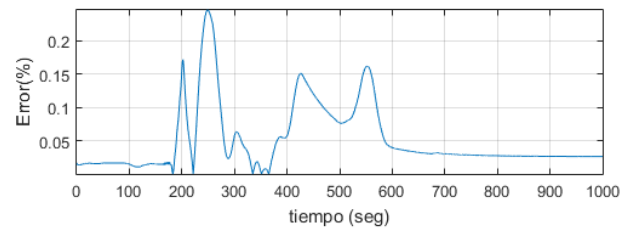
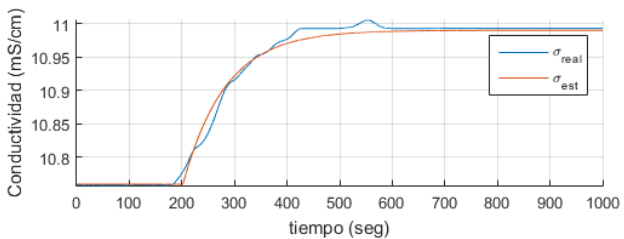


Fig. 5-16 Simulación respuesta a escalón 5-0 V

B. Solución de $\sigma = 25 \text{ mS/cm}$

En las siguientes figuras se ilustran los resultados segmentados según cada respuesta a escalón:

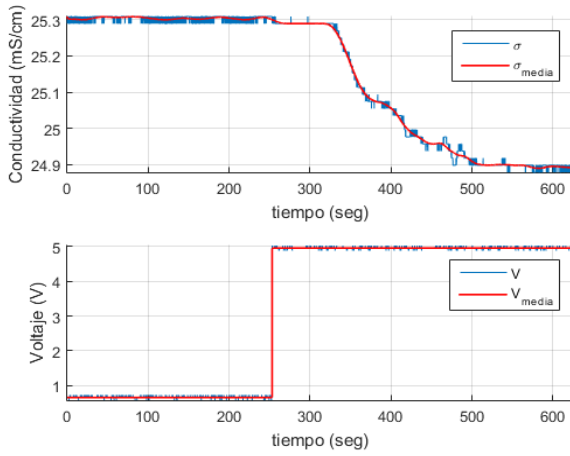


Fig. 5-17 Respuesta a escalón 0-5 V

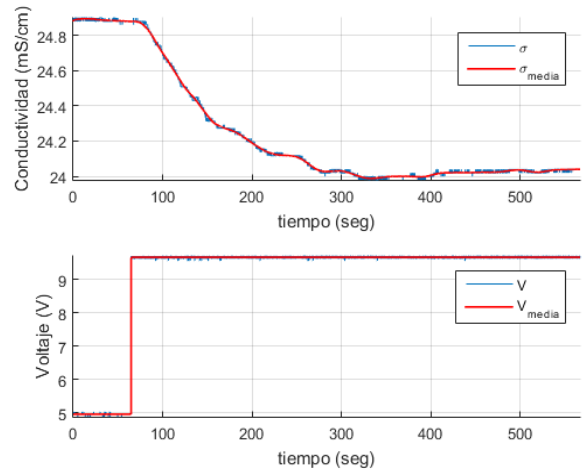


Fig. 5-18 Respuesta a escalón 5-10 V

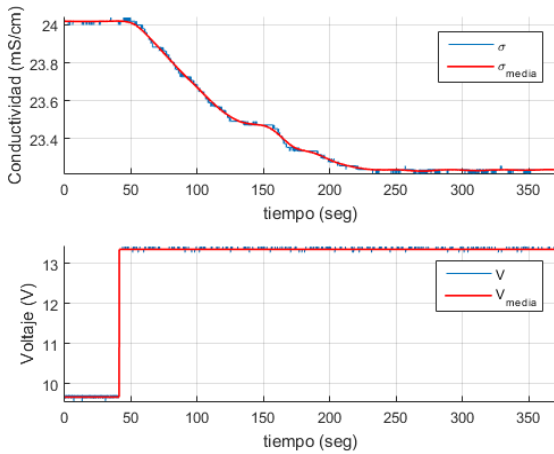


Fig. 5-19 Respuesta a escalón 10-15 V

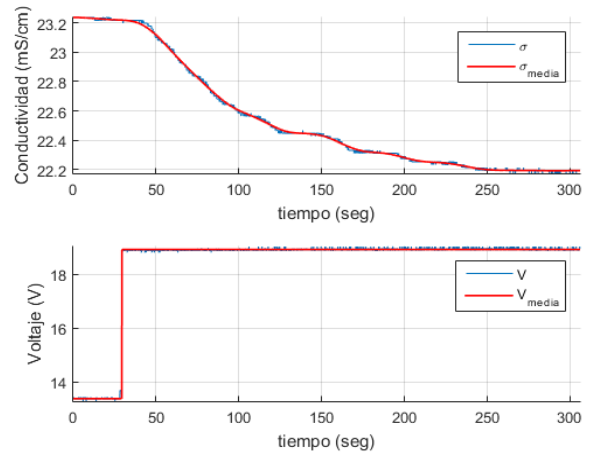


Fig. 5-20 Respuesta a escalón 15-20 V

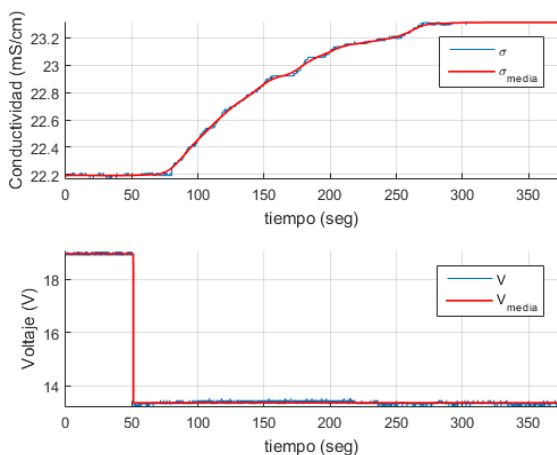


Fig. 5-21 Respuesta a escalón 20-15 V

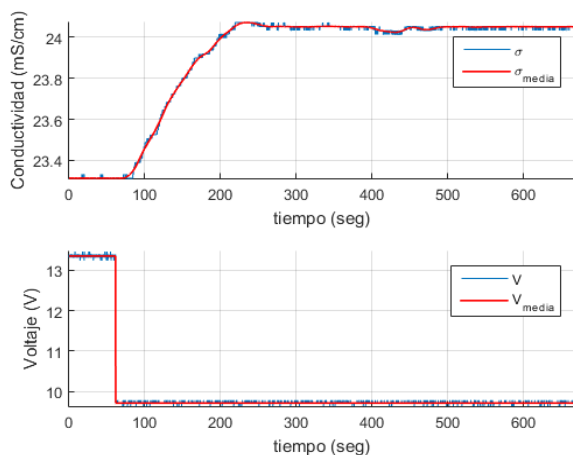


Fig. 5-22 Respuesta a escalón 15-10 V

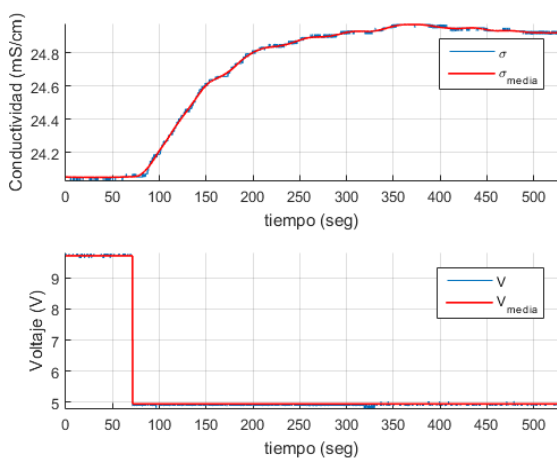


Fig. 5-23 Respuesta a escalón 10-5 V

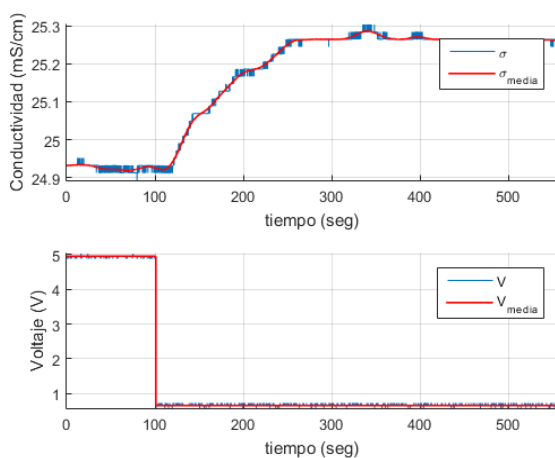


Fig. 5-24 Respuesta a escalón 5-0 V

Luego, a partir de las figuras, se obtienen los parámetros de las funciones de transferencia, enlistados en la **TABLA 5-2**. También se calcula el error absoluto medio porcentual para cada modelo.

TABLA 5-2 Error de estimación y parámetros de F. de T.

Escalón	K	To (s)	τ (s)	Error Absoluto Medio (%)
0-5 V	-0.0929	70.6	70.7	0.0336
5-10 V	-0.1781	10.7	71	0.0807
10-15 V	-0.2117	10.4	71	0.0607
15-20 V	-0.1856	8.8	68.2	0.0421
20-15 V	-0.2007	23.8	74.3	0.0723
15-10 V	-0.2036	22.7	54	0.0477
10-5 V	-0.1824	14	59.5	0.0497
5-0 V	-0.0781	20	45.6	0.0269

Al simular según los parámetros encontrados, se tienen los resultados expuestos en las siguientes figuras:

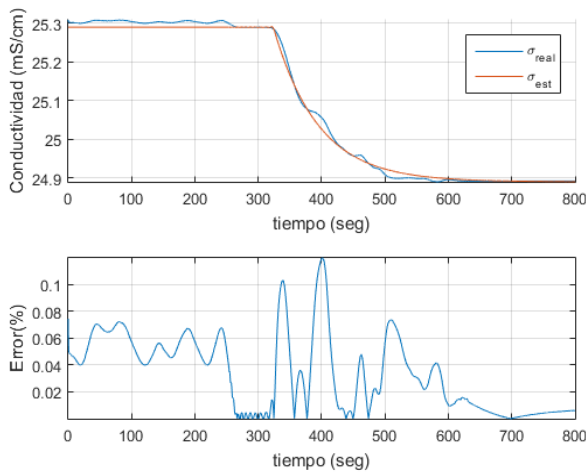


Fig. 5-25 Simulación respuesta a escalón 0-5 V

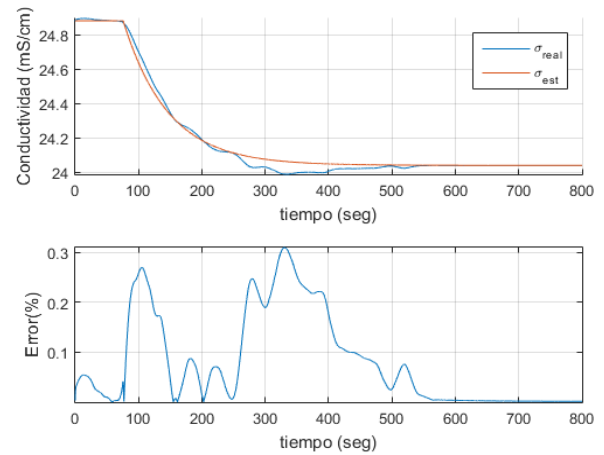


Fig. 5-26 Simulación respuesta a escalón 5-10 V

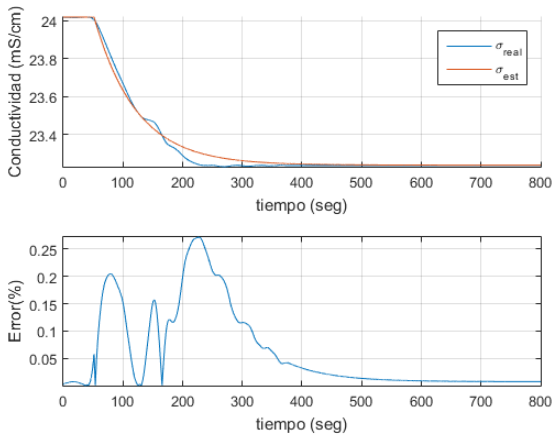


Fig. 5-27 Simulación respuesta a escalón 10-15 V

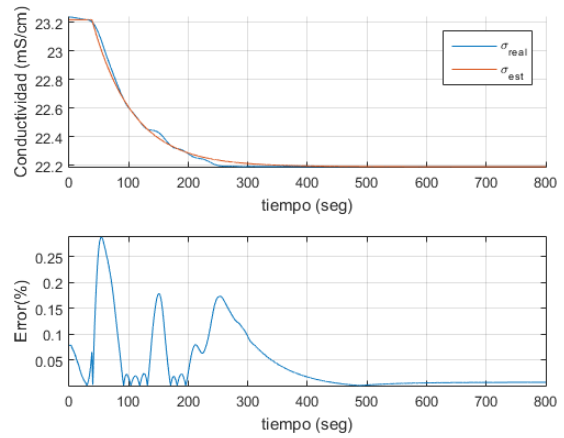


Fig. 5-28 Simulación respuesta a escalón 15-20 V

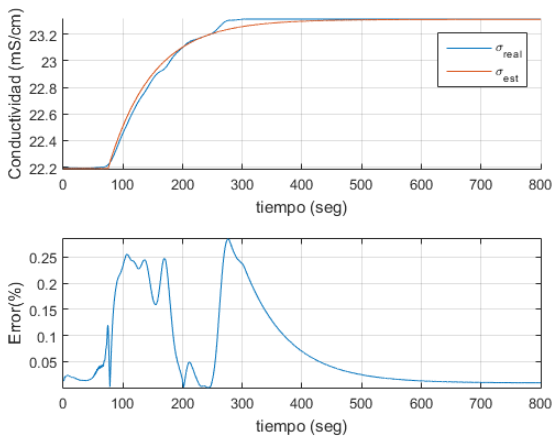


Fig. 5-29 Simulación respuesta a escalón 20-15 V

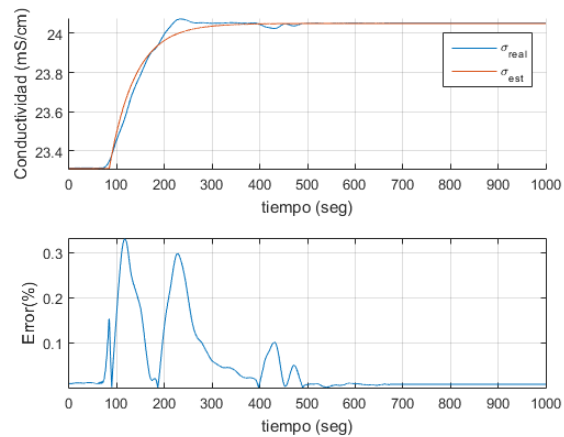


Fig. 5-30 Simulación respuesta a escalón 15-10 V

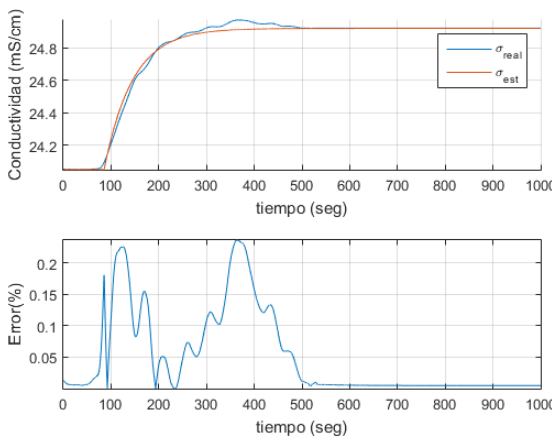


Fig. 5-31 Simulación respuesta a escalón 10-5 V

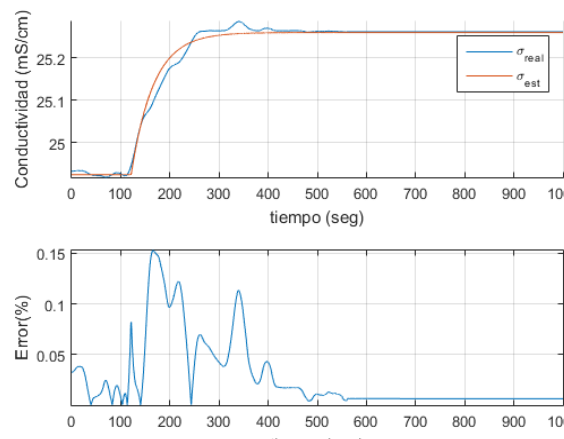


Fig. 5-32 Simulación respuesta a escalón 5-0 V

C. Solución de $\sigma = 40 \text{ mS/cm}$

Finalmente, para esta última conductividad en estudio, y al igual que en los casos anteriores, se exponen las siguientes figuras que ilustran los resultados asociados a cada respuesta a escalón:

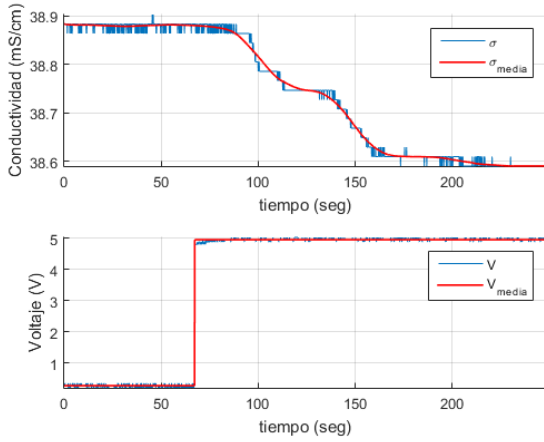


Fig. 5-33 Respuesta a escalón 0-5 V

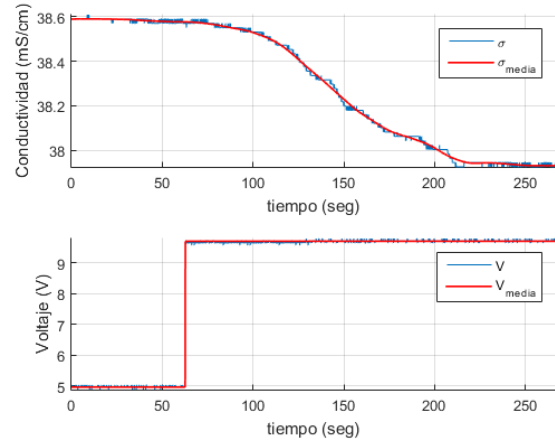


Fig. 5-34 Respuesta a escalón 5-10 V

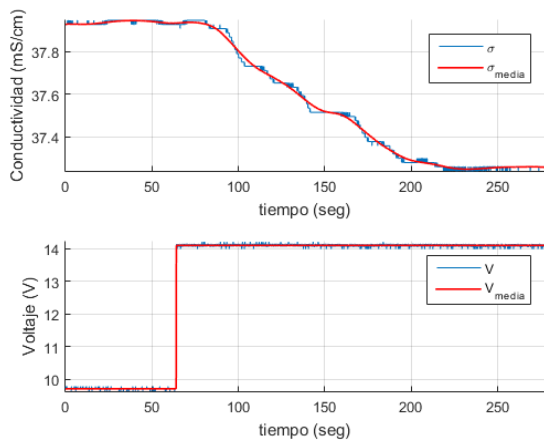


Fig. 5-35 Respuesta a escalón 10-15 V

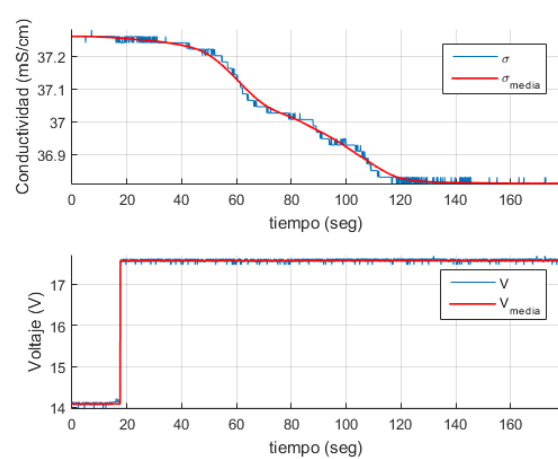


Fig. 5-36 Respuesta a escalón 15-18 V

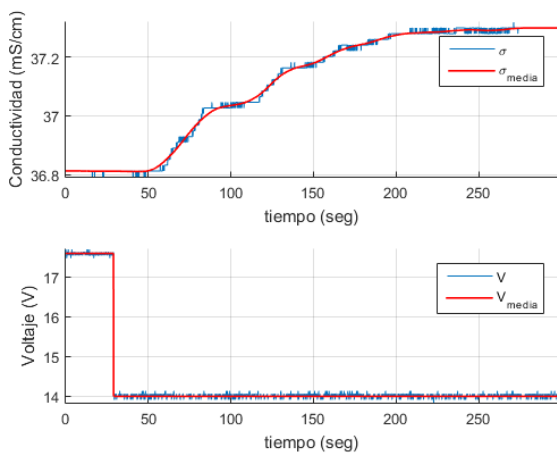


Fig. 5-37 Respuesta a escalón 18-15 V

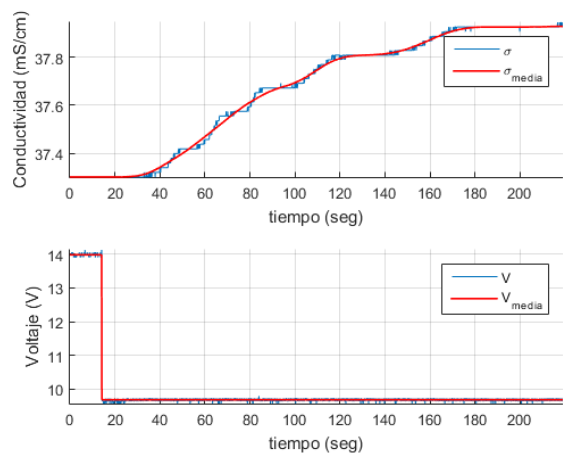


Fig. 5-38 Respuesta a escalón 15-10 V

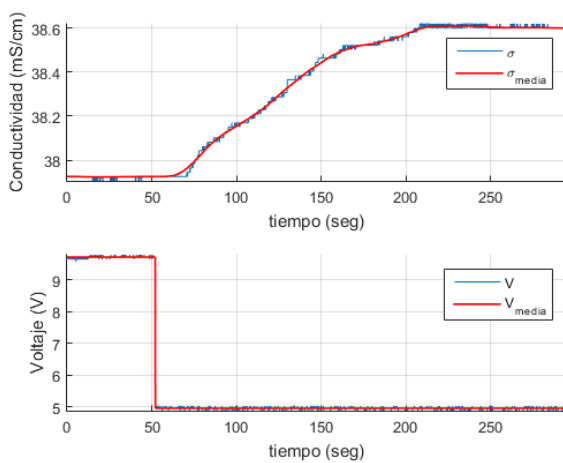


Fig. 5-39 Respuesta a escalón 10-5 V

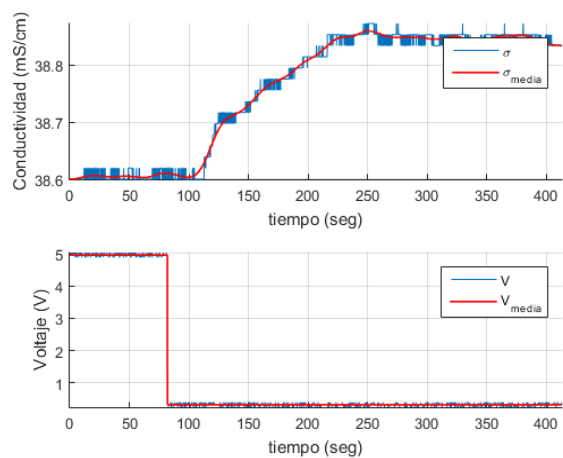


Fig. 5-40 Respuesta a escalón 5-0 V

Luego, a partir de las figuras, se obtienen los parámetros de las funciones de transferencia, enlistados en la **TABLA 5-3**. También se calcula el error absoluto medio porcentual para cada modelo.

TABLA 5-3 Error de estimación y parámetros de F. de T.

Escalón	K	To (s)	τ (s)	Error Absoluto Medio (%)
0-5 V	-0.0619	36.2	23.6	0.0091
5-10 V	-0.1373	46.0	47.3	0.0215
10-15 V	-0.1550	46.7	29.1	0.0348
15-18 V	-0.1289	30.6	20.8	0.0153
18-15 V	-0.1361	55.2	30.8	0.0153
15-10 V	-0.1460	54.8	26.1	0.0160
10-5 V	-0.1410	41.9	33.3	0.0177
5-0 V	-0.0496	39.4	30.7	0.0188

Al simular según los parámetros encontrados, se tienen los resultados expuestos en las siguientes figuras:

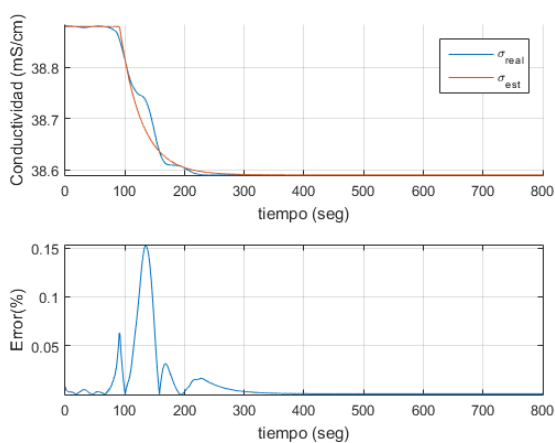


Fig. 5-41 Simulación respuesta a escalón 0-5 V

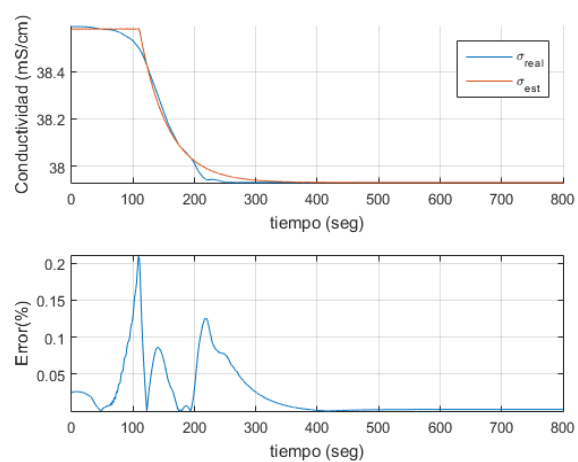


Fig. 5-42 Simulación respuesta a escalón 5-10 V

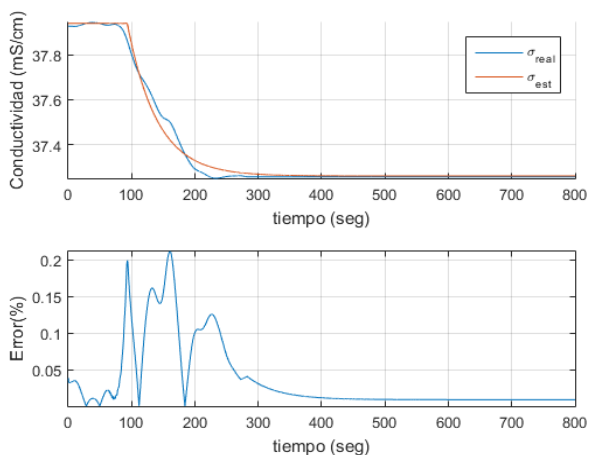


Fig. 5-43 Simulación respuesta a escalón 10-15 V

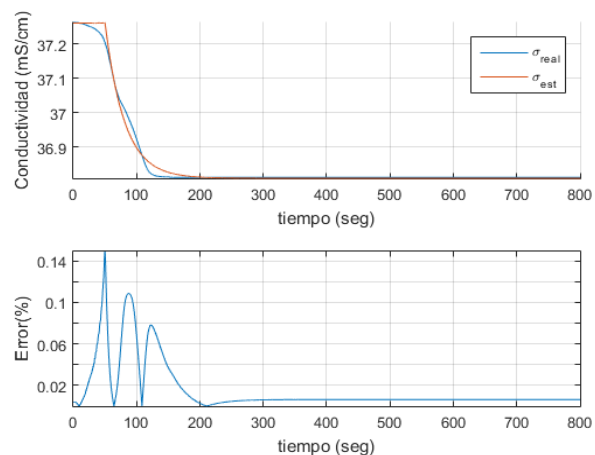


Fig. 5-44 Simulación respuesta a escalón 15-18 V

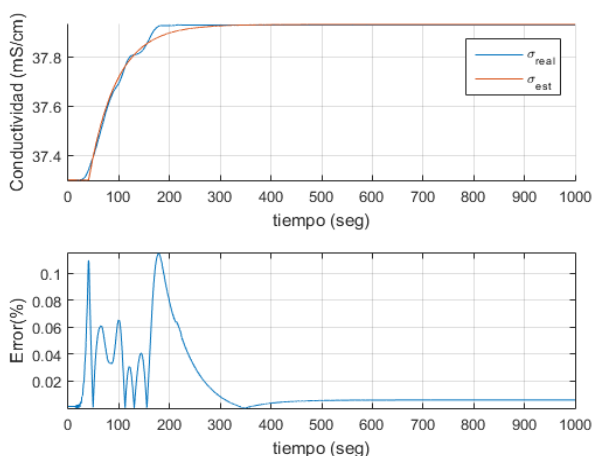


Fig. 5-45 Simulación respuesta a escalón 18-15 V

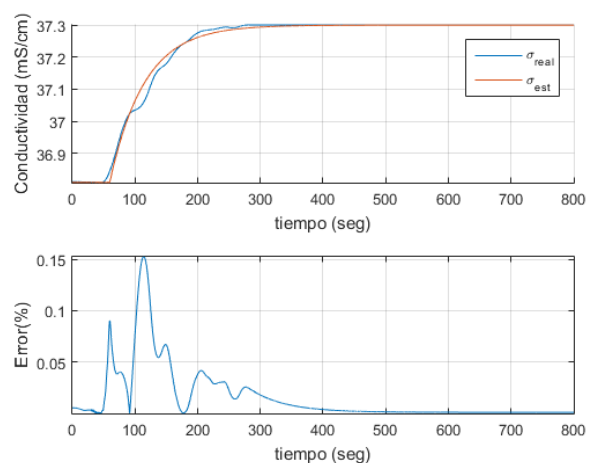


Fig. 5-46 Simulación respuesta a escalón 15-10 V

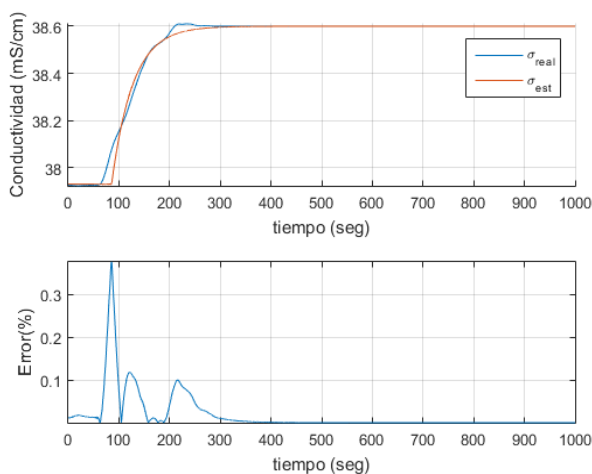


Fig. 5-47 Simulación respuesta a escalón 10-5 V

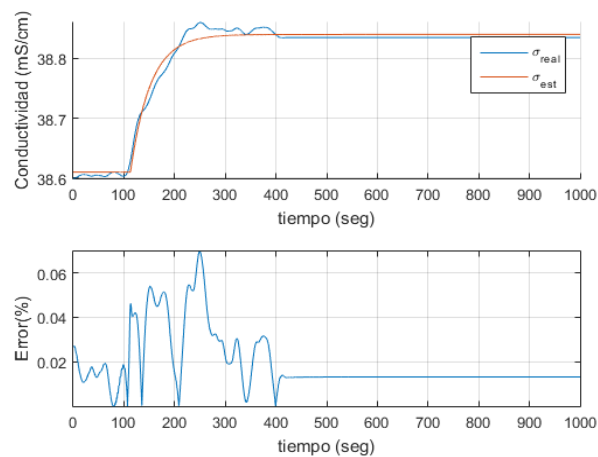


Fig. 5-48 Simulación respuesta a escalón 5-0 V

5.2.2 Respuesta a Escalón de Conductividad

Para realizar esta prueba, no se contó con implementación para registrar el escalón de conductividad de entrada, por lo tanto, para estimar el tiempo de retardo del sistema, se consideró como aproximación aceptable la media entre los tiempos de retardo encontrados para las respuestas a escalón de voltaje 5-0V en cada caso. El parámetro de constante de tiempo fue obtenido de forma análoga al caso de las respuestas a escalón de voltaje, mientras que la ganancia es evidentemente unitaria, pues no hay voltaje aplicado a la celda y la lectura a la salida del sistema es igual a la lectura del conductivímetro de referencia. Finalmente, se tienen los parámetros del sistema en la siguiente tabla.

TABLA 5-4 Error de estimación y parámetros de F. de T.

Escalón	K	To (s)	τ (s)	Error Absoluto Medio (%)
10-25 mS/cm	1	24.4	71.4	0.8498
25-40 mS/cm	1	24.4	87.1	0.1901
40-25 mS/cm	1	24.4	84.7	0.6972
25-10 mS/cm	1	24.4	89.2	0.5676

A continuación se muestran los resultados de las pruebas y de la salida del modelo matemático por zona de operación. Con el fin de suavizar los datos, se filtró la data real por media móvil de 200 puntos.

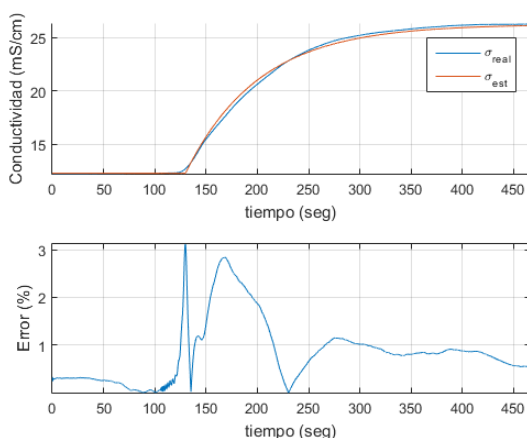


Fig. 5-49 Simulación respuesta a escalón 10-25 mS/cm

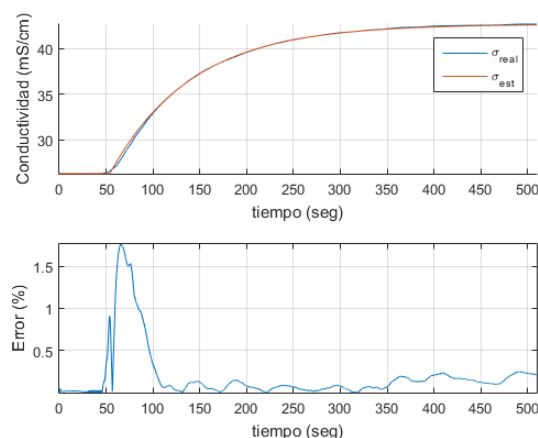


Fig. 5-50 Simulación respuesta a escalón 25-40 mS/cm

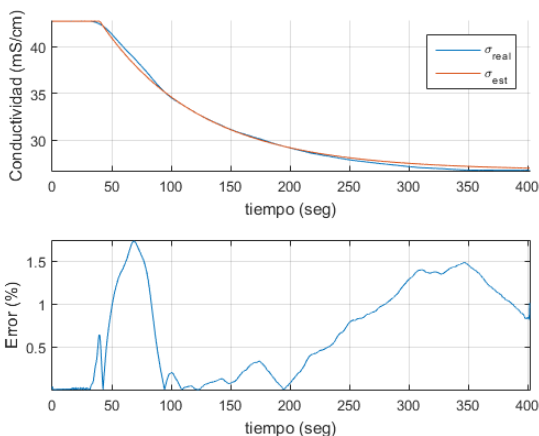


Fig. 5-51 Simulación respuesta a escalón 40-25 mS/cm

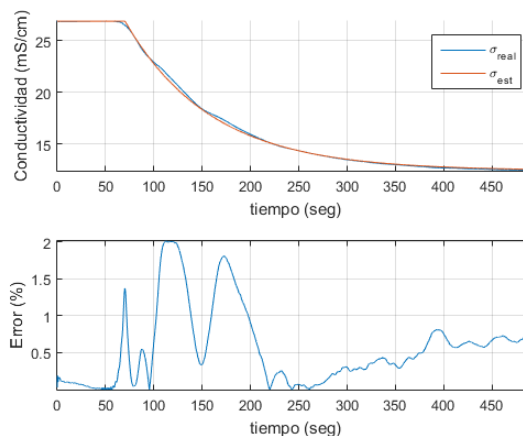


Fig. 5-52 Simulación respuesta a escalón 25-10 mS/cm

5.3. Análisis de Resultados

Para el caso de respuesta a escalón de voltaje, se tuvo un error absoluto medio inferior al 0.11% en todos los casos. Se evidencia también que el error porcentual es mayor para situaciones donde las no-linealidades de las dinámicas de la celda ED son más notables. Sin embargo, es apreciable que las dinámicas de primer orden con retardo describen con exactitud aceptable (error absoluto medio inferior al 1%) las dinámicas de la planta. También se observa error estacionario, que se mantiene en un valor inferior al 0.1%, siendo en la mayoría de los casos inferior incluso al 0.05%. Por otro lado, un fenómeno interesante sucede en las dinámicas resultantes de la solución de 40 mS/cm, donde se aprecia un comportamiento cercano al tipo rampa. Esto confirma mayor absorción iónica para soluciones de entrada con mayor conductividad. También da cuenta de ello el hecho de que, como se puede apreciar en la **TABLA 5-1**, **TABLA 5-2** y **TABLA 5-3**, las dinámicas son más rápidas en cuanto incrementa la conductividad de la solución estudio. Con respecto a este aspecto recién mencionado, se mantiene la resolución de aproximar las mismas por un sistema de primer orden con retardo, con el objetivo de simplificar la posterior implementación en el entorno Simulink. Esto además se sostiene en el hecho de que la magnitud de error de estimación muestra valores tolerables.

Para el caso de las respuestas a variación en la conductividad de entrada, se tiene un error porcentual inferior al 3% para todos los casos. Es apreciable que las dinámicas son mucho más suaves y mejor aproximables según el sistema obtenido para cada caso. En cuanto al error estacionario, se mantiene inferior al 1% en cada zona de operación.

De todo lo anterior, se concluyen resultados satisfactorios en las dinámicas aproximadas por cada modelo matemático, donde las zonas de operación se definen de acuerdo a la capacidad de remoción evidenciada para cada caso, y a la conductividad de entrada al sistema desalador.

5.4. Implementación en Simulink

Para realizar las simulaciones, se implementan en Simulink los modelos matemáticos obtenidos. Por conveniencia, se utiliza un sistema de *tags*, donde cada función de transferencia tiene un código único que la identifica. Luego, durante la simulación, el algoritmo escoge el modelo matemático de acuerdo a la zona de operación en que se encuentre el sistema en un momento determinado, y según si la dinámica de conductividad es decremental o incremental. Todos los algoritmos pueden ser revisados en el Anexo C. Por otro lado, la selección de zona de operación depende de los valores pasados de conductividad de entrada a la celda ED y de los valores pasados de conductividad de salida. De este modo es posible simular para cualquier valor de conductividad de entrada comprendido entre 10 y 40 mS/cm. Estos rangos están delimitados según las máximas capacidades de remoción evidenciados durante la experimentación (Capítulo 5.2.1). En la TABLA 5-5 y TABLA 5-6 se detalla todo lo mencionado.

TABLA 5-5 Tag de función de transferencia según zona de operación (dinámicas decrementales)

$\sigma_{entrada}(k-1)$	$\sigma_{entrada}(k-1)-\sigma_{salida}(k-1)$			
	0 a 0.3 mS/cm	0.3 a 0.7 mS/cm	0.7 a 1.098 mS/cm	> 1.098 mS/cm
10 a 15 mS/cm	111	112	113	114
15 a 25 mS/cm	211	212	213	214
25 a 40 mS/cm	311	312	313	314

TABLA 5-6 Tag de función de transferencia según zona de operación (dinámicas incrementales)

$\sigma_{entrada}(k-1)$	$\sigma_{entrada}(k-1)-\sigma_{salida}(k-1)$			
	0 a 0.23 mS/cm	0.23 a 0.62 mS/cm	0.62 a 1.105 mS/cm	> 1.105 mS/cm
10 a 15 mS/cm	121	122	123	124
15 a 25 mS/cm	221	222	223	224
25 a 40 mS/cm	321	322	323	324

En las dos tablas expuestas arriba, para cada *tag* se tiene que el primer dígito indica el rango donde se encuentra la conductividad de entrada a la celda ED, el segundo dígito indica si la dinámica es de tipo decremental o incremental. Este dígito es determinado por el algoritmo en función de la variación de voltaje: si hay una variación positiva (negativa), entonces la dinámica será de tipo decremental (incremental). El tercer dígito indica la zona de operación en la cual se encuentra el sistema, de acuerdo al valor que tomó la conductividad de salida del sistema en la iteración anterior.

En la TABLA 5-7 se ilustra la función de transferencia asociada a cada *tag*, y la figura respectiva donde se describe la dinámica de modelo asociado.

TABLA 5-7 Funciones de transferencia y tag asignado

Tag	Función de transferencia	Fig. referencial
111	$\frac{-0.0607}{112.7 \cdot s + 1} \cdot e^{-33.1}$	Fig. 5-9
121	$\frac{-0.0471}{80.4 \cdot s + 1} \cdot e^{-39.2}$	Fig. 5-16
112	$\frac{-0.0822}{97.9 \cdot s + 1} \cdot e^{-30.5}$	Fig. 5-10
122	$\frac{-0.0798}{78.6 \cdot s + 1} \cdot e^{-42.7}$	Fig. 5-15
113	$\frac{-0.0855}{92.3 \cdot s + 1} \cdot e^{-31.4}$	Fig. 5-11
123	$\frac{-0.1039}{62.7 \cdot s + 1} \cdot e^{-44.3}$	Fig. 5-14
114	$\frac{-0.1128}{119.3 \cdot s + 1} \cdot e^{-19.0}$	Fig. 5-12
124	$\frac{-0.1109}{107.0 \cdot s + 1} \cdot e^{-34.9}$	Fig. 5-13
211	$\frac{-0.0929}{70.7 \cdot s + 1} \cdot e^{-70.6}$	Fig. 5-25
221	$\frac{-0.0781}{45.6 \cdot s + 1} \cdot e^{-20}$	Fig. 5-32
212	$\frac{-0.1781}{71 \cdot s + 1} \cdot e^{-10.7}$	Fig. 5-26
222	$\frac{-0.1824}{59.5 \cdot s + 1} \cdot e^{-14}$	Fig. 5-31
213	$\frac{-0.2117}{71 \cdot s + 1} \cdot e^{-10.4}$	Fig. 5-27
223	$\frac{-0.2036}{54 \cdot s + 1} \cdot e^{-22.7}$	Fig. 5-30
214	$\frac{-0.1856}{68.2 \cdot s + 1} \cdot e^{-8.8}$	Fig. 5-28
224	$\frac{-0.2007}{74.3 \cdot s + 1} \cdot e^{-23.8}$	Fig. 5-29
311	$\frac{-0.0619}{36.2 \cdot s + 1} \cdot e^{-23.6}$	Fig. 5-41
321	$\frac{-0.0496}{39.4 \cdot s + 1} \cdot e^{-30.7}$	Fig. 5-48
312	$\frac{-0.1373}{46 \cdot s + 1} \cdot e^{-47.2}$	Fig. 5-42
322	$\frac{-0.1410}{41.9 \cdot s + 1} \cdot e^{-33.3}$	Fig. 5-47
313	$\frac{-0.1550}{46.7 \cdot s + 1} \cdot e^{-29.1}$	Fig. 5-43
323	$\frac{-0.1460}{54.8 \cdot s + 1} \cdot e^{-26.1}$	Fig. 5-46
314	$\frac{-0.1289}{30.6 \cdot s + 1} \cdot e^{-20.8}$	Fig. 5-44
324	$\frac{-0.1361}{55.2 \cdot s + 1} \cdot e^{-30.8}$	Fig. 5-45

Capítulo 6. Dimensionamiento del Sistema de Energización

6.1. Introducción

En este capítulo se determina la cantidad de paneles solares requeridos para alimentar la celda de electrodiálisis, y además se establece la capacidad de almacenamiento necesaria en el banco de baterías, aspecto fundamental para proveer autonomía suficiente al sistema ED en condiciones de baja irradiación. El desarrollo de este capítulo está basado en lo documentado en [12]. En la Fig. 6-1 se tiene un diagrama en bloques del sistema.

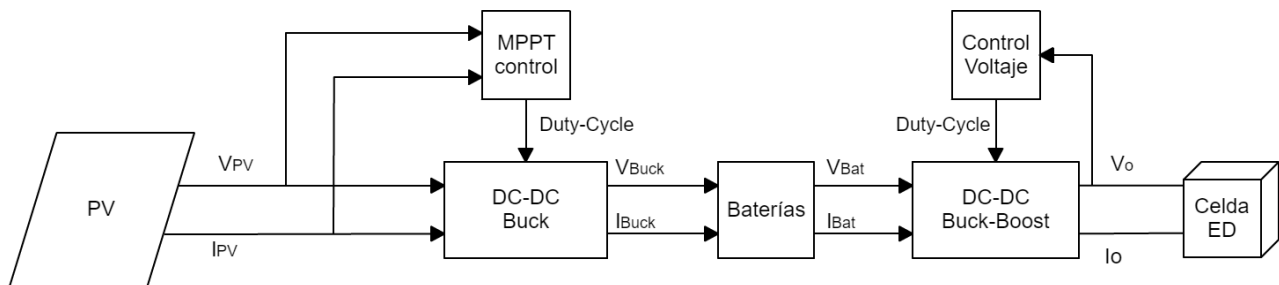


Fig. 6-1 Diagrama de bloques sistema energización

6.2. Capacidad de Banco de Baterías

Para estimar la capacidad requerida por el banco de baterías, se supone que la celda electrodiálizadora trabaja en condiciones rigurosas, esto es, filtrando agua con alta concentración salina, operando con magnitudes de tensión y corriente nominales, y con una baja eficiencia de remoción de minerales.

En primer lugar, se debe determinar el tiempo de funcionamiento de la celda ED. Se tiene que para una corriente de 5 A (Fig. A-1 – Anexo A.1) y un coeficiente de eficiencia del 85%, la unidad es capaz de remover aproximadamente 7 g/h de sal (Fig. A-4 – Anexo A.1). Luego, sabiendo que la concentración media de sal en el agua de mar es de 3500 mg/l [24], que el agua se considera potable para concentraciones salinas iguales o menores que 500 mg/l [3], y que además una persona necesita beber al menos tres litros de agua por día [3]; entonces:

$$t_{operación} = \frac{3500 - 500}{1000} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot \frac{1}{7} \left[\frac{h}{g} \right] \cdot 3[l] = 1.28 \text{ horas} \quad (6.1)$$

De (6.1) se obtiene que la unidad debe operar durante a lo menos 1 hora y 18 minutos por día para filtrar el agua requerida por una persona y satisfacer su consumo diario. Luego, como una vivienda chile tiene una media de 4 personas [25], entonces se concluye que la unidad electrodiadora deberá funcionar durante un tiempo mínimo de 5 horas y 7 minutos por día para satisfacer el requerimiento de ingesta hídrica diaria en una vivienda chilena promedio. Para propósitos de diseño se considera el valor aproximado de 6 horas de operación diarios.

La tensión de salida de las mismas se establece en 12 V según lo recomendado en [12], pues la celda consume como máximo solo 150 Wh de energía. Por otro lado, se determinó que el electrodiador debe funcionar durante 6 horas, por lo tanto, se consumirá una energía mínima diaria de 900 Wh. Así, la capacidad preliminar del banco de baterías, sin considerar pérdidas en el sistema, debe ser de:

$$\text{Capacidad Banco} = \frac{900 \text{ Wh}}{12} = 75 \text{ Ah} \quad (6.2)$$

Si se fija un periodo de autonomía de 2 días:

$$\text{Capacidad Banco} = 75 \text{ Ah} * 2 = 150 \text{ Ah} \quad (6.3)$$

Considerando un máximo DOD de 70% [12] se obtiene finalmente la capacidad requerida en el banco de baterías:

$$\text{Capacidad Banco} = \frac{150 \text{ Ah}}{0.7} = 214 \text{ Ah} \quad (6.4)$$

6.3. Tamaño del arreglo fotovoltaico

Para estimar la cantidad de módulos PV necesarios, se tienen en primer lugar los coeficientes de eficiencia en los distintos elementos del sistema de alimentación resumidos en la **TABLA 6-1**, de [12].

TABLA 6-1 Coeficientes de eficiencia del sistema PV

Coeficiente	Valor
Eficiencia transmisión	97 %
Eficiencia MPPT	95 %
Eficiencia baterías	80 %
Eficiencia total del sistema	74 %

Luego, considerando la eficiencia total del sistema y la energía diaria requerida por la unidad ED, se tiene la energía neta demandada al arreglo PV:

$$E_{pv} = \frac{900 \text{ Wh}}{0.74} = 1216 \text{ Wh} \quad (6.5)$$

Asumiendo mala condición de irradiación, se establece un valor de PSH igual a 5, y un factor de sobredimensión del 10%, como sugiere [12]. Así, se tiene la potencia peak requerida del arreglo PV:

$$P_{peak_pv} = \frac{1216 \text{ Wh}}{5 \text{ PSH}} \cdot 1.1 = 268 \text{ W}_p \quad (6.6)$$

Finalmente, como los paneles seleccionados para este proyecto entregan una potencia peak de 245 W (Fig. A-6 – Anexo A.2) se concluye que serán necesarios dos módulos para energizar la unidad ED. Notar que a simple vista parece bastar con utilizar solo un módulo, disminuyendo los costos de implementación, sin embargo, debe considerarse el hecho de que en este proyecto solo se estudia la alimentación de la unidad de ED. En la práctica, el sistema también deberá energizar bombas hidráulicas, controladores, sensores, y todos los dispositivos eléctricos requeridos para el control del proceso desalinizador. Por lo tanto, se estima que la utilización de dos módulos es adecuado a la realidad.



Capítulo 7. Etapas de Sistema de Energización PV

7.1. Introducción

En este capítulo se expone el proceso de generación del modelo matemático del arreglo fotovoltaico, y el diseño/simulación del sistema de energización PV, abarcando cada etapa del mismo de forma independiente, para luego revisar y corregir desde una perspectiva global del sistema. También se abordan los criterios de selección, diseño y sintonización del control respectivo a los convertidores.

7.2. Módulo Fotovoltaico

7.2.1 Modelo Matemático

Para estudiar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos en distintas condiciones de temperatura y radiación, se desarrolló un modelo matemático basado en el modelo de un sólo diodo [17] mostrado en la Fig. 7-1.

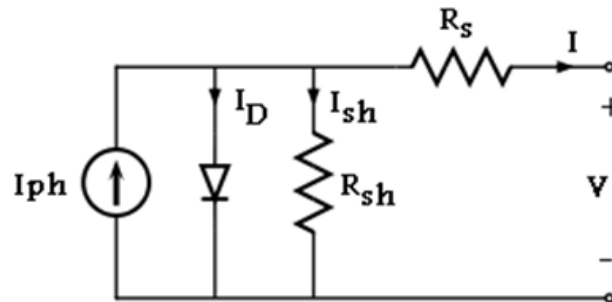


Fig. 7-1 Modelo diodo único de celda PV

La relación voltaje-corriente del módulo PV se puede establecer de acuerdo a la ley de corriente de Kirchhoff's [11] como sigue:

$$I = I_{ph} - I_o \left\{ e^{\frac{V+IR_s}{n_s V_t}} - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (7.1)$$

donde,

- I : corriente de salida del módulo,
- I_{ph} : corriente foto-generada para STC,
- I_o : corriente de saturación del diodo (en oscuridad) para STC,
- 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, y
 n_s : número de celdas en serie dentro del módulo.

Además, el voltaje termal del diodo (voltaje de saturación) se relaciona con la temperatura de juntura según la relación dada por [17]:

$$V_t = \frac{kTA}{q} \quad (7.2)$$

donde,

- k : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K),
 T : temperatura de juntura en °K,
 A : factor de calidad del diodo, y
 q : carga del electrón ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

El modelo mostrado en (7.1) tiene cinco parámetros desconocidos: I_{ph} , I_o , V_t , R_s y R_{sh} . Luego, el objetivo en la modelación del módulo PV es estimar dichos parámetros bajo STC y bajo condiciones ambientales variables en términos de radiación y temperatura. Para ello se considera la información especificada en el *datasheet* que provee el fabricante del módulo FVG 245M-MC (Anexo A, Fig. A-6) resumidos en la **TABLA 7-1**.

TABLA 7-1 Parámetros de módulo PV en STC.

Parámetro	Valor
P_{mp} (potencia peak)	245 W
V_{mp} (voltaje en punto de MP)	30.80 V
V_{oc} (voltaje en circuito abierto)	37.75 V
I_{mp} (corriente en punto de MP)	7.97 A
I_{sc} (corriente de cortocircuito)	8.48 A
k_i (coeficiente de temperatura de I_{sc})	0.05 %/°C
k_v (coeficiente de temperatura de V_{oc})	-0.34 %/°C
T_{stc} (temperatura de STC)	25 °C
G_{stc} (irradiación de STC)	1000 W/m ²

Para la obtención de parámetros, se consideran los puntos: $(0, I_{sc})$, (V_{mp}, I_{mp}) , y $(V_{oc}, 0)$. Luego, en (7.1) se considera que el término “-1” es despreciable, pues el término exponencial es mucho mayor que 1. Así, considerando lo mencionado y reemplazando según los puntos dados, de (7.1) se encuentran:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \cdot e^{\frac{I_{sc}R_s}{n_s V_t}} - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (7.3)$$

$$I_{mp} = I_{ph} - I_o \cdot e^{\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{n_s V_t}} - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} \quad (7.4)$$

$$I_{oc} = 0 = I_{ph} - I_o \cdot e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_t}} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (7.5)$$

donde,

I_{sc} : corriente de cortocircuito en STC,

V_{oc} : voltaje de circuito abierto en STC,

V_{mp} : voltaje en el punto MP en STC,

I_{mp} : corriente en el punto MP en STC,

P_{mp} : potencia en el punto MP en STC,

k_i : coeficiente de temperatura de la corriente de corto-circuito, y

k_v : coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto.

Luego, se realiza el cambio de variables mostrado en la **TABLA 7-2**, de manera que se simplifica la notación e implementación en código.

TABLA 7-2 Cambio de variables.

Parámetro anterior	Nuevo parámetro	Descripción
Valores de datasheet		
I_{sc}	a_1	Corriente de cortocircuito
V_{oc}	a_2	Voltaje de circuito abierto
V_{mp}	a_3	Voltaje en punto de MP
I_{mp}	a_4	Corriente en punto de MP
n_s	a_5	Número de celdas en serie dentro un módulo
Parámetros desconocidos		
I_{ph}	x_1	Corriente foto-generada
I_o	x_2	Corriente de saturación (en oscuridad)
V_t	x_3	Voltaje de juntura
R_s	x_4	Resistencia en serie del modelo
R_{sh}	x_5	Resistencia en paralelo del modelo
Valores de salida del módulo PV		
I	y_1	Corriente de salida
V	y_2	Voltaje de salida
P	y_3	Potencia de salida

Para encontrar cada parámetro del modelo en STC, se procede según el método mostrado en [17] obteniéndose:

$$y_1 = x_1 - x_2 \cdot e^{\frac{y_2 + y_1 x_4}{a_5 x_3}} - \frac{y_2 + y_1 x_4}{x_5} \quad (7.6)$$

$$x_1 = x_2 \cdot e^{\frac{a_2}{a_5 x_3}} + \frac{a_2}{x_5} \quad (7.7)$$

$$x_2 = \left(a_1 - \frac{a_2 - a_1 x_4}{x_5} \right) \cdot e^{-\frac{a_2}{a_5 x_3}} \quad (7.8)$$

$$x_3 = \frac{a_4 x_4 + a_3 - a_2}{a_5 \cdot \ln \left\{ \frac{(a_1 - a_4)(x_4 + x_5) - a_3}{a_1 \cdot (x_4 + x_5) - a_2} \right\}} \quad (7.9)$$

$$x_4 = \frac{a_2 - a_3 + a_5 x_3 \cdot \ln \left\{ \frac{a_5 x_3 \cdot (a_4 x_4 + a_4 x_5 - a_3)}{a_1 x_4 a_3 + a_1 x_5 a_3 + a_4 a_2 x_4 - a_4 a_1 x_4^2 - a_4 a_1 x_5 x_4 - a_3 a_2} \right\}}{a_4} \quad (7.10)$$

$$x_5 = \frac{a_5 x_3 x_4 + a_5 x_3 x_5 + x_4 \cdot e^{\frac{a_1 x_4 - a_2}{a_5 x_3}} \cdot (a_1 x_4 + a_1 x_5 - a_2)}{a_5 x_3 + x_4 \cdot e^{\frac{a_1 x_4 - a_2}{a_5 x_3}} \cdot (a_1 x_4 + a_1 x_5 - a_2)} \quad (7.11)$$

Es evidente la no-linealidad de las ecuaciones (7.6) a (7.11). Por lo tanto, para la resolución de (7.6) se utiliza el algoritmo de aproximación numérica de Newton-Raphson. Se escoge dicho algoritmo en particular porque, al desarrollar la simulación, se requiere calcular y_l en cada paso, y el método de Newton-Raphson converge en muy pocas iteraciones, reduciendo así la carga computacional del modelo. En el caso de las ecuaciones (7.7) a (7.11) se utiliza el método de Gauss-Seidel, sugerido por ser un método simple en términos de programación y su baja carga computacional [16]. En el Anexo D.1 se observa el código donde se implementa el método de Newton-Raphson, mientras que en el Anexo D.2 ilustra el código donde se implementa el método de Gauss-Seidel.

Luego, es necesario ampliar el modelo para condiciones variables de irradiación y temperatura. Se considera que las corrientes de corto-circuito y foto-generada tienen dependencia directamente proporcional con la irradiación [18]. Volviendo a las variables originales, se presenta la dependencia como sigue:

$$\begin{aligned} I_{sc}(G) &= I_{sc} \cdot G \\ I_{ph}(G) &= I_{ph} \cdot G \end{aligned} \quad (7.12)$$

donde,

G : irradiación (en W/m^2),

$I_{sc}(G)$: corriente de corto-circuito en función de G , y

$I_{ph}(G)$: corriente foto-generada en función de G .

Para incluir la dependencia de la irradiación en la ecuación de V_{oc} , el voltaje de circuito abierto puede ser expresado a partir de (7.5) [18]:

$$V_{oc}(G) = \ln \left\{ \frac{I_{ph}(G)R_{sh} - V_{oc}(G)}{I_o R_{sh}} \right\} \cdot n_s V_t \quad (7.13)$$

La ecuación (7.13) debe ser resuelta mediante método numérico. Se decide utilizar el método de Newton-Raphson, pues para la ecuación en particular, el método converge a la solución en muy pocas iteraciones, tomando como condición inicial V_{oc} en STC. Por otro lado, V_{oc} tiene dependencia lineal con la temperatura [18]:

$$V_{oc}(T) = V_{oc} \left(1 + \frac{k_v}{100} (T - T_{stc}) \right) \quad (7.14)$$

donde,

T : temperatura en °C, y

T_{stc} : temperatura en °C para STC (dato de fabricante).

De igual forma, la corriente de corto-circuito del módulo PV depende linealmente de la temperatura [18]:

$$I_{sc}(T) = I_{sc} \left(1 + \frac{k_i}{100} (T - T_{stc}) \right) \quad (7.15)$$

Para la corriente de saturación del diodo en oscuridad, se sigue de acuerdo al método propuesto en [18], que sugiere la inclusión de los efectos de temperatura sobre la misma de forma similar a los efectos de la temperatura sobre I_{ph} , obteniéndose:

$$I_o(T) = \left(I_{sc}(T) - \frac{V_{oc}(T) - I_{sc}(T)R_s}{R_{sh}} \right) \cdot e^{-\frac{V_{oc}(T)}{n_s V_t}} \quad (7.16)$$

El trabajo [18] muestra la expresión de la corriente foto-generada en función de la temperatura como sigue:

$$I_{ph}(T) = I_o(T) e^{\frac{V_{oc}(T)}{n_s V_t}} + \frac{V_{oc}(T)}{R_{sh}} \quad (7.17)$$

Tomando el valor de V_{oc} obtenido en (7.13) y reemplazando en (7.14), se obtiene V_{oc} en función de temperatura e irradiación:

$$V_{oc}(T, G) = V_{oc}(G) \cdot \left(1 + \frac{k_v}{100} (T - T_{stc}) \right) \quad (7.18)$$

Considerando (7.12) en (7.15):

$$I_{sc}(T, G) = I_{sc}(G) \cdot \left(1 + \frac{k_i}{100} (T - T_{stc}) \right) \quad (7.19)$$

Luego, de (7.18) y (7.19) en (7.16):

$$I_o(T, G) = \left(I_{sc}(T, G) - \frac{V_{oc}(T, G) - I_{sc}(T, G)R_s}{R_{sh}} \right) \cdot e^{-\frac{V_{oc}(T, G)}{n_s V_t}} \quad (7.20)$$

Finalmente, de (7.18) y (7.20) en (7.17):

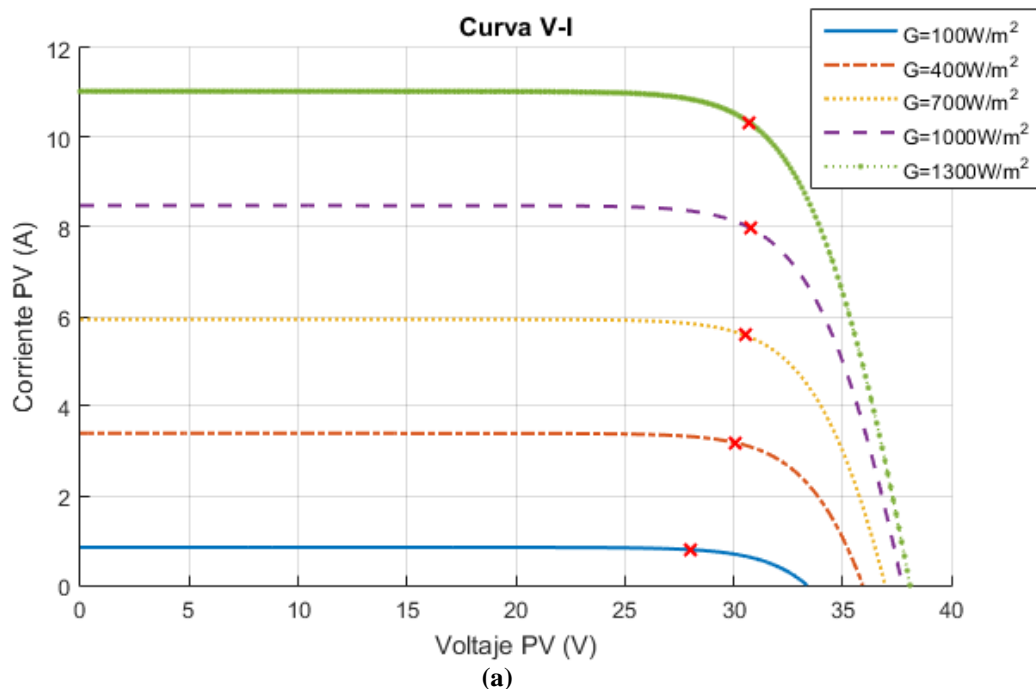
$$I_{ph}(T, G) = I_o(T, G) e^{\frac{V_{oc}(T, G)}{n_s V_t}} + \frac{V_{oc}(T, G)}{R_{sh}} \quad (7.21)$$

Así entonces, de lo hallado en (7.6) a (7.11), y además de (7.18) a (7.21); se obtiene el modelo del módulo solar para cualquier condición de irradiación y temperatura.

En el Anexo A se observa la implementación del modelo obtenido en Matlab para obtener las curvas V-I que caracterizan el módulo. En el Anexo E.1 se implementa el modelo en Simulink, pero esta vez para obtener el comportamiento del módulo fotovoltaico implementado en el sistema total.

7.2.2 Curvas Características

A continuación, se muestran las curvas obtenidas de acuerdo al estudio desarrollado en el capítulo 7.2.1. Se utilizan los datos otorgados por el fabricante, previamente resumidos en la TABLA 7-1.



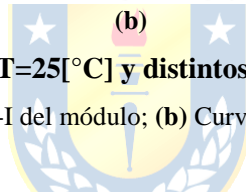
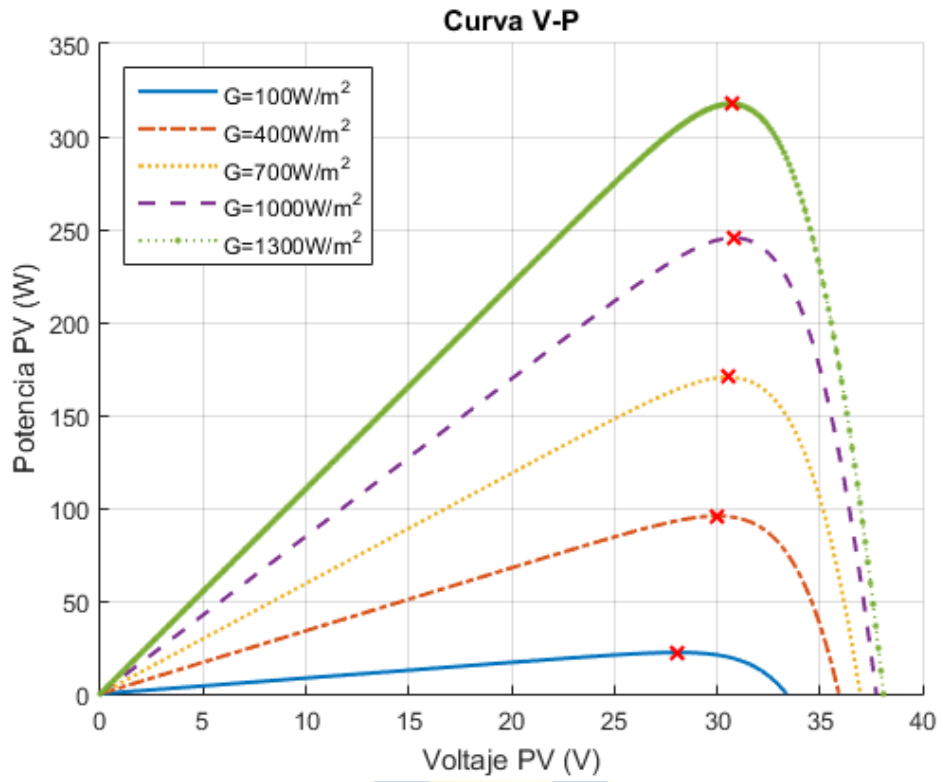
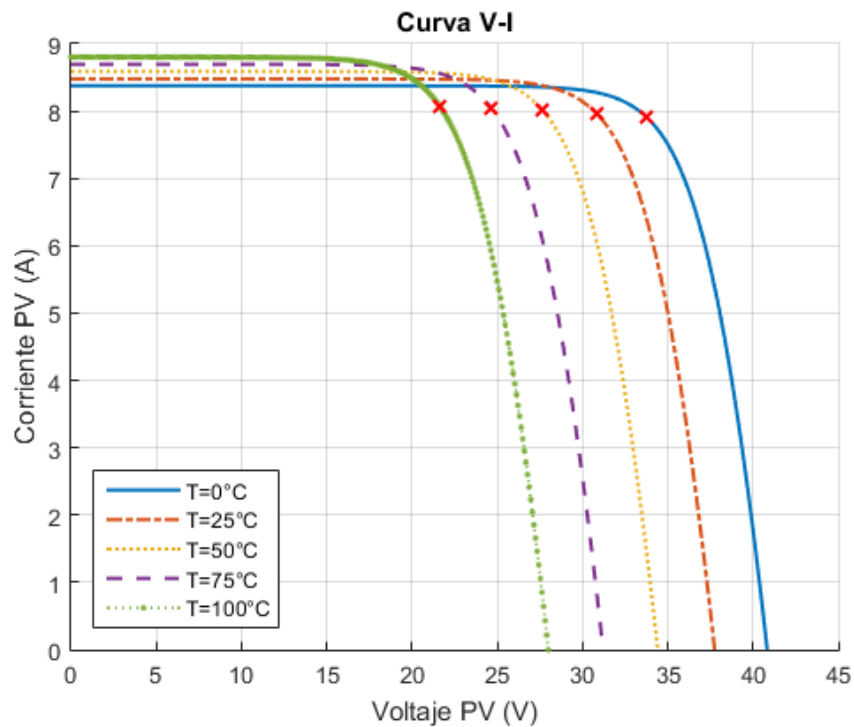


Fig. 7-2 Curvas para T=25[°C] y distintos niveles de irradiación

(a) Curva V-I del módulo; (b) Curva V-P del módulo.



(a)

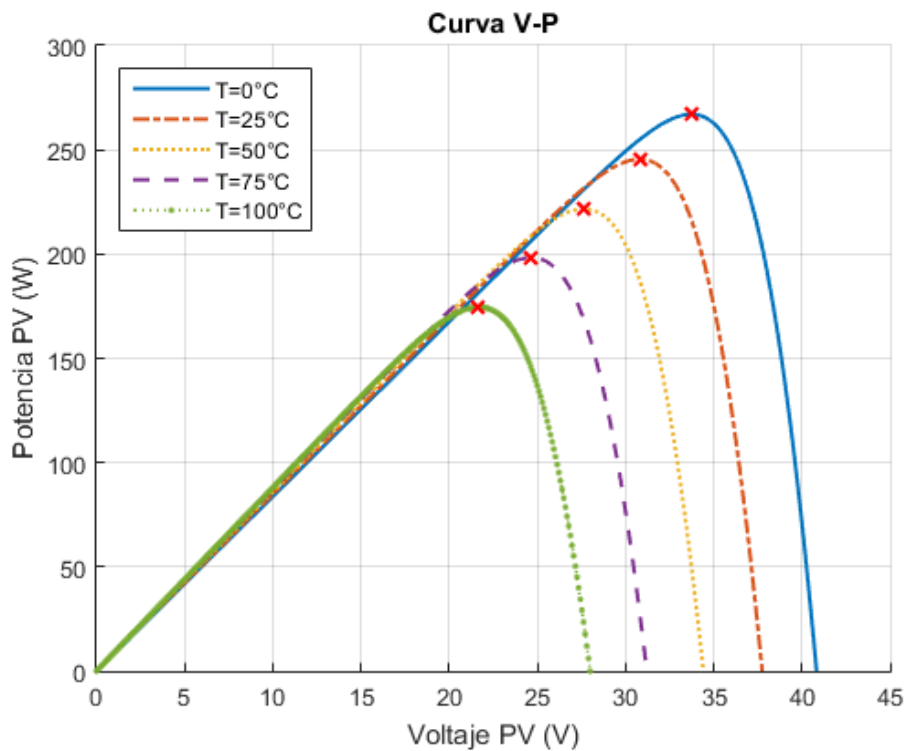


Fig. 7-3 Curvas para $G = 1000[\text{W}/\text{m}^2]$ y temperatura variable

(a) Curva V-I del módulo; (b) Curva V-P del módulo.

De la Fig. 7-2, es importante notar que la variación en las condiciones de irradiación, implican principalmente un cambio en la corriente de salida del módulo, y por lo tanto en la potencia. En particular, un aumento en la radiación implica un aumento en la corriente (y entonces, potencia) de salida. Sin embargo, no hay que descartar la influencia de la irradiación sobre el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), pues es apreciable que, para incrementos en la irradiación, se evidencia un aumento en V_{oc} .

De la Fig. 7-3 se observa que variaciones de temperatura producen un cambio sobre el rango de voltaje para el cual la corriente del módulo es máxima, considerando como se indica, una magnitud constante de irradiación. Así, para incrementos de temperatura se produce un decremento en la potencia máxima del módulo. También existe una pequeña influencia sobre la corriente por parte de la temperatura, siendo ésta mayor para valores más altos de temperatura.

Por otro lado, en ambas figuras se aprecia que en STC, es decir, para $T=25^\circ\text{C}$ y $G=1000 \text{ W}/\text{m}^2$, la máxima potencia de salida del módulo es aproximadamente 245 W, valor que concuerda con lo establecido como nominal según el fabricante.

7.3. Convertidor Buck

7.3.1 Diseño del Convertidor

La topología del convertidor Buck utilizada para el diseño del mismo, se expone en la Fig. 7-4.

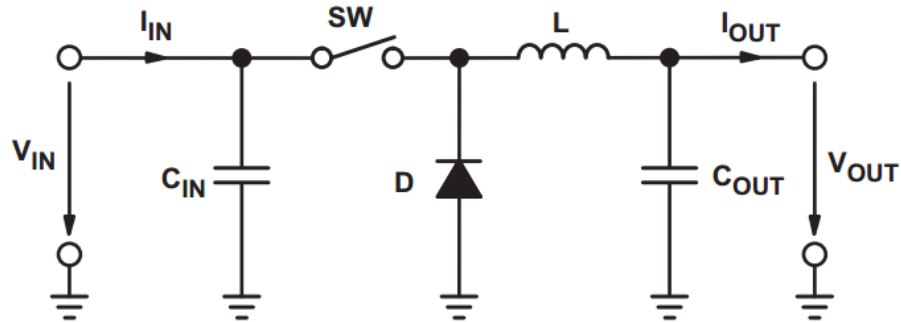


Fig. 7-4 Diagrama circuito convertidor Buck

En este trabajo no se considera capacitor de salida, pues habrá un banco de baterías que impone V_{out} de acuerdo al SOC de las mismas. Luego, el convertidor trabajará con un duty cycle determinado por el controlador MPPT (Anexo E.3) de modo que se absorba la mayor cantidad de energía solar. Se establecen los parámetros de diseño del convertidor en la TABLA 7-3.

TABLA 7-3 Parámetros de diseño convertidor Buck

Parámetro	Valor
$V_{in(max)}$ (voltaje máximo de entrada al convertidor)	61.61 V
$V_{in(min)}$ (voltaje mínimo de entrada al convertidor)	55 V
$V_{out(max)}$ (voltaje máximo de salida del convertidor)	13 V
$V_{out(min)}$ (voltaje mínimo de salida del convertidor)	11.5 V
$I_{out(max)}$ (corriente máxima de salida del convertidor)	51.13 A
f_s (frecuencia de conmutación de switch del convertidor)	35 kHz
$V_{pp(max)}$ (ripple de voltaje peak-to-peak máximo en la entrada del convertidor)	100 mV
ΔI_L (Ripple de corriente)	0.3835 A
η (Factor de eficiencia convertidor)	0.9

A partir de [13] y [14] se obtienen las ecuaciones de diseño del convertidor.

Para el duty cycle:

$$D_{max} = \frac{V_{out(max)}}{V_{in(min)} \cdot \eta} = 0.2626 \quad (7.22)$$

$$D_{min} = \frac{V_{out(min)}}{V_{in(max)} \cdot \eta} = 0.2074 \quad (7.23)$$

Para el caso del inductor, hay cuatro posibilidades de acuerdo a las combinaciones posibles de voltajes de salida-entrada mínimos y máximos, obteniéndose:

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{V_{out(min)} \cdot (V_{in(min)} - V_{out(min)})}{\Delta I_L f_s V_{in(min)}} = 677.66 \mu H \\ L_2 &= \frac{V_{out(max)} \cdot (V_{in(min)} - V_{out(max)})}{\Delta I_L f_s V_{in(min)}} = 739.64 \mu H \\ L_3 &= \frac{V_{out(min)} \cdot (V_{in(max)} - V_{out(min)})}{\Delta I_L f_s V_{in(max)}} = 696.89 \mu H \\ L_4 &= \frac{V_{out(max)} \cdot (V_{in(max)} - V_{out(max)})}{\Delta I_L f_s V_{in(max)}} = 764.20 \mu H \end{aligned} \quad (7.24)$$

De (7.24), se escoge L_4 por ser el máximo valor de inductancia. De este modo se disminuye la probabilidad de que el convertidor trabaje en DCM, condición no deseada [13].

Para el condensador de entrada al convertidor:

$$C_{in} = \frac{I_{out(max)} D_{max} (1 - D_{max}) 1000}{f_s \cdot V_{pp(max)}} = 56.58 \mu F \quad (7.25)$$

7.3.2 Algoritmo MPPT

Para el control de voltaje del controlador, se decidió utilizar el algoritmo MPPT del tipo P&O por su facilidad de implementación, baja carga computacional asociada y la efectividad del mismo para determinar el máximo punto de voltaje del módulo fotovoltaico [11]. Además, el método no depende del tipo de panel, puede ser implementada para circuitos análogos o digitales y no requiere de sintonización periódica [11].

El principio del MPPT P&O es verificar la pendiente de potencia dP/dV , siendo ésta positiva estando a la izquierda del MPP y negativa estando a la derecha del mismo [11]. Matemáticamente se resume de acuerdo a (7.26):

$$\frac{dP}{dV} = \begin{cases} > 0, & \text{si } V < V_{mpp} \\ = 0, & \text{si } V = V_{mpp} \\ < 0, & \text{si } V > V_{mpp} \end{cases} \quad (7.26)$$

La Fig. 3.8 ilustra el algoritmo MPPT (P&O). Primero, se miden los valores de voltaje y corriente en la iteración actual, para luego calcular la potencia, luego se compara cada parámetro con su respectivo valor en la iteración anterior. Según la variación de los parámetros dP y dV sea negativa o positiva, entonces D incrementa o decrementa, según sea el caso, en una fracción ΔD . Este factor incremental debe ser sintonizado y adecuado según lo requiera la aplicación en estudio [11].

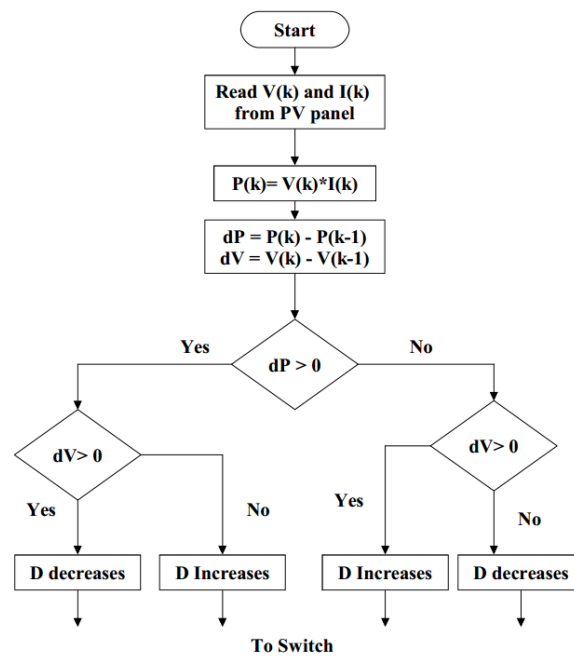


Fig. 7-5 Diagrama de flujo del controlador MPPT (P&O)

La eficiencia de la técnica MPPT puede ser calculada según la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_{PV}}{P_{mppt}} * 100 \quad (7.27)$$

donde,

η : factor de eficiencia,

P_{pv} : potencia de salida del módulo PV, y

P_{mppt} : potencia de salida del convertidor que implementa MPPT.

En el Anexo E.3 se observa el bloque de Simulink donde se implementa el algoritmo MPPT y el código respectivo.

7.3.3 Banco de Baterías

Como se apuntó en las limitaciones de este proyecto, para la simulación de baterías se ocupará el modelo genérico que incorpora Matlab en las librerías de Simulink. En particular el modelo de baterías de plomo-ácido que son las más frecuentes en sistemas fotovoltaicos [12].

Para ilustrar de forma superficial el fundamento matemático del modelo, se presenta el circuito equivalente de la batería (Fig. 7-6), y las expresiones de descarga y carga de las baterías, de acuerdo la documentación contenida en [26].

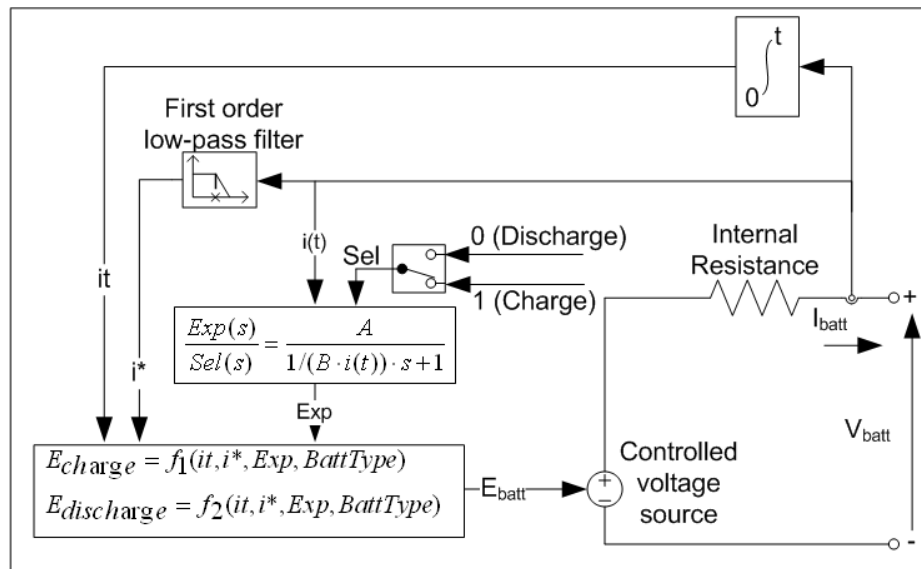


Fig. 7-6 Circuito equivalente de batería [26]

Se tiene el modelo de descarga, cuando $i^* > 0$:

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot (i^* - k) \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (7.28)$$

Y el modelo de carga, cuando $i^* < 0$:

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + (0.1 \cdot Q)} \cdot (i^* - k) \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (7.29)$$

donde,

E_{batt} : Voltaje no lineal de la batería (V),

E_0 : Constante de voltaje (V),

$Exp(s)$: Dinámicas de voltaje en la zona exponencial (V),

$Sel(s)$: Representa el modo de funcionamiento de la batería. Tiene valor 0 durante la descarga, y valor 1 durante la carga.

K : Constante de polarización (Ah^{-1}),

i^* : Corriente de la batería (A),

- i_t : Capacidad extraída de la batería (Ah),
 Q : Capacidad máxima de la batería (Ah),
 A : Voltaje exponencial (V), y
 B : Capacidad exponencial (Ah⁻¹).

Luego, de acuerdo a lo calculado en el capítulo 6.2, se tienen los parámetros del modelo de la batería ingresados al bloque mediante la interfaz mostrada en la Fig. 7-7.

Fig. 7-7 Ventana de ingreso de parámetros modelo batería

Notar que se fija el estado inicial de carga en 80% para simular de forma aproximada las dinámicas de carga y descarga de la batería. Sin embargo, las simulaciones están fijadas para un pequeño lapso de tiempo (2.7 segundos), por lo tanto, las variaciones en el estado de carga serán muy pequeñas. Luego, a partir de los valores ingresados de voltaje nominal, capacidad de la batería y SOC inicial; el modelo identifica el resto de parámetros necesarios para describir el comportamiento de la batería. En la Fig. 7-8 se muestran las curvas características típicas de salida del modelo, siendo de importancia las curvas *Lead-Acid* (plomo-ácido).

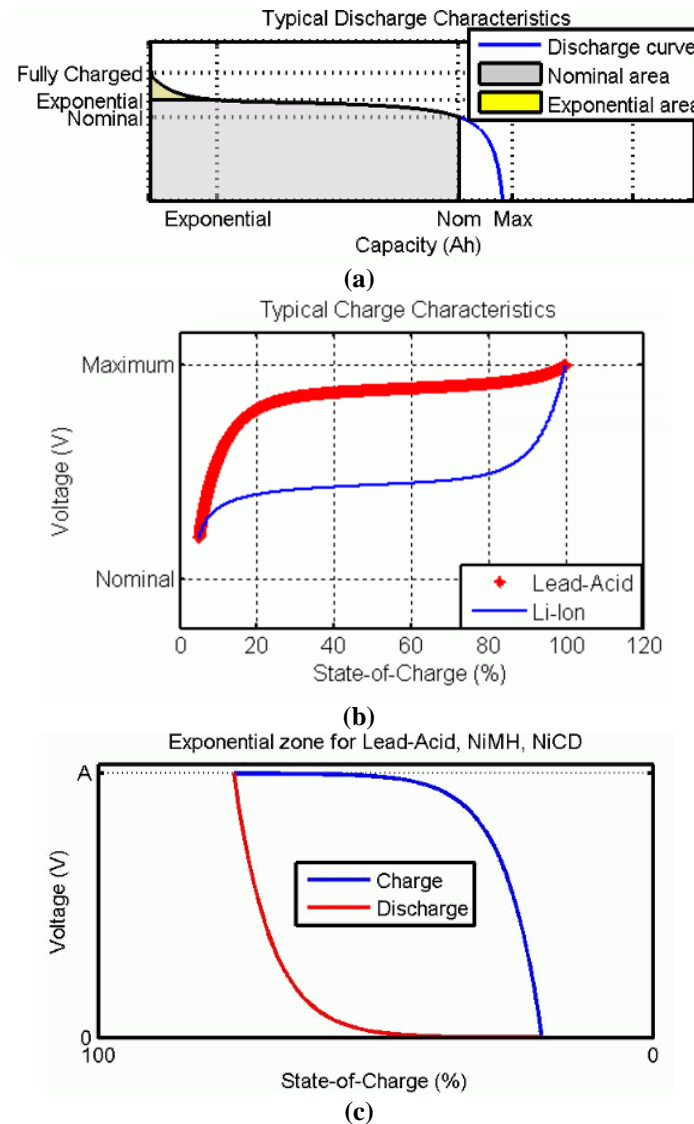


Fig. 7-8 Curvas características típicas de carga y descarga para el modelo de baterías [26]

(a) Características de descarga típicas; (b) Características de carga típicas; (c) Zona exponencial para baterías de plomo-ácido, Ion Litio y Níquel-Cadmio.

En la Fig. 7-8 (a), la sección superior representa la caída exponencial de voltaje cuando la batería está cargada. Dependiendo del tipo de batería, el área es más o menos amplia. La segunda sección, más abajo, representa la carga que puede ser extraída de la batería hasta que el voltaje caiga bajo la tensión nominal. La tercera sección representa la descarga total de la batería, momento en el que el voltaje de la misma cae rápidamente. Cuando la curva de corriente en la batería es negativa, la carga estará descrita por la curva presentada en (b).

Finalmente, en las ecuaciones (7.28) y (7.29), el término $Exp(s)$ representa la histéresis para los tipos de baterías según muestra la Fig. 7-8 (c).

7.4. Convertidor Buck-Boost

7.4.1 Diseño del Convertidor

El esquema del convertidor utilizado durante el diseño se muestra en la Fig. 7-9. Como se observa, la topología es del tipo Buck-Boost con doble switch. El convertidor operará en modo Buck (Boost) cuando la tensión requerida en la salida sea inferior (superior) a la tensión de entrada al convertidor.

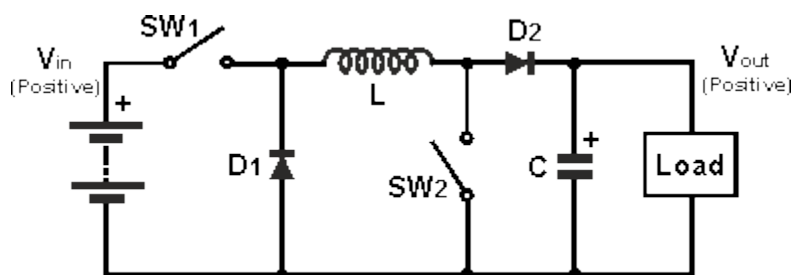


Fig. 7-9 Diagrama convertidor Buck-Boost

Se tienen los parámetros de diseño del convertidor en la TABLA 7-4.

TABLA 7-4 Parámetros diseño Buck-Boost

Parámetro	Valor
f_s (frecuencia conmutación switch)	2.5 kHz
ΔI_L (ripple de corriente)	0.1 A
$V_{pp(max)}$ (ripple de voltaje peak-to-peak máximo en la salida del convertidor)	50 mV
I_{out} (corriente nominal de salida)	5.33 A
K_{ind} (factor de ripple de corriente)	2 %
η (Factor de eficiencia convertidor)	0.9
$V_{in(min)}$ (voltaje mínimo de entrada)	11 V
$V_{in(max)}$ (voltaje máximo de entrada)	13.5 V
Modo Buck	
$V_{out(min)}$ (voltaje mínimo de salida)	0 V
$V_{out(max)}$ (voltaje máximo de salida)	11 V
Modo Boost	
$V_{out(min)}$ (voltaje mínimo de salida)	11 V
$V_{out(max)}$ (voltaje máximo de salida)	20 V

Luego, de [15] y con los datos de la **TABLA 7-4**, se tiene para el modo Buck:

$$D_{buck} = \frac{V_{out}}{V_{in} \cdot \eta} \quad (7.30)$$

Por lo tanto,

$$D_{buck(max)} = \frac{V_{out(max)}}{V_{in(min)} \cdot \eta} = 0.91 \quad (7.31)$$

Además, para los valores de inductor y capacitor en modo Buck, de [15]:

$$L_{min} = \frac{V_{out(max)} \cdot (V_{in(max)} - V_{out(max)})}{K_{ind} \cdot f_s \cdot V_{in(max)} \cdot I_{out}} = 7644 \mu H \quad (7.32)$$

$$C_{out(min)} = \frac{K_{ind} \cdot I_{out}}{8 \cdot f_s \cdot \Delta V_{pp(max)}} = 106.6 \mu F \quad (7.33)$$

En el caso de modo Boost, de [15]:

$$D_{Boost} = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \cdot \eta \quad (7.34)$$

Luego,

$$D_{boost(max)} = 0.570 \quad (7.35)$$

Para los valores de inductor y capacitor en modo Boost, según [15]:

$$L_{min} = \frac{V_{in(min)}^2 \cdot (V_{out(max)} - V_{in(min)})}{f_s \cdot K_{ind} \cdot I_{out} \cdot V_{out(max)}^2} = 9547 \mu H \quad (7.36)$$

$$C_{out(min)} = \frac{I_{out(max)} \cdot D_{boost(max)}}{f_s \cdot \Delta V_{pp(max)}} = 26200 \mu H \quad (7.37)$$

Así, de [15] se tiene que deben utilizarse los mayores valores encontrados para el inductor y capacitor, de forma que se obtenga el ripple fijado y se garantice la operación en CCM. Finalmente, se utiliza lo calculado en (7.36) y (7.37).

7.4.2 Control del Convertidor

A. Criterios de diseño

Al diseñar el controlador de voltaje del convertidor en estudio, se escoge el controlador de tipo PI por su fácil implementación y sintonización, además de resultar efectivo para este tipo de aplicación [20].

Por otro lado, en cuanto a las dinámicas eléctricas, debe tenerse en consideración la corriente de salida corriente del sistema, por cuanto magnitudes de corriente mayores al máximo especificado por el fabricante, y sostenidas por largos periodos de tiempo, podrían provocar electrólisis de agua, precipitados de sales dentro de la celda ED, o *fouling* (acumulación de sólidos en las capas de la membrana de intercambio, reduciendo su permeabilidad iónica) [5], estos casos son especialmente probables para baja resistencia eléctrica a la salida del convertidor [11]. Luego, de acuerdo a la información recopilada durante el análisis eléctrico de la celda, se obtuvo la menor resistencia para la solución de 40 mS/cm, con un valor de 3.92Ω .

Así, se considera este valor de resistencia para realizar una aproximación lineal del convertidor y así diseñar, y sintonizar el controlador. Para la implementación en Simulink, se usa el bloque PID, presente en las librerías del software. Luego, dado que el convertidor opera en modo Buck o Boost según si la referencia de voltaje de salida es menor o mayor que el voltaje de entrada al convertidor, entonces se diseña un controlador para cada modo de operación.

Primero se diseña el controlador para el convertidor en modo Buck. En la Fig. 7-10 se ilustra el modelo del circuito para cada estado del switch.

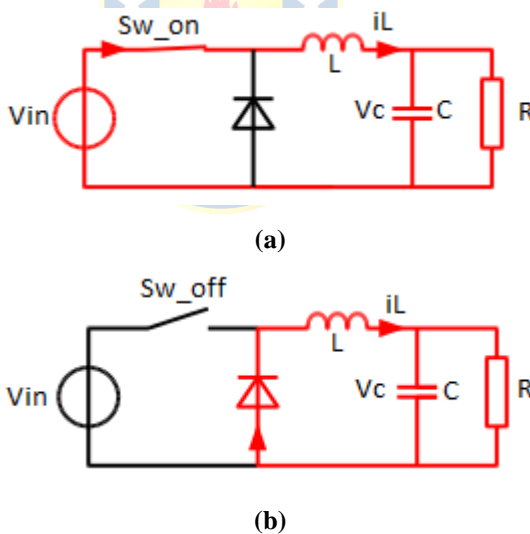


Fig. 7-10 Circuito equivalente convertidor en modo Buck

(a) Switch en on; (b) Switch en off.

Luego, a partir Fig. 7-10 se tienen las ecuaciones en espacio de estados para switch encendido [19]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{on} = A_{on} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + B_{on} \cdot V_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ 1 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{in} \quad (7.38)$$

Y para switch apagado [19]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{off} = A_{off} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + B_{off} \cdot V_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ 1 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{in} \quad (7.39)$$

Se observa que $A_{on} = A_{off}$. Así, se tiene el modelo promedio [19]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{on} + (1 - D) \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{off} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ 1 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D \quad (7.40)$$

$$y = V_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix}$$

Luego, del modelo promedio encontrado en (7.40), de los componentes del convertidor encontrados en (7.36) y (7.37), y de la carga de 3.92Ω , se obtiene la función de transferencia del convertidor:

$$H_{buck}(s) = \frac{V_{out}(s)}{D(s)} = \frac{5.197 \cdot 10^4}{s^2 + 9.737 \cdot s + 3998} \quad (7.41)$$

Notar que en (7.40) y (7.41), D es a la entrada al sistema. Luego, para sintonizar el controlador, se utiliza la herramienta *PID tuner*, encontrándose los parámetros del controlador a partir de la función de transferencia encontrada en (7.41). Así se obtienen los parámetros indicados en la **TABLA 7-6**

En el caso del modo Boost, se tiene el circuito equivalente para cada estado del switch mostrado en la Fig. 7-11.

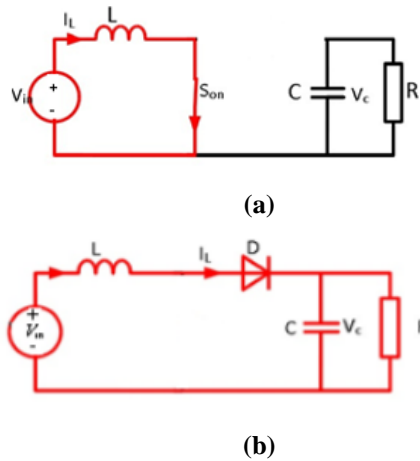


Fig. 7-11 Circuito equivalente convertidor en modo Boost

(a) switch en on; (b) switch en off.

Luego, a partir de la Fig. 7-11 se tienen las ecuaciones en espacio de estados para switch encendido [20]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{on} = A_{on} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + B_{on} \cdot V_{in} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{in} \quad (7.42)$$

Y para switch apagado [20]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{off} = A_{off} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + B_{off} \cdot V_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{in} \quad (7.43)$$

Luego, se tiene el modelo promedio dado por:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{on} + (1-D) \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}_{off} \quad (7.44)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \cdot d + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \cdot D + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

De (7.44) se observa la no-linealidad del convertidor Boost. Por lo tanto, se procede linealizando el modelo para determinado punto de operación [19]. Así, usando el modelo de aproximación lineal, se obtiene la función de transferencia que relaciona cambios en el voltaje de salida y duty cycle como sigue:

$$H_{boost}(s) = \frac{V_{out}}{D'} \cdot \frac{1 - s \cdot \left(\frac{L \cdot i_L}{D' \cdot V_{out}} \right)}{\frac{C \cdot L}{D'^2} \cdot s^2 + \frac{L}{R \cdot D'^2} \cdot s + 1} \quad (7.45)$$

donde,

D : duty cycle, y

D' : 1 – D.

Dada la no-linealidad del sistema, se decide diseñar el controlador implementando la técnica de *Gain Scheduler*. Es decir, los parámetros del controlador PI serán ajustados de acuerdo a al punto de operación del convertidor. En la **TABLA 7-5** se resumen los parámetros para cada zona de operación, y la función de transferencia respectiva, calculada según los valores de los elementos del convertidor especificados en el capítulo anterior.

TABLA 7-5 Zonas de operación convertidor en modo Boost

Zona	i_L (A)	D	V_{out} (V)	H_{boost}
Z_1	3.58	0.1	14.05	$H_{boost_1}(s) = \frac{-0.02357 \cdot s + 15.61}{0.0002779 \cdot s^2 + 0.003007 \cdot s + 1}$
Z_2	4.16	0.25	16.32	$H_{boost_2}(s) = \frac{-0.03955 \cdot s + 21.76}{0.0003335 \cdot s^2 + 0.00433 \cdot s + 1}$
Z_3	4.96	0.375	19.43	$H_{boost_3}(s) = \frac{-0.06782 \cdot s + 31.09}{0.0004002 \cdot s^2 + 0.006235 \cdot s + 1}$
Z_4	6.03	0.5	23.64	$H_{boost_4}(s) = \frac{-0.1289 s + 47.28}{0.0005003 \cdot s^2 + 0.009742 \cdot s + 1}$

B. Sintonización del Controlador

Para el controlador en modo Boost, se ingresa cada una de las funciones de transferencia mostradas en la TABLA 7-5 al bloque PID de Simulink, y luego se realiza la sintonización. Como se mencionó anteriormente, se realiza el mismo procedimiento para el convertidor en modo Buck, a partir de la función de transferencia indicada en (7.41). Finalmente, los parámetros de ambos controladores quedan resumidos en la TABLA 7-6.

TABLA 7-6 Parámetros sintonización PI

Zona operación	Parámetro	Valor
Modo Buck		
No aplica	P (parámetro proporcional)	0.56725
	I (parámetro integral)	13.5961
Modo Boost		
Z_1	P	0
	I	0.1174
Z_2	P	0
	I	0.1187
Z_3	P	0
	I	0.07522
Z_4	P	0
	I	0.08235

Para el controlador en modo Buck se tiene el desempeño mostrado en la Fig. 7-12 y la respuesta a escalón en la Fig. 7-13.

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.0049 seconds
Settling time	0.092 seconds
Overshoot	12.6 %
Peak	1.13
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	70 deg @ 294 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fig. 7-12 Desempeño controlador Buck

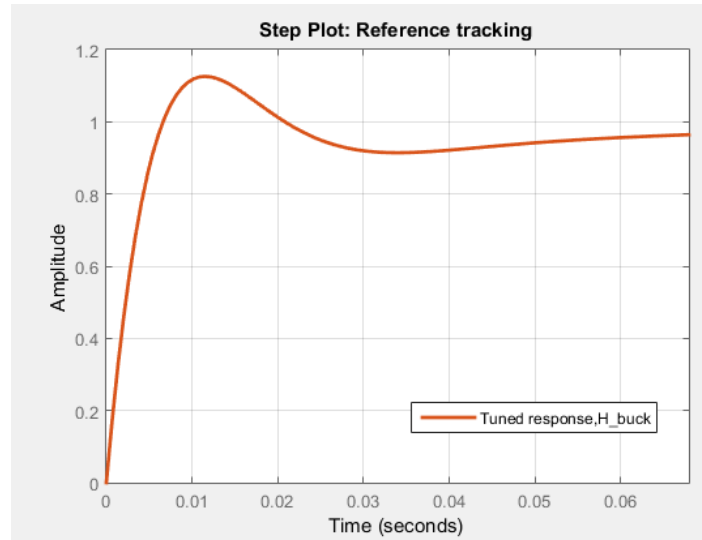


Fig. 7-13 Respuesta a escalón modo Buck

Como se observa en la **TABLA 7-6**, las ganancias proporcional (P) e integrativa (I) para el controlador en modo Buck son mayores al modo Boost, esto a causa de que para este modo, el convertidor reduce el voltaje, y el sobrepaso evidenciado en la Fig. 7-13 no es inconveniente para la celda ED, pues la magnitud voltaje será menor a 12 V y por lo tanto la corriente resultante permanecerá bajo el umbral permitido por la celda ED, como se mostrará en la sección de resultados. Para el modo Boost, en cambio, se utiliza parámetro $P = 0$, pues el cero que resulta debido a la aparición de la parte proporcional del controlador provoca oscilaciones de voltaje que sí podrían provocar sobrepasos de corriente. Además, merma el desempeño del controlador, dado que aumenta el tiempo de asentamiento para $P \neq 0$. Todo lo anterior se evidencia en las figuras enlistadas más abajo.

La implementación de cada controlador y los códigos respectivos, se encuentran detallados en el Anexo E.4.

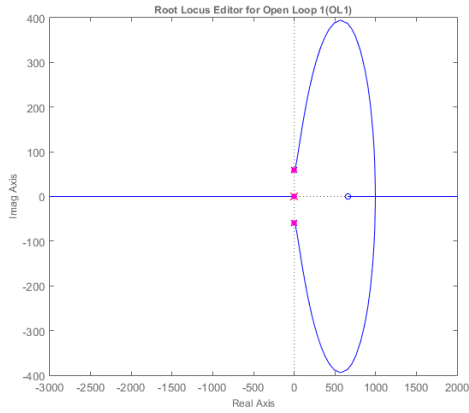


Fig. 7-14 Lugar de la raíz modo I para Z_1

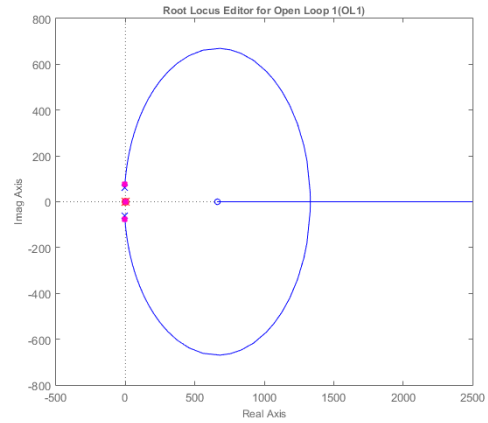


Fig. 7-15 Lugar de la raíz modo PI para Z_1

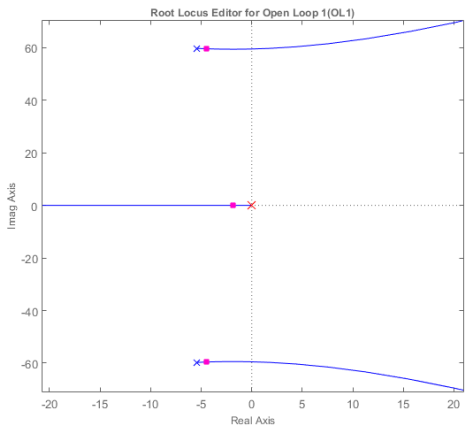


Fig. 7-16 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_1

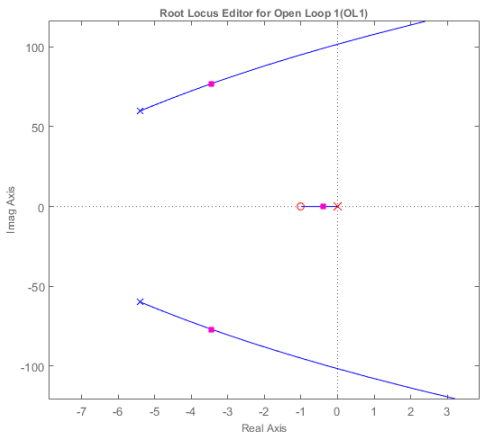


Fig. 7-17 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_1

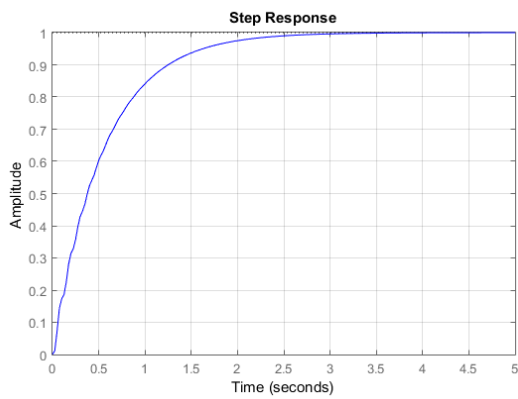


Fig. 7-18 Respuesta a escalón modo I para Z_1

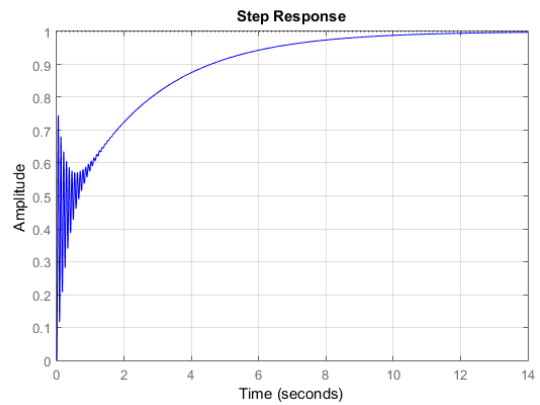


Fig. 7-19 Respuesta escalón modo PI para Z_1

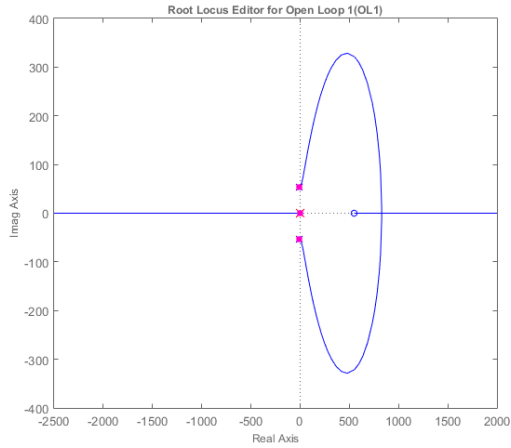


Fig. 7-20 Lugar de la raíz modo I para Z_2

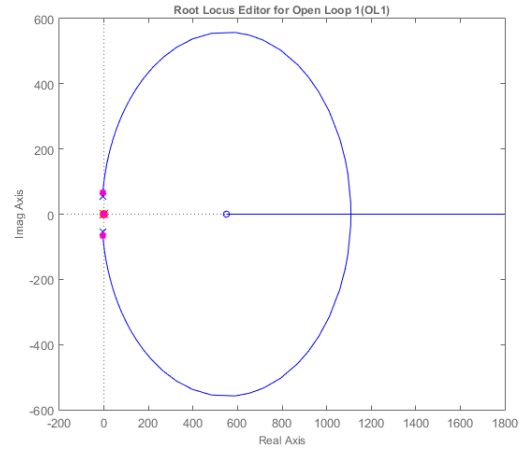


Fig. 7-21 Lugar de la raíz modo PI para Z_2

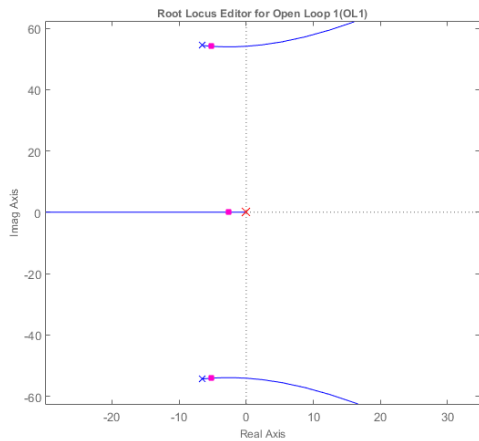


Fig. 7-22 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_2

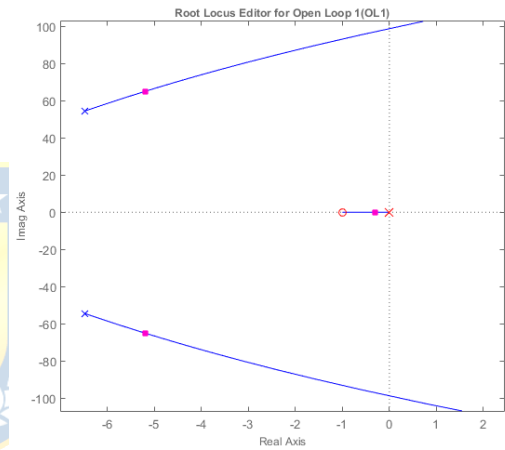


Fig. 7-23 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_2

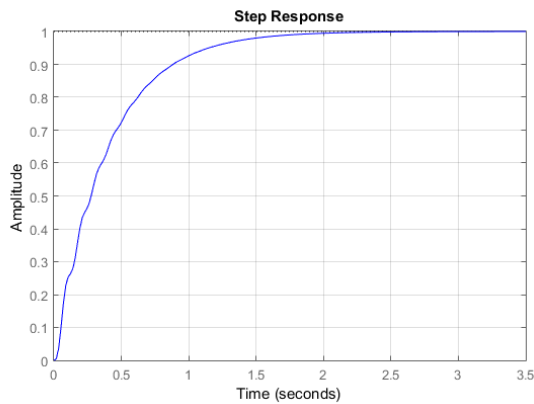


Fig. 7-24 Respuesta a escalón modo I para Z_2

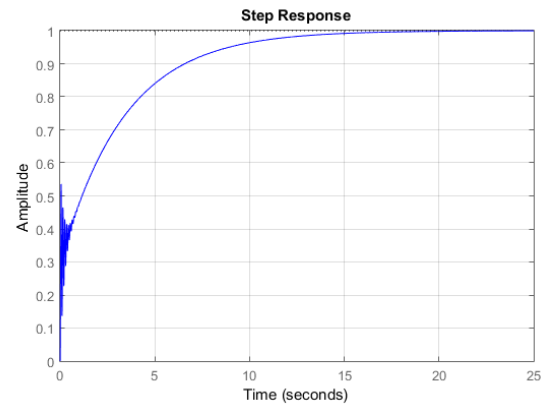


Fig. 7-25 Respuesta escalón modo PI para Z_2

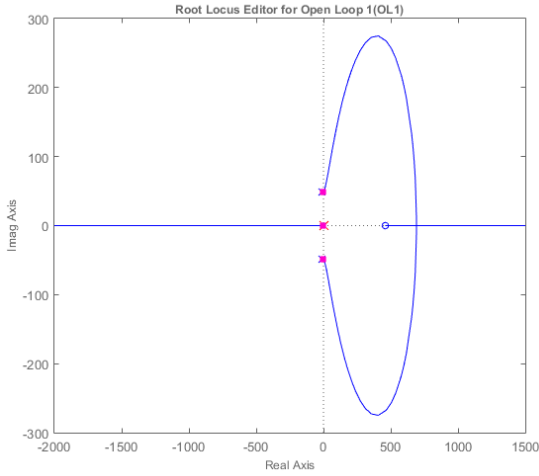


Fig. 7-26 Lugar de la raíz modo I para Z_3

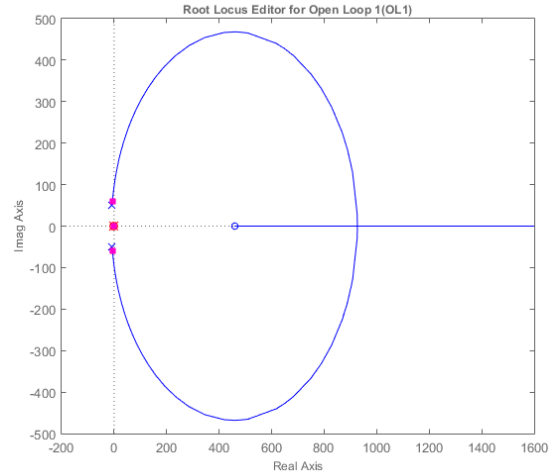


Fig. 7-27 Lugar de la raíz modo PI para Z_3

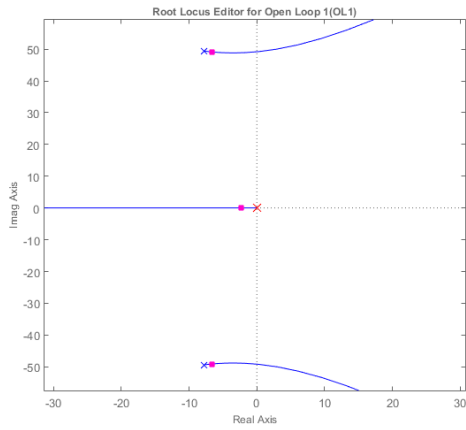


Fig. 7-28 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_3

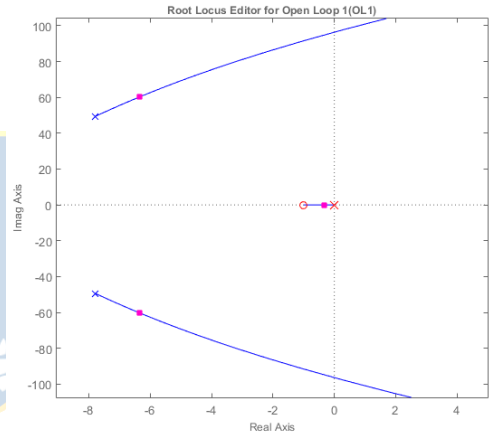


Fig. 7-29 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_3

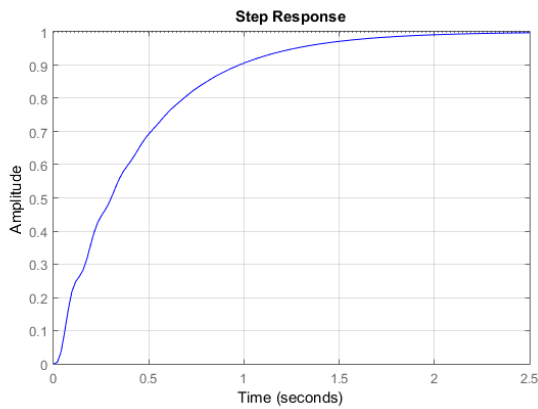


Fig. 7-30 Respuesta a escalón modo I para Z_3

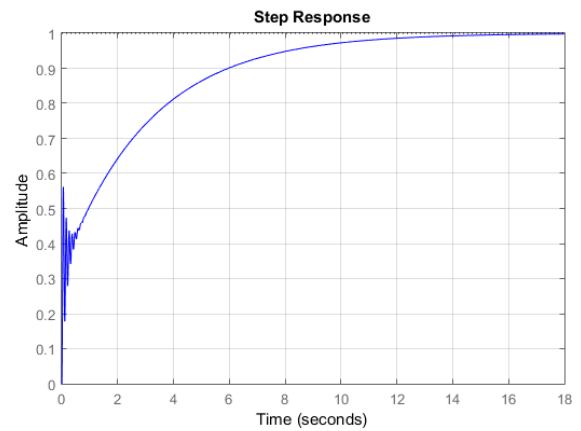


Fig. 7-31 Respuesta escalón modo PI para Z_3

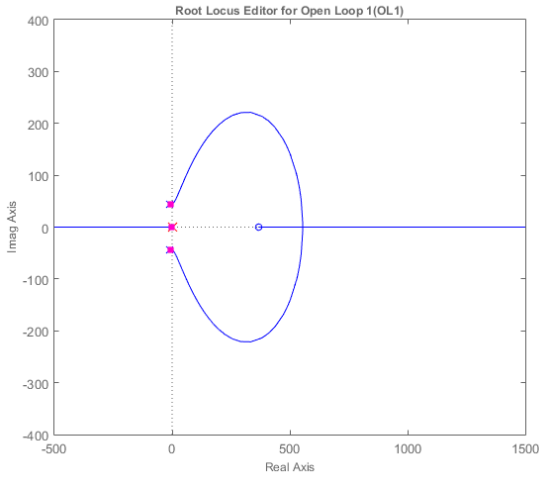


Fig. 7-32 Lugar de la raíz modo I para Z_4

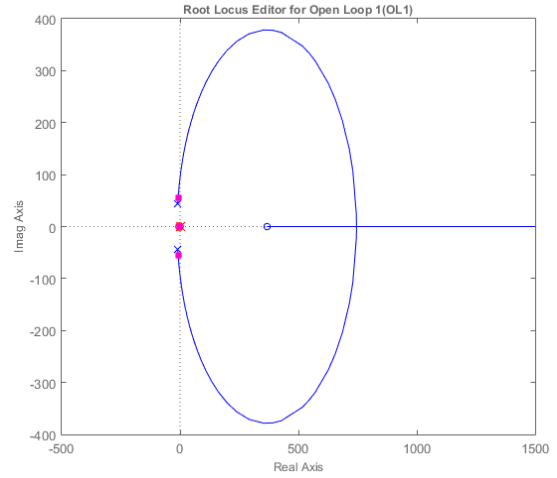


Fig. 7-33 Lugar de la raíz modo PI para Z_4

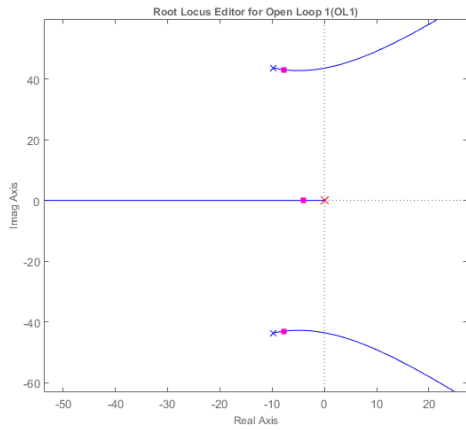


Fig. 7-34 Lugar de la raíz modo I (zoom) para Z_4

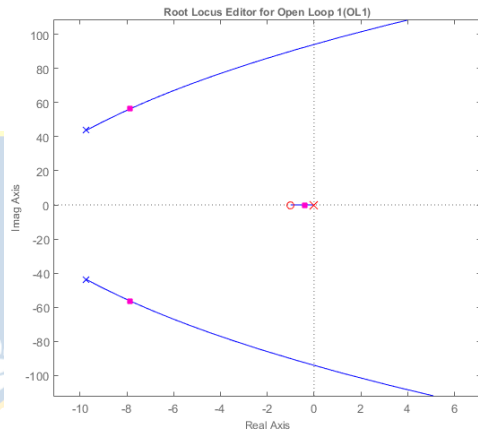


Fig. 7-35 Lugar de la raíz modo PI (zoom) para Z_4

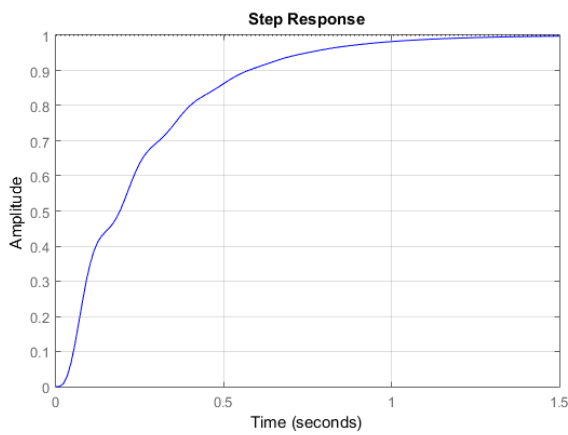


Fig. 7-36 Respuesta a escalón modo I para Z_4

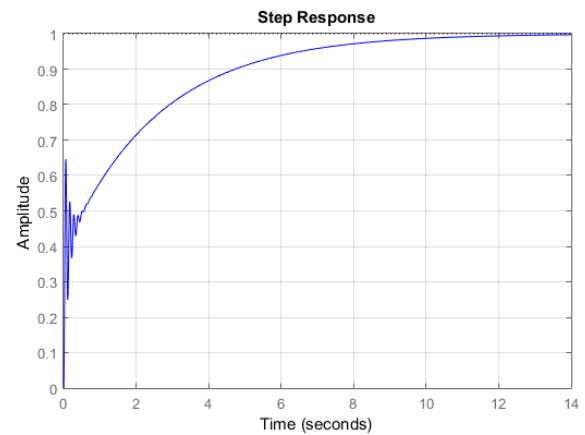


Fig. 7-37 Respuesta escalón modo PI para Z_4

Capítulo 8. Simulación y Resultados Sistema de Energización PV

8.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al simular cada una de las etapas del sistema de energización PV (en este punto aún no se considera acople de celda ED). Se realizan análisis dinámicos y estáticos de cada etapa por separado, y luego del sistema de energización en forma general.

8.2. Salida convertidor Buck

Para evaluar el comportamiento a la salida del convertidor Buck, se desarrolla el modelo del mismo en Simulink y se ingresa el valor de cada componente de acuerdo a lo encontrado en el Capítulo 7. El circuito a simular se ilustra en Fig. E-2 (detalles en Anexo E.2). Luego, se acopla la entrada de este convertidor a la salida del módulo PV; mientras que en la salida se conecta el modelo del batería abordado en el capítulo 7.3.3. El circuito se ilustra en la Fig. 8-1.

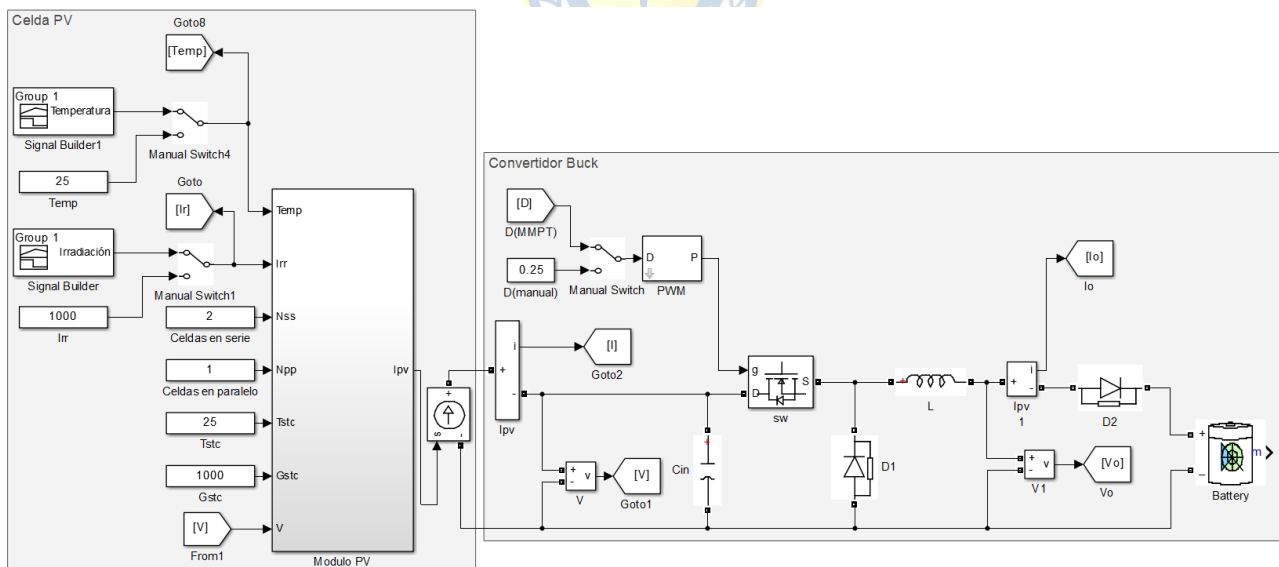


Fig. 8-1 Módulo PV acoplado a convertidor Buck

El modelo matemático del módulo PV implementado en Simulink está construido a partir de lo encontrado en el capítulo 7.2; cuyos bloques, diagramas y códigos se exponen en el Anexo E.1.

Se desarrolla el modelo para condiciones variables de temperatura e irradiación, donde la

temperatura de trabajo de la celda (T_C) se relaciona con la irradiación según [21]:

$$T_C = T_a + G \cdot \frac{NOCT - 20}{800} \quad (8.1)$$

donde,

T_C : temperatura de trabajo de la celda,

T_a : temperatura ambiente (25°C),

G : irradiación en W/m², y

$NOCT$: temperatura de operación nominal de la celda (45°C).

A continuación, se muestran las curvas de salida del módulo PV y del convertidor Buck, obtenidas al simular el sistema indicado en la Fig. 8-1.

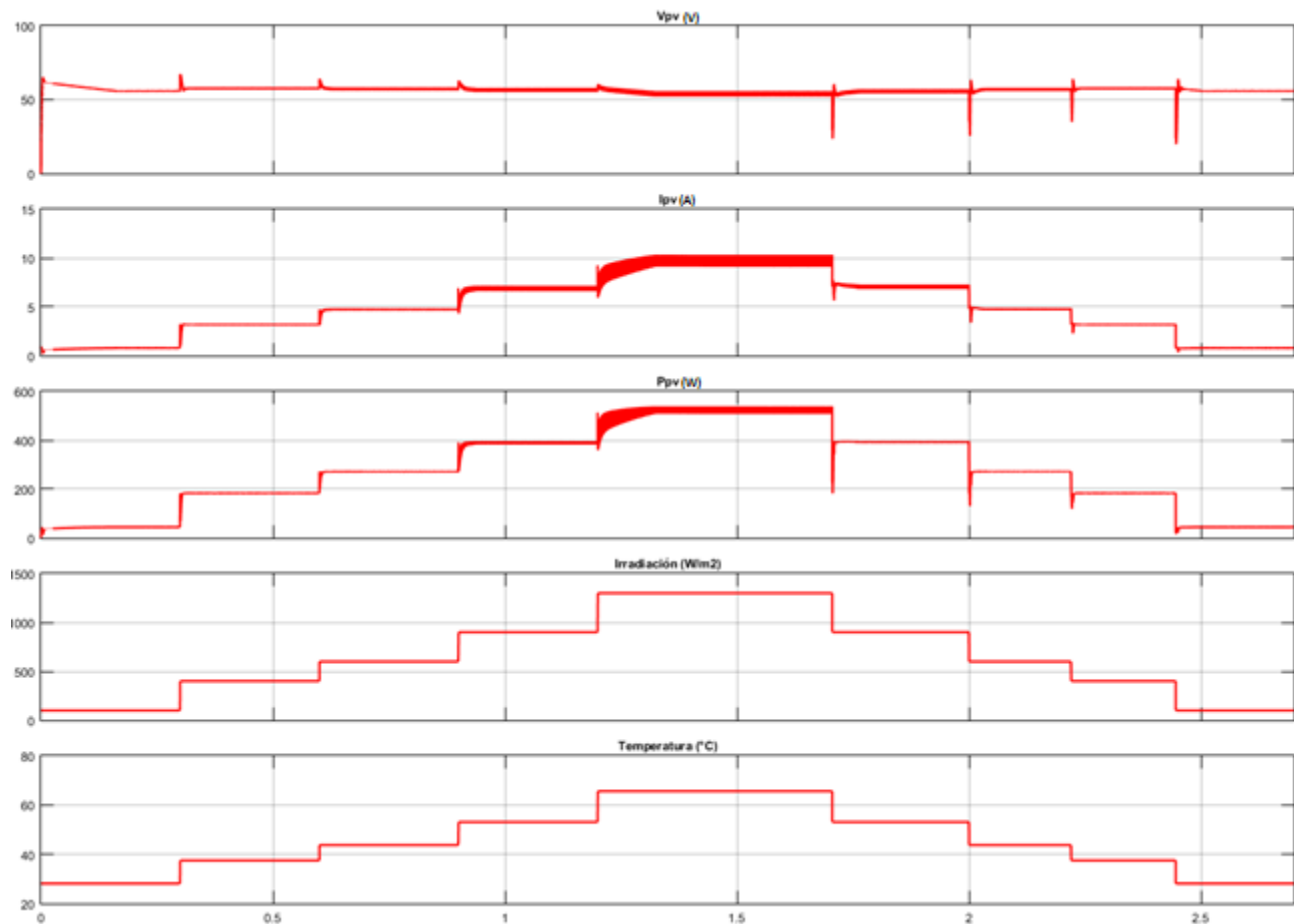


Fig. 8-2 Curvas de Salida Módulo PV

En la Fig. 8-2 se muestra el análisis dinámico de voltaje, corriente y potencia de salida del módulo PV para perturbaciones de irradiación y temperatura. Se observa que el mayor ripple de voltaje se presenta para los valores máximos en las perturbaciones, aproximadamente en $t = 1.5$ seg. Luego, de la Fig. 8-3 se tiene que $\Delta V_{pp(\max)} = 4$ V. Si bien se estableció un valor máximo de ripple de

voltaje de 100 mV, no fue posible lograr valores menores, pues en la medida que incrementa en valor del capacitor de enlace entre el módulo y el convertidor (C_{in}), también se acrecienta la componente oscilatoria en la respuesta del convertidor, en tanto que la disminución de ripple de voltaje no es significativa. Así, pese a que no se obtuvo el valor esperado en este ámbito, en la Fig. 8-7 no se observan un perjuicio sobre la calidad de la salida de corriente y voltaje del convertidor. Finalmente, el valor de ripple evidenciado en la Fig. 8-2 se concluye como válido para el sistema.

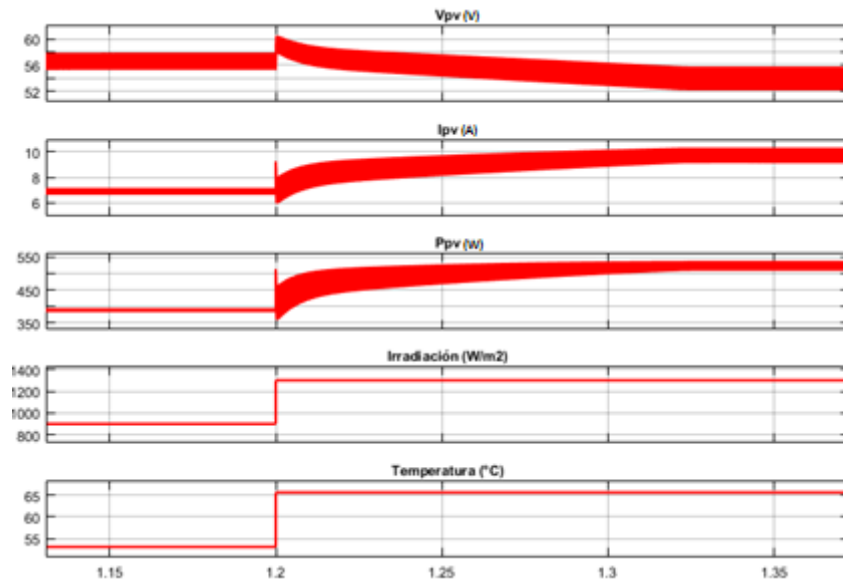


Fig. 8-3 Régimen transitorio y estacionario para escalón de temperatura e irradiación

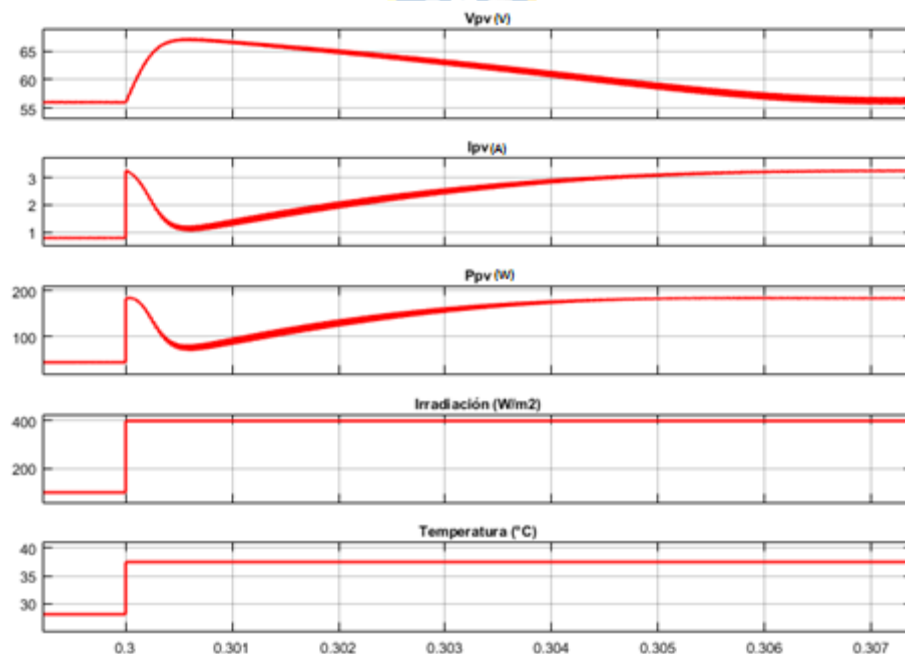


Fig. 8-4 Respuesta de módulo PV frente a escalón de temperatura e irradiación

En la Fig. 8-4 se observan los *peaks* de voltaje y corriente para un escalón incremental de temperatura e irradiación. Luego, en la Fig. 8-5 se observa la rápida respuesta del control MPPT, compensando los *peaks* producidos. Esta situación es análoga en todos los escalones incrementales.

De modo similar, en la Fig. 8-6 se observa la respuesta transitoria y estacionaria del convertidor para escalón decremental de temperatura e irradiación. Como se puede apreciar, el controlador MPPT responde rápidamente, tardando aproximadamente 50 milisegundos en determinar el punto de máxima potencia para las condiciones dadas. También es apreciable una caída en la tensión de la batería, sin embargo, el cambio se considera despreciable, dada su magnitud. Este comportamiento es muy similar para el resto de escalones decrementales, siendo la respuesta del controlador MPPT igual de rápida en cada caso, como se observa en la Fig. 8-7.

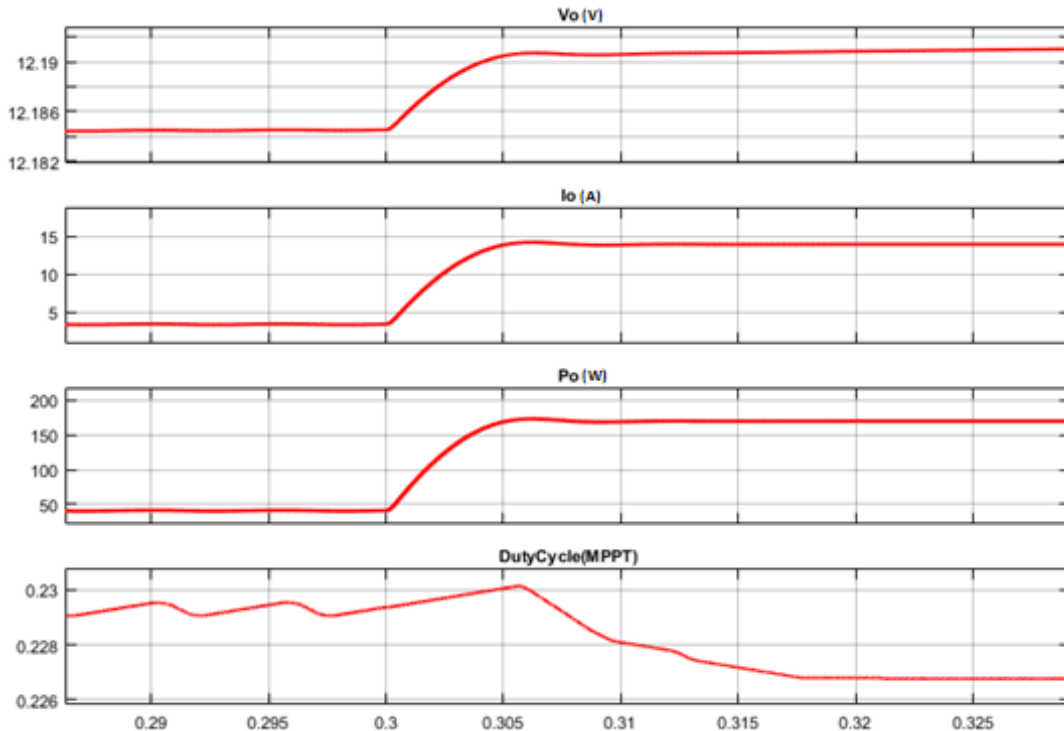


Fig. 8-5 Respuesta de convertidor Buck frente a escalón incremental de temperatura e irradiación

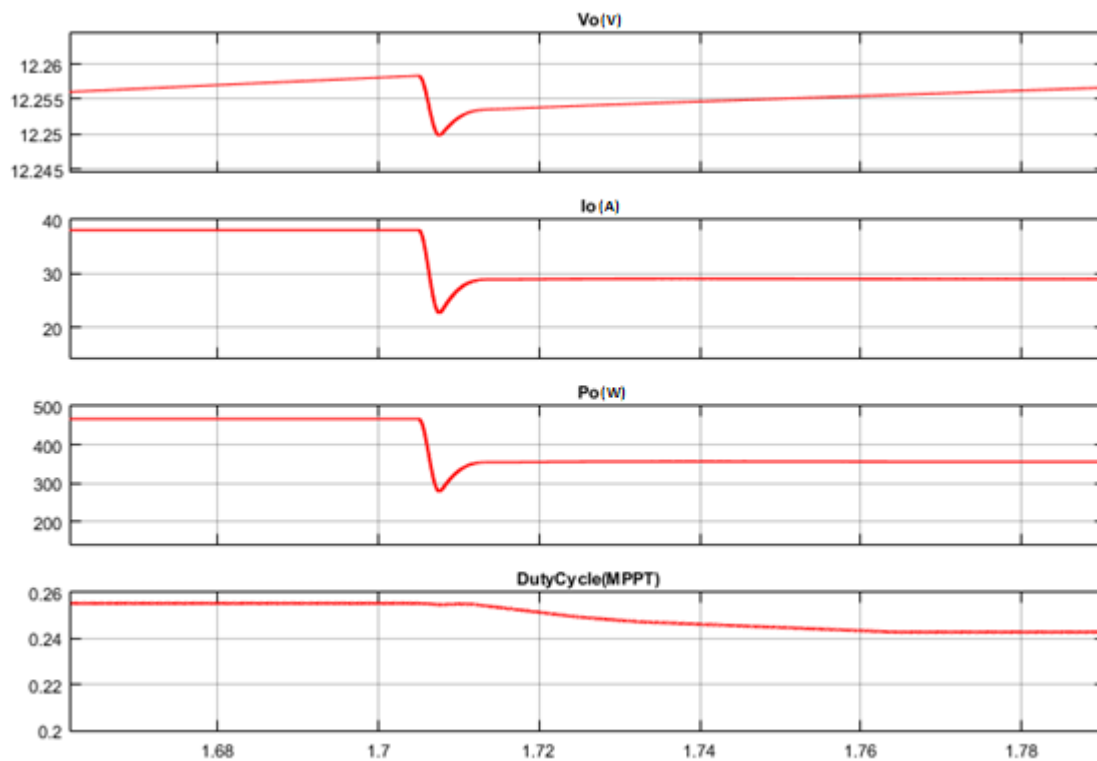


Fig. 8-6 Respuesta de convertidor Buck frente a escalón decremental de temperatura e irradiación

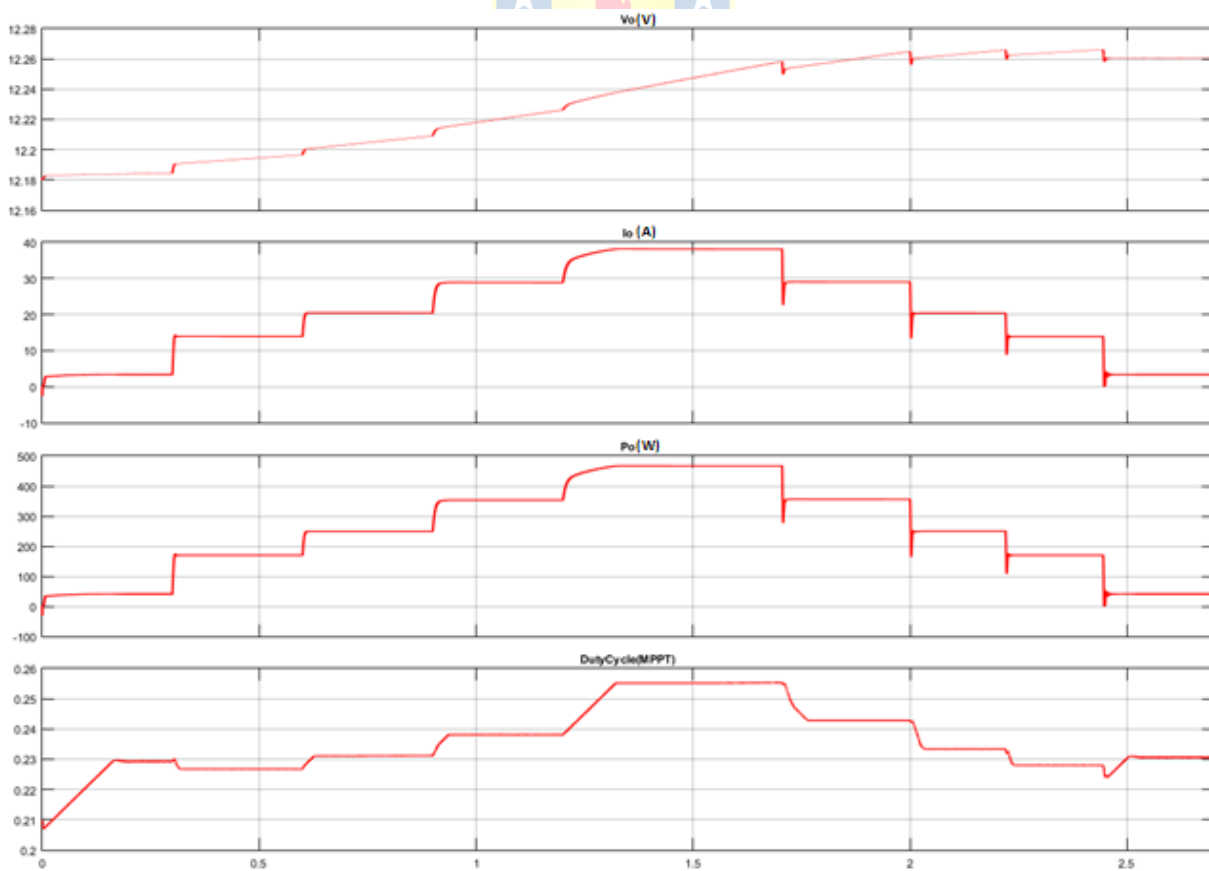


Fig. 8-7 Curvas de Salida convertidor Buck

Se tiene de las Fig. 8-2 y Fig. 8-7 que la eficiencia del convertidor oscila en el rango de 91% y 94%, valor que coincide con lo esperado. Además, se observa en Fig. 8-7 que el controlador MPPT responde satisfactoriamente a variaciones ambientales en el módulo PV.

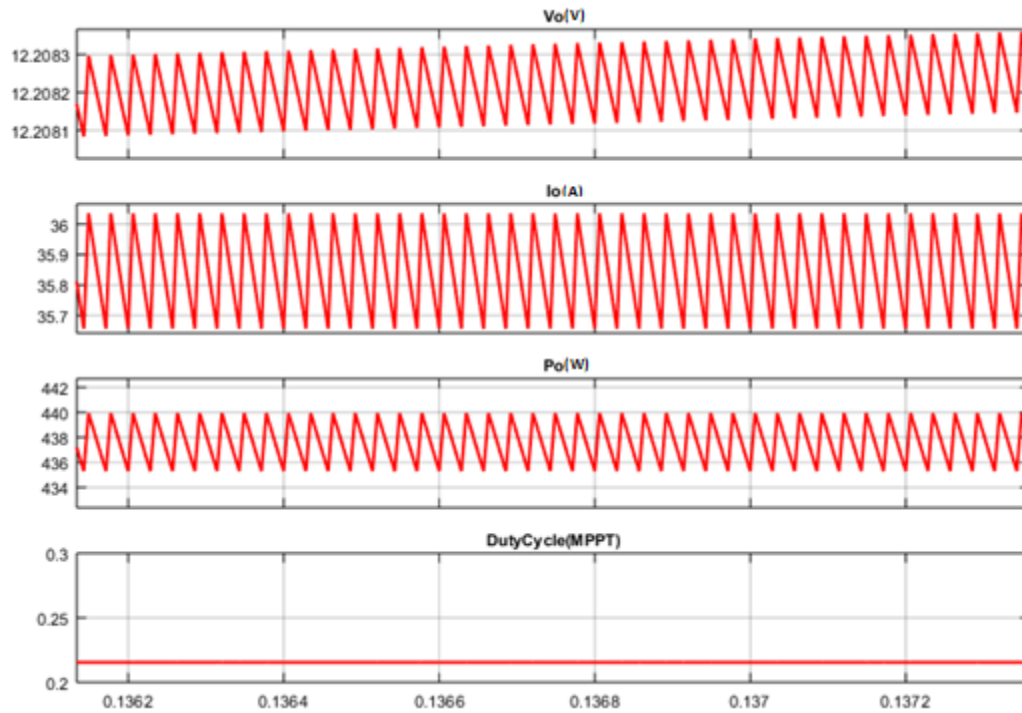


Fig. 8-8 Ripple de salida Buck

A modo de apreciación final, se extrae de la Fig. 8-8 que el ripple de corriente de salida es de aproximadamente 0.2 A, mientras que el de voltaje de salida es de 0.1 mV_{p-p}. En este caso, el parámetro de diseño en el convertidor fue el ripple de corriente, el cual resulta ser muy cercano al establecido (0.1 A).

8.3. Salida Convertidor Buck-Boost

Luego de haber diseñado todas las etapas del sistema de energización, siendo la última de ellas el convertidor Buck-Boost, se obtienen los resultados pertinentes. Se ilustra el comportamiento del sistema cubriendo todo el rango de voltaje de salida.

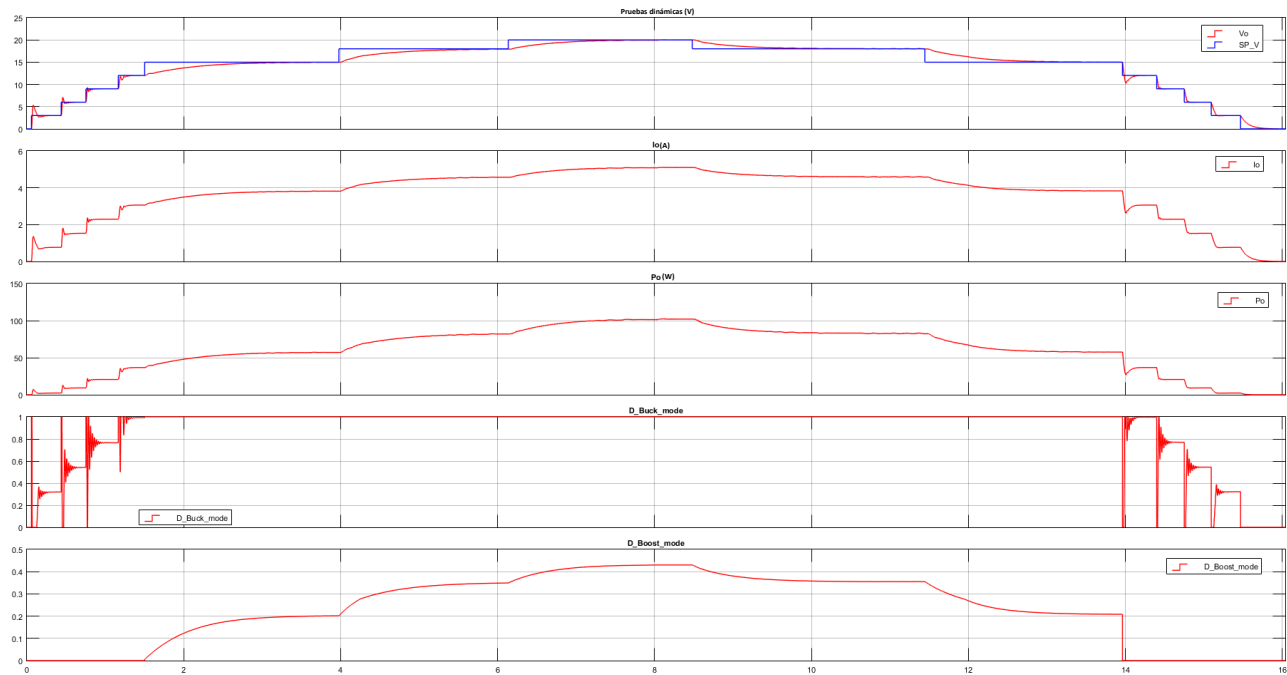


Fig. 8-9 Análisis dinámico de sistema de energización

En la Fig. 8-9 se observa que para voltajes inferiores a 12 V, el convertidor opera en modo Buck, reduciendo el voltaje de salida; mientras que para voltajes superiores opera en modo Boost, incrementando el voltaje de salida. A primera vista, es evidente que las dinámicas en modo Buck son notablemente más rápidas y oscilatorias que en modo Boost. Además, los sobrepasos de corriente en modo buck no tienen una magnitud que pueda dañar el sistema (Fig. 8-10).

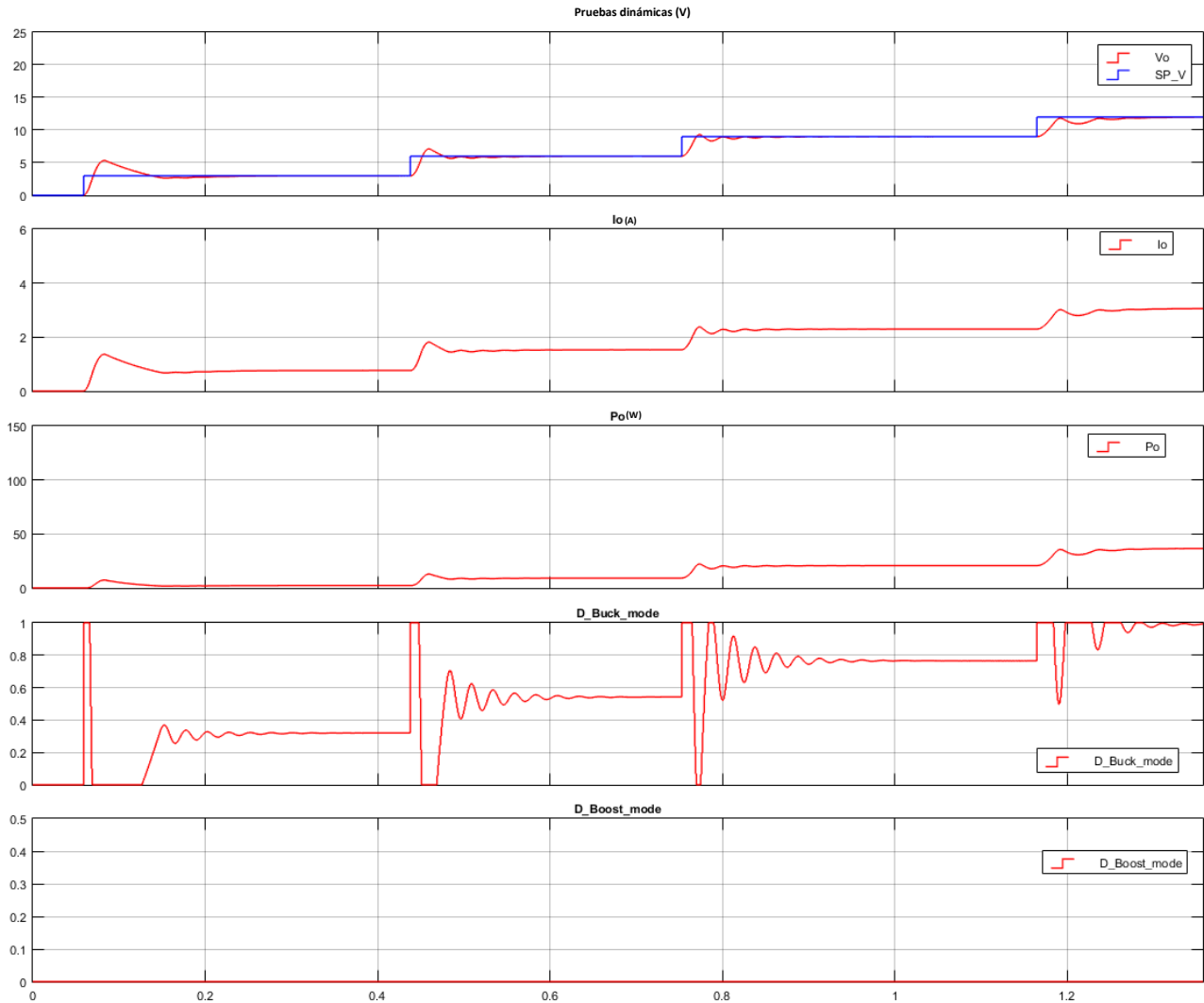


Fig. 8-10 Respuesta a escalón y señales peak en modo Buck.

Por otro lado, a partir de la función de transferencia del convertidor en modo Buck (7.41), se tienen los polos del sistema:

$$\begin{aligned} s_1 &= -4.87 + 63.04i \\ s_2 &= -4.87 - 63.04i \end{aligned} \quad (8.2)$$

Se observa que los polos son complejos conjugados, cuya componente real es negativa. Esto da cuenta del comportamiento oscilatorio amortiguado que evidencia el convertidor en el modo en estudio.

Finalmente, para el convertidor operando en modo Buck, se tiene que el comportamiento es satisfactorio pues, según lo observado; los sobrepasos de corriente no significan un peligro para el sistema desalinizador. Además, pese al comportamiento oscilatorio en régimen transitorio, las dinámicas son muy rápidas, mientras que en s.s. el sistema se estabiliza sobre la referencia de voltaje

como se observa en la Fig. 8-10. Así se da por validado el comportamiento del convertidor operando en el modo mencionado.

Con respecto al modo Boost, se observa en mejor detalle la repuesta al análisis dinámico en la Fig. 8-11. Aquí, lo más notable es que la dinámica es mucho más lenta que lo mostrado en el convertidor Buck, asentándose en aproximadamente 2 segundos. Aun así, el proceso de desalación es mucho más lento. Como muestra el proceso de ejemplo la Fig. A-5 (Anexo A), está en el orden de horas, por lo tanto, la lentitud en la dinámica para el convertidor en modo Boost es despreciable frente a la lentitud en las dinámicas a la salida de la celda de desalación.

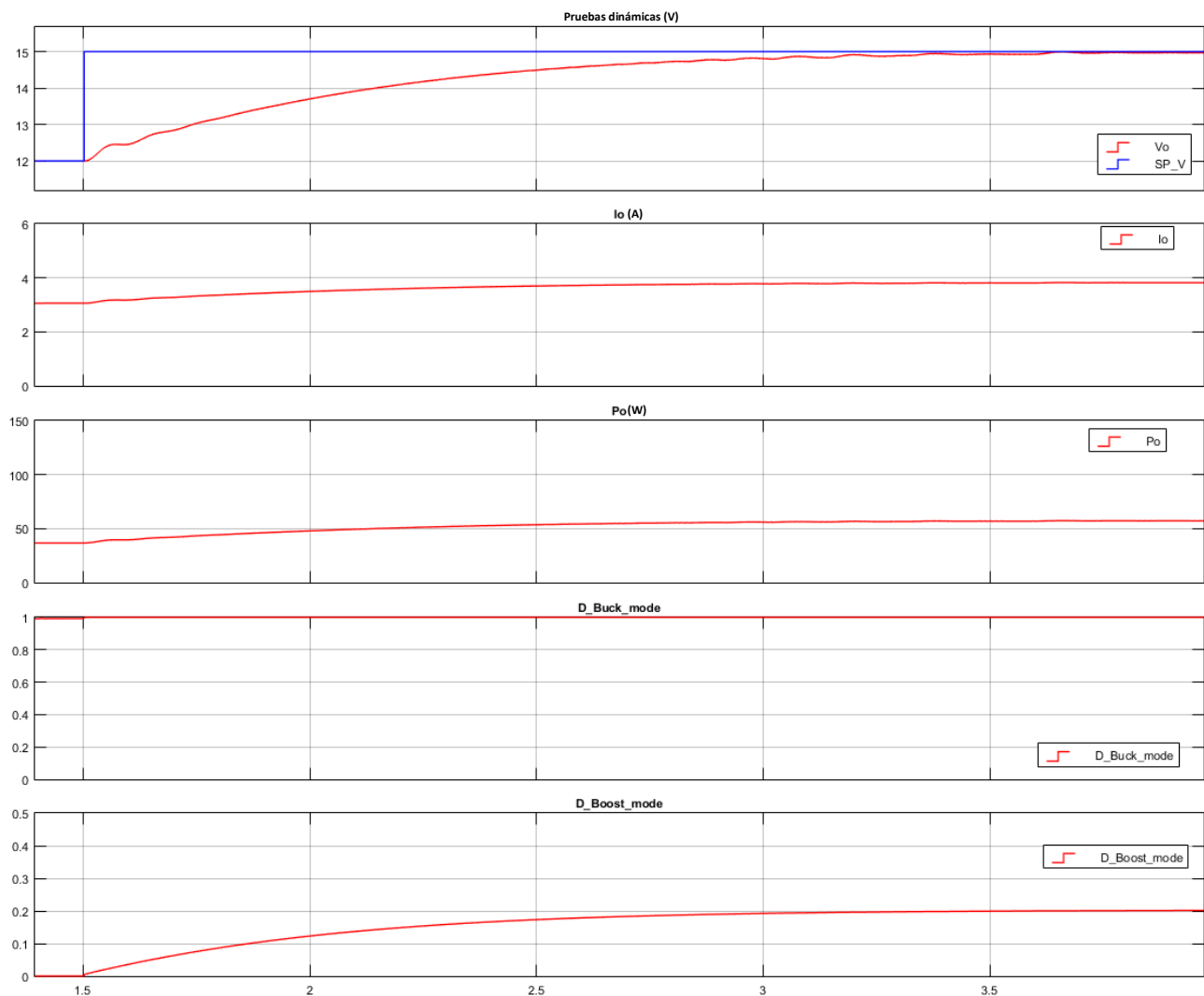


Fig. 8-11 Respuesta a escalón de referencia de voltaje, convertidor en modo Boost.

Otro aspecto importante es aquel que guarda relación con la eficiencia del convertidor. Para el cálculo se elige una zona de operación arbitraria del convertidor, como lo muestra la Fig. 8-12, y se encuentra el coeficiente de eficiencia del convertidor de:

$$\eta_{buckboost} = 91.3\% \quad (8.3)$$

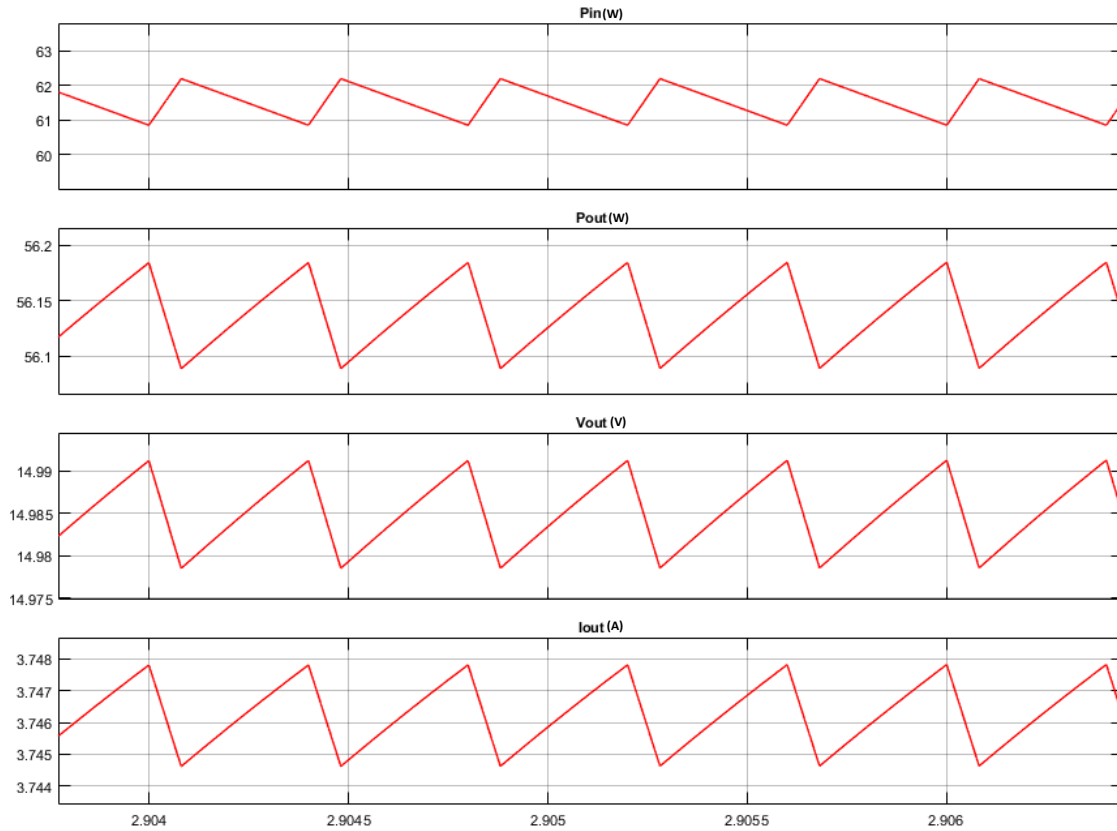


Fig. 8-12 Potencia de entrada/salida y voltaje/corriente salida de Buck-Boost

A partir de Fig. 8-12 es posible determinar el ripple de corriente y de voltaje a la salida del convertidor, encontrándose: $\Delta i_L = 3 \text{ mA}$ (0.08%) y $\Delta V_{p-p} = 12 \text{ mV}$. Esto es mucho mejor de lo esperado, considerando que en la etapa de diseño se establecieron un 2% para el ripple de corriente y 50 mV para el ripple de voltaje.

Finalmente, considerando todo lo anterior, se concluye que el sistema de alimentación presenta un desempeño favorable, con un coeficiente de eficiencia satisfactorio y por lo tanto viable para la aplicación que motiva el diseño.

Capítulo 9. Celda ED Acoplada a Sistema de Energización PV

9.1. Introducción

En este capítulo, se exponen los resultados de las dinámicas obtenidas al simular el modelo matemático de la planta de desalación (Capítulo 5) acoplada a la salida del convertidor Buck-Boost (reductor-elevador), perteneciente al sistema de energización fotovoltaico (Capítulo 7). También se detallan los criterios de diseño y sintonización del control de conductividad, así como la topología de control utilizada para acoplar los sistemas.

Todos los códigos y algoritmos, así como los bloques de simulación utilizados en Simulink, pueden ser revisados en el Anexo C y Anexo E.

9.2. Acoplamiento de Sistemas y Controladores

Para realizar el acople entre la celda ED y el sistema fotovoltaico, se define una resistencia variable a la salida del convertidor Buck-Boost, según se vio en el capítulo 4.3.2B, cuyo valor está en función de la conductividad de salida de la celda. Por otro lado, el voltaje aplicado a la celda ED será regulado por el controlador de conductividad, cuya señal de control será la referencia de voltaje al controlador de voltaje del convertidor Buck-Boost. De esta forma, se tiene que los controladores estarán en una topología de cascada, donde el controlador de conductividad es el maestro y el control de voltaje es el esclavo (ver Fig. 9-1). Luego, como las dinámicas eléctricas del convertidor (lazo interno) son extremadamente más rápidas que las dinámicas de conductividad (lazo externo), el funcionamiento de los controladores será satisfactorio.

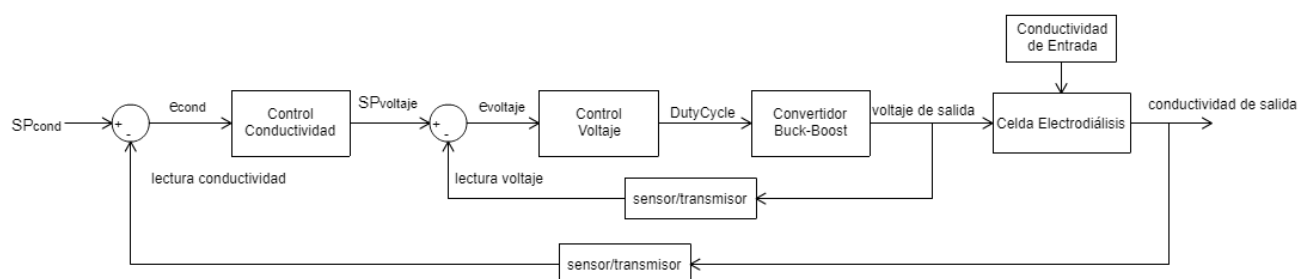


Fig. 9-1 Diagrama de Control

9.3. Sintonización de Controlador

Para controlar la conductividad a la salida de la celda ED, se elige un controlador del tipo PI, por la facilidad que implica su diseño e implementación. Para sintonizar, se decide en primera instancia implementar un controlador para cada zona de operación encontrada en el Capítulo 5. Sin embargo, al sintonizar para la función de transferencia cuyo tag es 111 (ver **TABLA 5-7**), se realizan pruebas, y se encuentra que el controlador opera satisfactoriamente para todas las zonas de operación en estudio. Se utiliza la aplicación *PID tuner* de Matlab, obteniéndose los parámetros: proporcional, $K_p = -2.360$; integrativo, $K_i = -0.04832$, y se muestran los resultados en términos de desempeño del controlador en la Fig. 9-2.

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	640 seconds
Settling time	1.08e+03 seconds
Overshoot	0 %
Peak	1
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	80.2 deg @ 0.00282 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fig. 9-2 Desempeño del controlador

9.4. Simulaciones

A continuación se ilustran los resultados para cambios en la referencia de conductividad de salida, tanto desde el punto de vista de la celda ED, como desde el del sistema de energización.

9.4.1 Perspectiva de la Celda ED

A. Dinámicas Frente a Conductividad de Entrada Constante

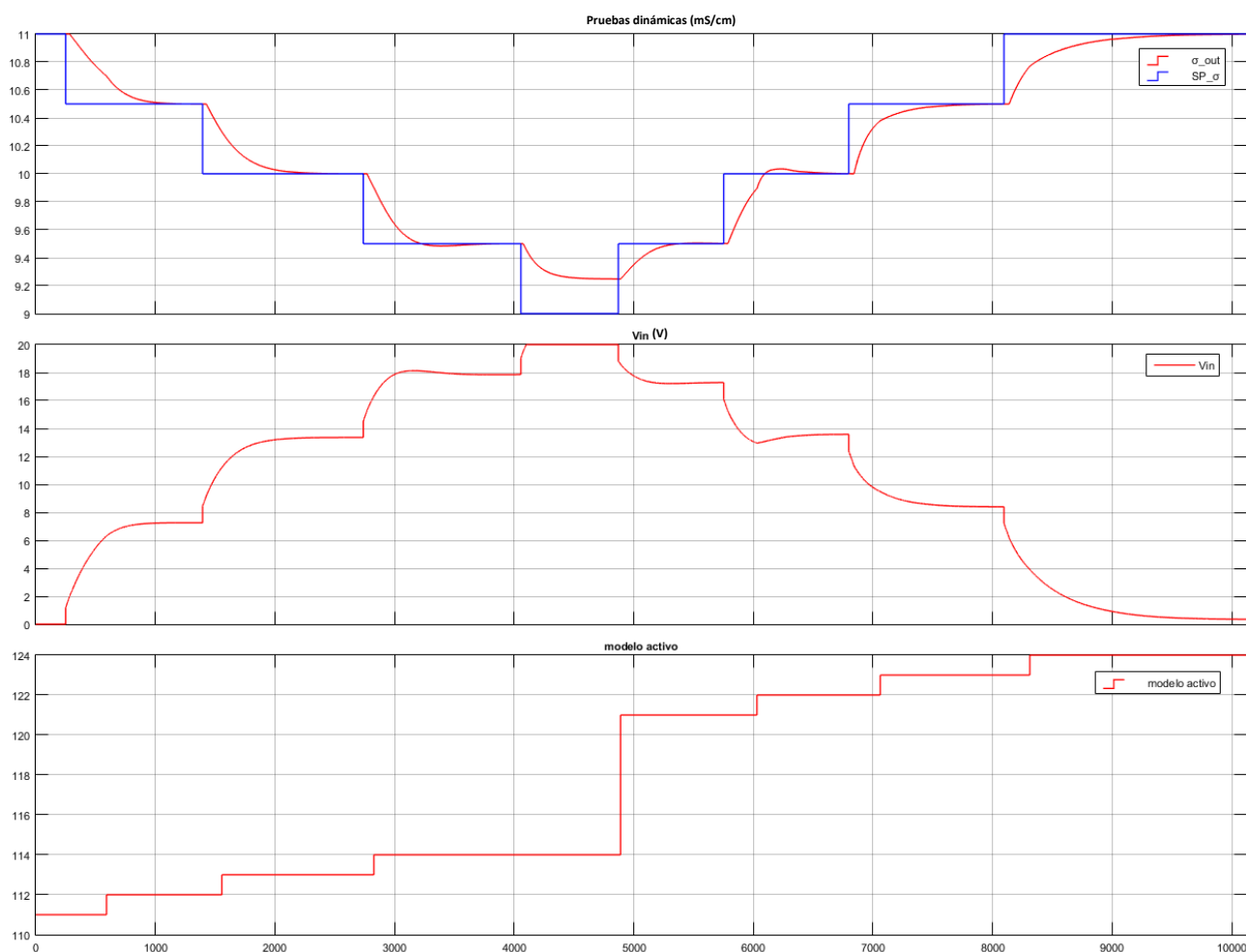


Fig. 9-3 Resultados de simulación para entrada constante de 11 mS/cm

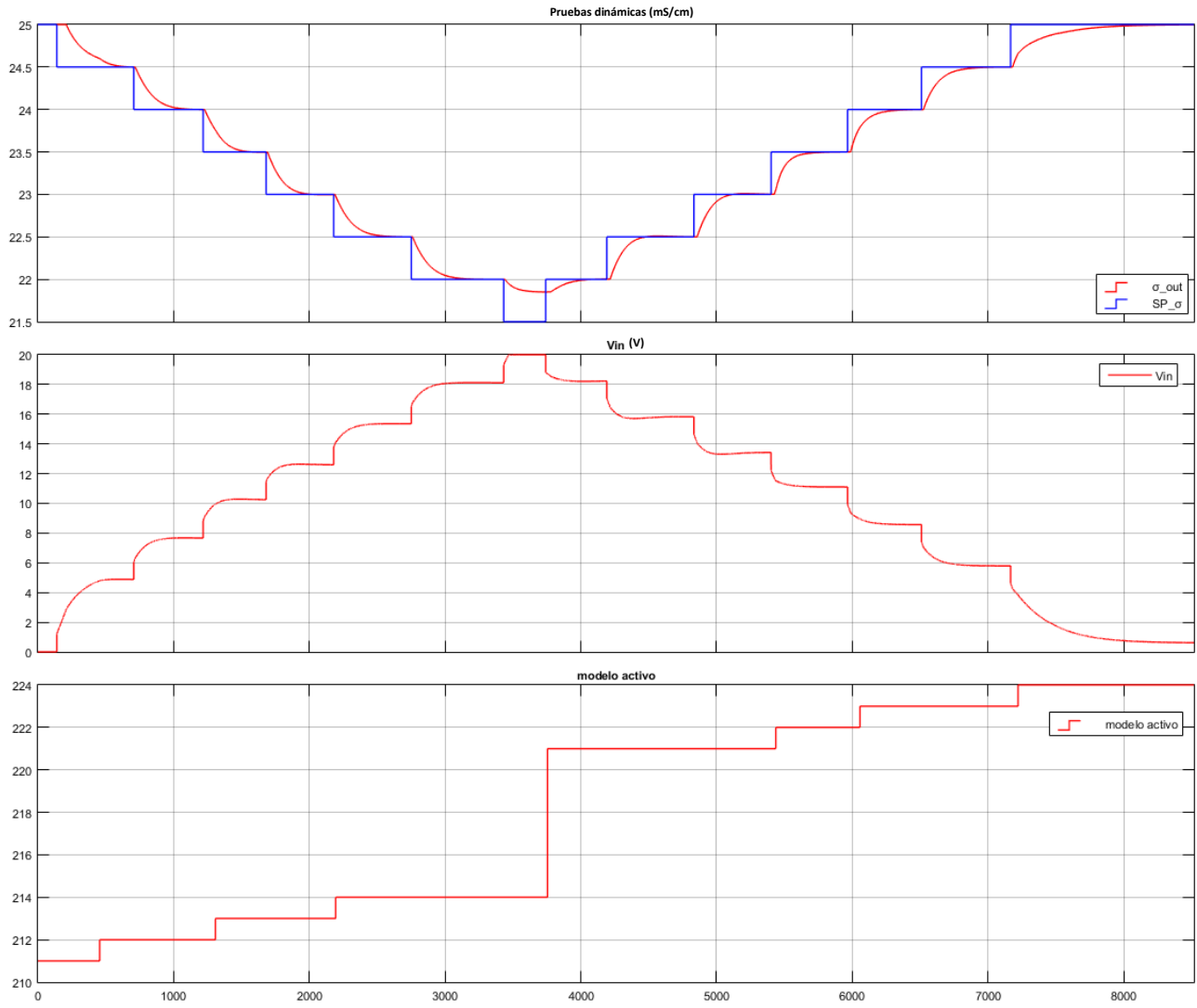


Fig. 9-4 Resultados de simulación para entrada constante de 25 mS/cm

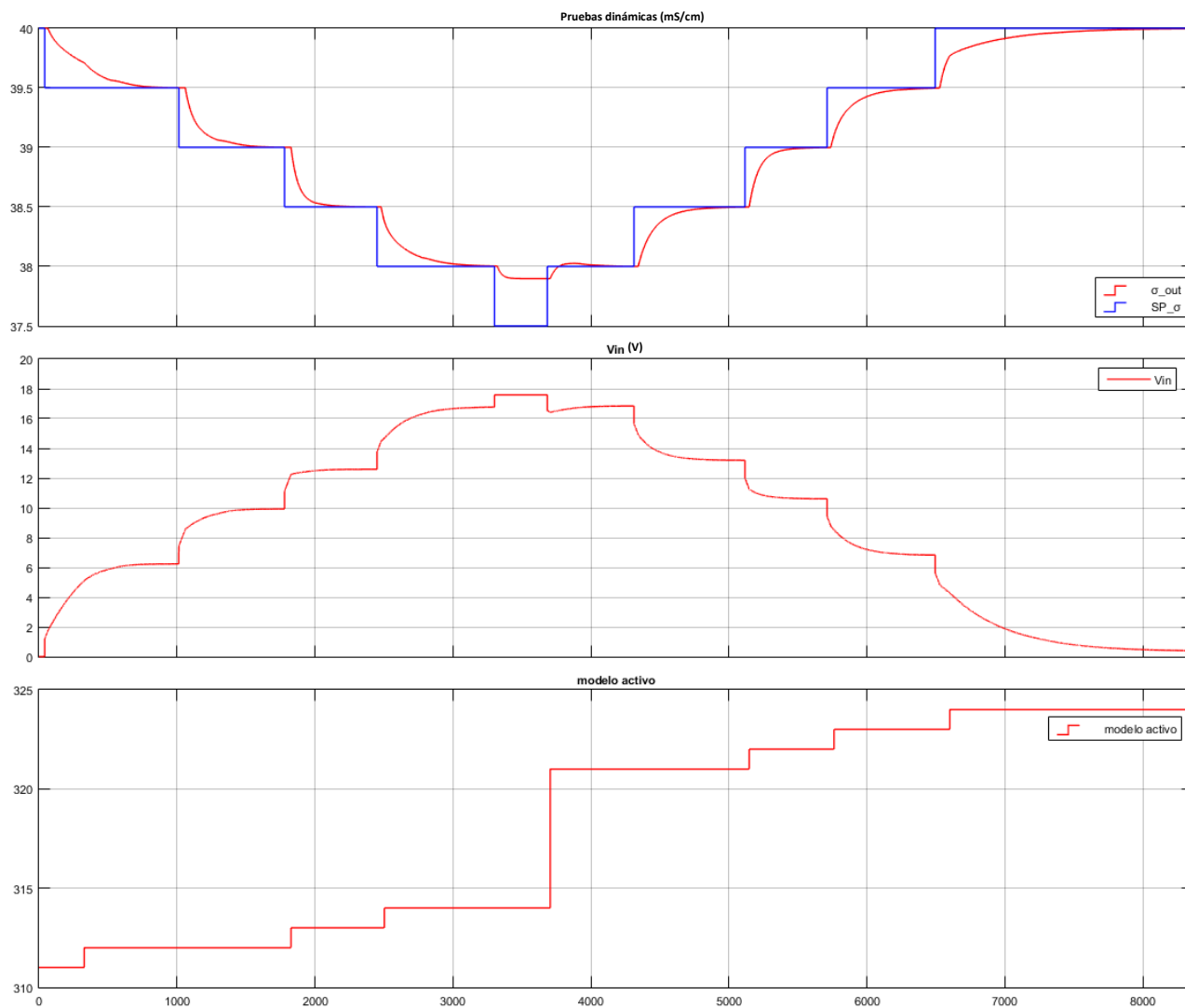


Fig. 9-5 Resultados de simulación para entrada constante de 40 mS/cm

De las figuras, se observa que el controlador tiene un desempeño satisfactorio en cada caso, con sobrepasos inferiores 0.05 mS/cm, presentes sólo en las Fig. 9-3 y Fig. 9-5. Se observa además que en todos los casos el algoritmo de simulación elige correctamente el modelo matemático según la zona de operación donde se encuentre el valor de la conductividad de salida.

Se desprende también que, al igual que en la planta real, la máxima remoción salina se obtuvo para conductividad de entrada de 25 mS/cm (Fig. 9-4). Recordar que para el caso de una conductividad de entrada de 40 mS/cm el voltaje está acotado a 17.6 V, por cuanto a mayor voltaje existiría un flujo de corriente persistente y de magnitud mayor al umbral definido por el fabricante del equipo desalador.

Por otro lado, para los casos en estudio, los valores de voltaje requeridos por el controlador de conductividad no presentan una tasa de cambio agresiva. Esto, en la práctica, disminuirá la existencia

de *peaks* de corriente a la entrada de la celda ED, pues en el Capítulo 8 se encontró que para pequeños escalones de referencia de voltaje, los *peaks* de corriente son inofensivos para el equipo desalador.

B. Dinámicas Frente a Conductividad de Entrada Variable

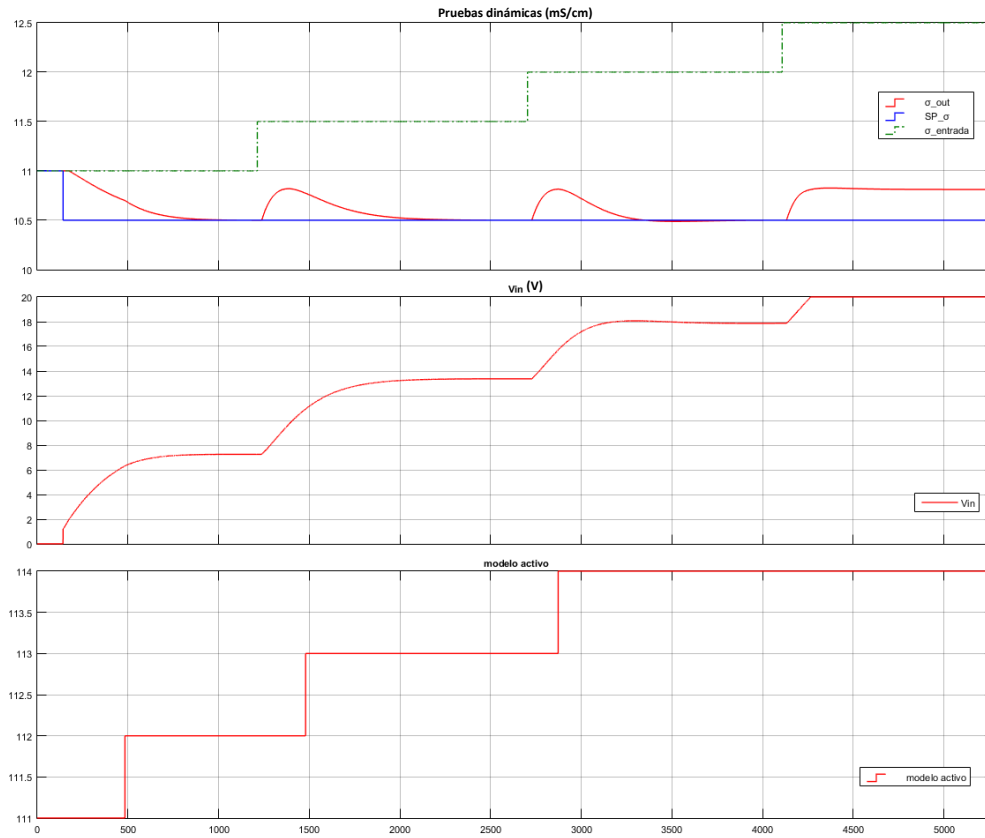


Fig. 9-6 Respuesta a perturbaciones próximas a 11 mS/cm

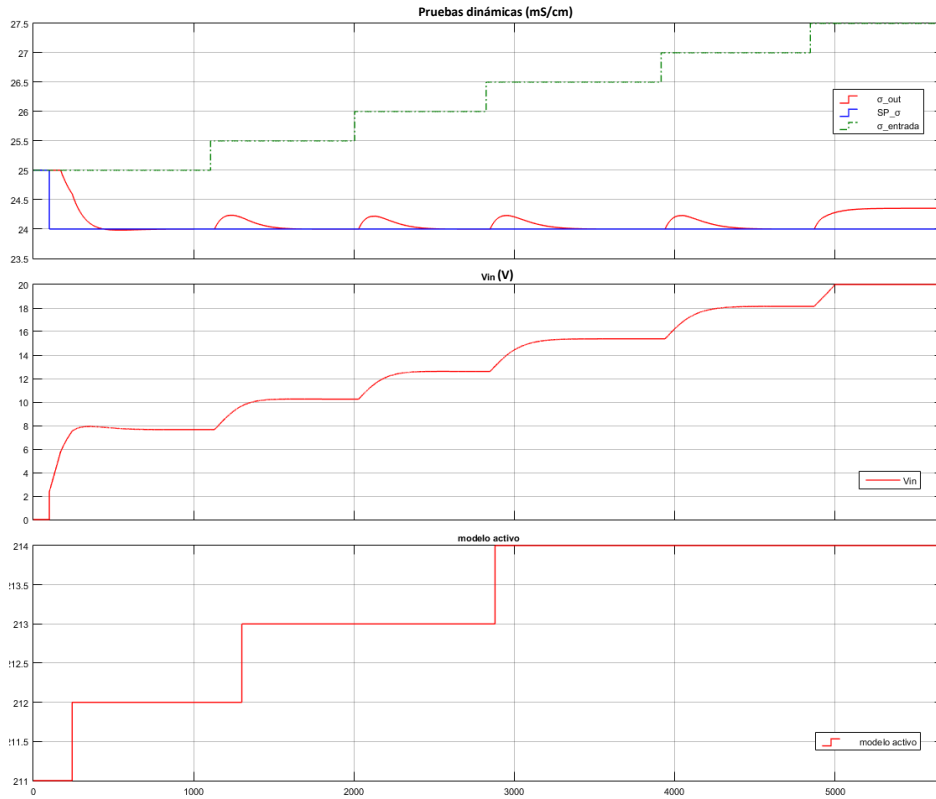


Fig. 9-7 Respuesta a perturbaciones próximas a 25 mS/cm

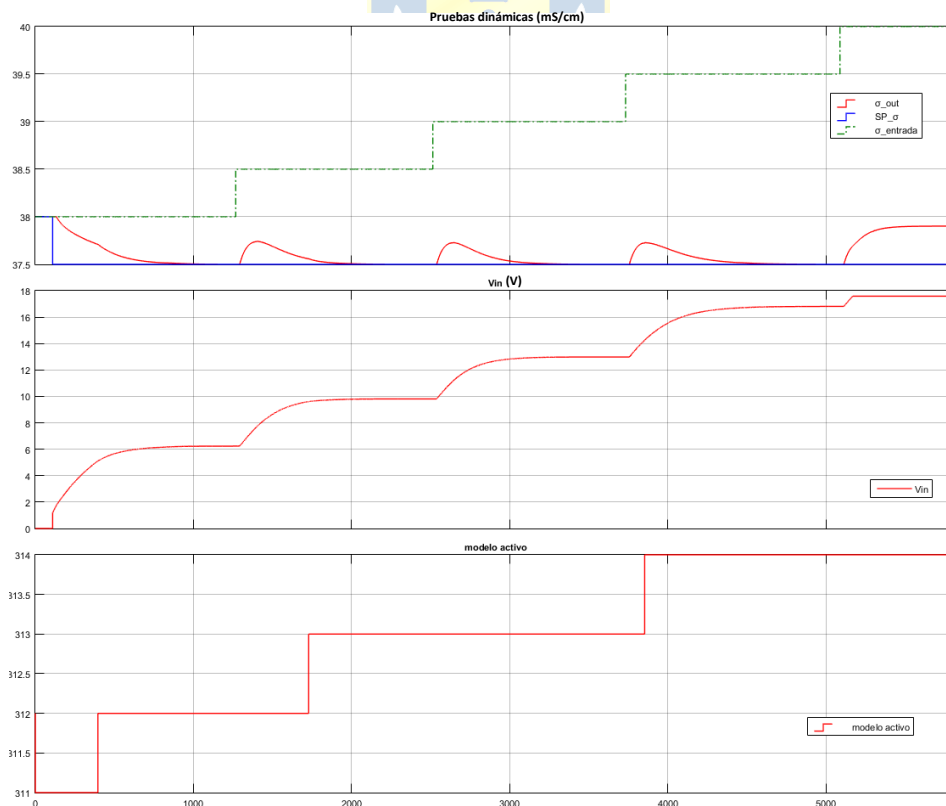


Fig. 9-8 Respuesta a perturbaciones próximas a 38 mS/cm

De las Fig. 9-6, Fig. 9-7 y Fig. 9-8 es apreciable que el controlador es capaz de soportar aumentos a la conductividad de entrada, aumentando el voltaje para compensar la perturbación, y tardando aproximadamente 10, 5 y 8 minutos para el caso mostrado por la Fig. 9-6, Fig. 9-7, y Fig. 9-8 respectivamente. Como se puede notar, existe un valor máximo de conductividad de entrada para el cual es posible mantener la referencia de conductividad de salida en cada caso, siendo aquel representado por la Fig. 9-6 el cual soporta el mayor aumento de conductividad de entrada. De todo lo anterior se encuentra entonces que el mejor desempeño del sistema electrodiálisis es para conductividades de entrada cercanas a 25 mS/cm.

Notar que no se estudió el caso de disminuciones en la conductividad de entrada. Esto a causa de que, en términos prácticos, siempre se espera obtener valores de conductividad de salida inferiores a los valores de entrada al sistema desalinizador.

Al igual que en el caso de conductividad de entrada constante, se observa en todos los casos que las variaciones de voltaje presentan una dinámica suave, de modo que los *peak* de corriente serán mermados.

9.4.2 Perspectiva de Sistema de Energización PV

Al realizar el acople entre los dos sistemas, no fue posible obtener resultados, a causa de que como se observa, las dinámicas de la celda ED son extremadamente lentas en comparación a las dinámicas eléctricas de los convertidores. Por otro lado, el modelo matemático del sistema de energización significa una gran carga computacional, de modo que el *solver* de Simulink realiza iteraciones con pasos muy pequeños. En términos prácticos, una simulación de 5000 segundos del sistema de energización acoplado al sistema desalador tardaría días en finalizarse.

De lo anterior, se resolvió realizar las simulaciones de modo independiente, analizando el sistema de energización para la resistencia eléctrica relativa a cada solución (Capítulo 4.3.2B) y aplicando escalones profundos de referencia de voltaje, con el fin de observar las dinámicas de corriente resultantes. Los resultados se evidencian en las siguientes figuras:

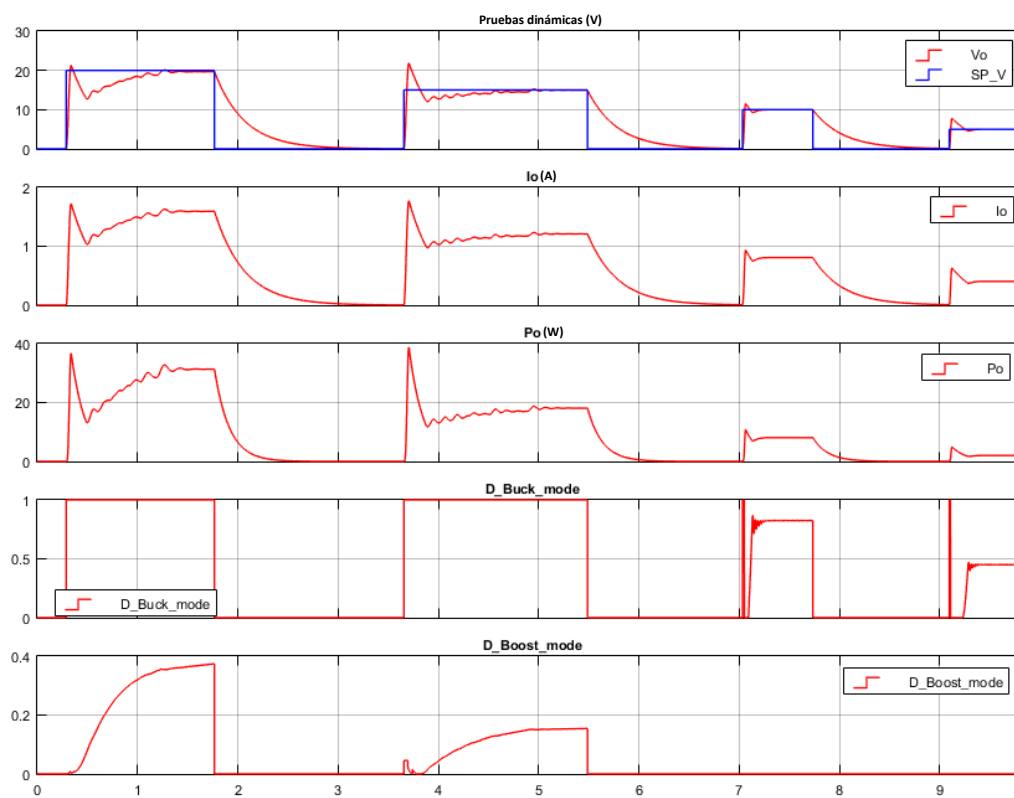


Fig. 9-9 Dinámicas eléctricas para 12.35 Ω (10 mS/cm)

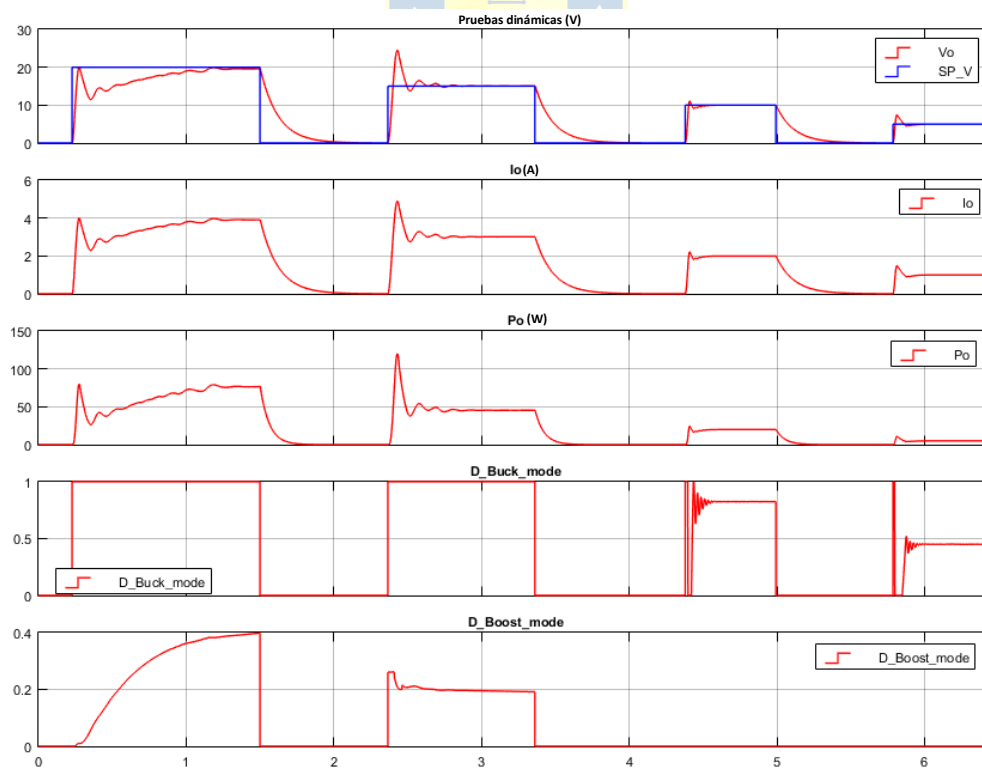


Fig. 9-10 Dinámicas eléctricas para 5.01 Ω (25 mS/cm)

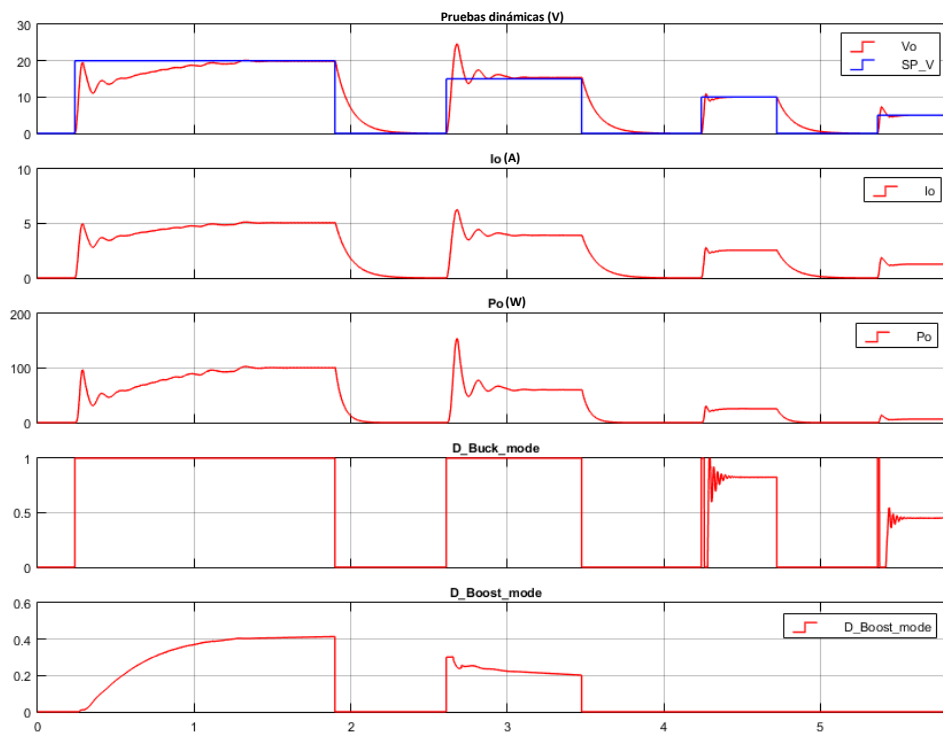


Fig. 9-11 Dinámicas eléctricas para 3.92 Ω (40 mS/cm)

Para los casos evaluados, se encontró un *peak* de corriente máximo de 6 A para mínima resistencia, según se puede observar en la Fig. 9-11. Para el caso de la Fig. 9-10, se obtiene un máximo *peak* de corriente de 5 A, y para el caso de Fig. 9-9, el máximo *peak* fue inferior a 2 A.

En particular, para las dinámicas presentadas en la Fig. 9-11, se tiene que el *peak* de corriente máximo tiene una duración de aproximadamente 0.1 segundos (duración similar para el resto de casos). Esto no resulta perjudicial para el equipo desalador, pues de [6] se tiene que valores altos en la magnitud de corriente sólo se traducen en fenómenos que merman la capacidad de remoción de sal de la celda ED, situación producida por corrientes elevadas durante largos periodos de tiempo. Luego, dada la corta duración de los *peaks* de corriente encontrados, no se alcanzan a producir fenómenos como *fouling* o electrólisis que dañen el equipo electrodiálizador. Por otro lado, como se vio en el análisis desde el punto de vista de la celda ED, las variaciones de voltaje exigidas por el controlador de conductividad no son tan abruptas, de modo que la probabilidad de que se generen corrientes como las mostradas, es en general baja.

En cuanto a la potencia, se evidencia un aumento según mayor sea la conductividad de entrada a la planta. De aquí se evidencia la importancia de operar la planta en modo recirculante y para condiciones eléctricas que tengan la mejor relación entre potencia requerida y capacidad de remoción, de forma que resulte económicamente factible la operación de una planta electrodiálizadora.

Capítulo 10. Conclusiones

10.1. Sumario

Para la realización de este trabajo, se montó una planta piloto donde se implementó una celda electrodiálizadora modelo ED64002. Luego, para efectuar la adquisición de datos correspondiente, se ensambló un sistema de adquisición de datos (DAQ), cuyo software generaba un archivo .csv, que almacenaba toda la data resultante de cada experimentación.

Una vez montada la planta, el sistema de adquisición de datos, y calibrado el sensor/transmisor conductivímetro, se prepararon tres soluciones de agua con NaCl, cuyas conductividades debían estar próximas a 10, 25 y 40 mS/cm. Para cada solución, se realizaron pruebas preliminares, de modo que se determinó la capacidad de desalinización para cada caso, y se estudió el comportamiento resistivo de la celda ED a lo largo de los distintos puntos de operación estudiados.

Con respecto a las soluciones, se decidió trabajar para concentraciones de NaCl que equivalen a conductividades eléctricas inferiores a 40 mS/cm, difiriendo este valor del original establecido (60 mS/cm). Esto a consecuencia de elevadas magnitudes de corriente encontradas producto de la baja resistencia eléctrica en soluciones con conductividades próximas a los 60 mS/cm mencionados.

Así, después de haber realizado el análisis preliminar, se efectuó el análisis dinámico para cada situación, aplicando escalones de 5 V en cada caso, con un rango de 0 a 20V. Para la solución de 40 mS/cm, sin embargo, se trabajó con un voltaje máximo de 17.6 V, pues los 5 A de corriente máximos definidos para la celda ED, fueron alcanzados para dicha magnitud de tensión. Luego, se realizó el análisis dinámico para cambios en la conductividad de entrada, aplicando los escalones de conductividad correspondiente con las tres soluciones ya preparadas.

En cuanto fueron terminadas todas las experimentaciones pertinentes, se importó y procesó en Matlab la información almacenada en los archivos generados por el sistema de adquisición, de modo que se obtuvieron los modelos matemáticos correspondientes a cada zona de operación, que luego fueron implementados en Simulink.

Luego de haber desarrollado el modelo matemático de la celda ED, se establecieron las dimensiones del sistema de energización en términos de cantidad de módulos PV y capacidad del banco de baterías; para así garantizar un tiempo de autonomía que satisfaga requerimientos hídricos en función del volumen de agua desalada y de la concentración de sal esperable. Para realizar la

estimación de consumo de energía, se tomaron los valores típicos de consumo de una planta ED funcional.

Luego de haber seleccionado el tipo de módulo PV y la cantidad de ellos, se construyó un modelo matemático que aproxime del modo más exacto posible el comportamiento del mismo para condiciones variables de temperatura e irradiación. A partir del modelo del arreglo fotovoltaico y de las condiciones de diseño fijadas, se llevó a cabo el diseño de un convertidor Buck; que reduce el voltaje de salida para ajustarlo a la tensión del banco de baterías, y del controlador MPPT; que asegura la máxima extracción de energía del panel para luego ser almacenada en el banco energético.

Para energizar la planta ED, se diseñó un convertidor Buck-Boost con topología de doble switch, que reduce o incrementa el voltaje de 12 V del banco de baterías según lo exija el controlador de conductividad eléctrica de la celda ED.

Con respecto a los controladores, se implementó un control PI para regular la conductividad a la salida de la celda; mientras que para el convertidor Buck-Boost, se implementaron dos controladores también de tipo PI. Ambos controladores se conectaron en topología de cascada, siendo el controlador maestro el PI de conductividad y el controlador esclavo el par de controladores PI del convertidor. Para sintonizar los controladores, se utilizó la herramienta *PID tuner* de Matlab.

Finalmente, al tener implementados ambos sistemas en Simulink, se llevaron a cabo diversas pruebas que resultaron satisfactorias según los objetivos planteados. Sin embargo, no fue posible simular para el modelo matemático de la celda ED y el del sistema PV simultáneamente, por lo que se hicieron pruebas suponiendo el peor caso posible, esto es, cambios de profundidad en la magnitud de voltaje a la entrada de la celda ED para la mínima resistencia a la salida del sistema de energización.

10.2. Conclusiones

A partir del trabajo realizado en laboratorio, se evidenció que la capacidad de remoción de NaCl de la celda electrodiálizadora dio los mejores resultados para la solución de conductividad eléctrica de 25 mS/cm, decayendo para 40 mS/cm por probable cercanía a densidad de corriente límite.

En cuanto a las dinámicas de corriente a través de la celda ED, se encontraron no linealidades frente a incrementos de voltaje en la región comprendida entre los 0 y 5 V para toda solución estudiada, mientras que para valores superiores a 5 V hay una evidente linealidad en dichas dinámicas, estableciendo una constante resistiva de 12.35 Ω , 5.01 Ω y 3.92 Ω para soluciones de 10 mS/cm, 25 mS/cm y 40 mS/cm respectivamente. A partir de las corrientes resultantes, también se encontró que se operó en todo momento para valores inferiores al límite de la densidad de corriente.

Al desarrollar el modelo matemático de la planta de electrodiálisis, se determinó que las dinámicas de la planta electrodiálisis estudiada son satisfactoriamente aproximables por un sistema de primer orden con retardo. En ese sentido, se obtuvieron resultados cuya magnitud de error medio, con respecto a la medición real, fueron inferiores al 0.11%. Lo anterior para las respuestas dinámicas frente a escalones de voltaje. Para el caso de las respuestas dinámicas frente a cambios de conductividad a la entrada a la celda ED, se obtuvieron magnitudes de error medio inferiores a 0.85%.

Para el modelo del módulo fotovoltaico, se obtuvo una potencia de salida nominal de 245 W, que coinciden con lo indicado por el fabricante. El comportamiento de la celda modelada, para variaciones de temperatura de operación e irradiación, es coherente con el comportamiento real (en laboratorio) del módulo PV, según lo muestra el fabricante en las curvas características presentes en la hoja de datos.

Para el convertidor Buck que intercede entre la batería y el arreglo fotovoltaico, se obtuvo que presenta una eficiencia entre 91% y 94%, con un ripple de salida de corriente de 0.1 A. El convertidor Buck-Boost de salida, por su parte, presenta una eficiencia de 91.3%, con un ripple de voltaje de 12 mV_{p-p} y un ripple de corriente de 0.08%, valores muy por debajo del criterio de diseño de 2% para ripple de corriente y 100 mV para ripple de voltaje. Esto es un resultado ventajoso desde el punto de vista de la calidad de las señales de salida del sistema. Para el modo Buck, la respuesta es del tipo oscilatoria amortiguada con sobrepaso, donde el máximo peak de corriente es próximo a 3 A y el tiempo de asentamiento es cercano a los 0.3 seg. En modo Boost, el convertidor no tiene sobrepasos y el tiempo de asentamiento máximo resultante es de aproximadamente 2.2 seg.

Al estudiar el sistema desalador con el controlador implementado, y bajo conductividad de entrada constante, se obtuvo que el tiempo de asentamiento medio fue de aproximadamente 870, 530, y 725 segundos para conductividades de entrada de 11, 25, y 40 mS/cm respectivamente. Se evidenciaron algunos sobrepasos para los dos últimos casos en estudio, donde la magnitud máxima fue de aproximadamente 0.05 mS/cm.

Para el estudio bajo conductividad de entrada variable, se determinó que el controlador es capaz de regular la conductividad de salida según la referencia ajustada, tardando una media aproximada de 1900, 400, y 700 segundos en neutralizar la perturbación para los casos de 11, 25 y 38 mS/cm respectivamente. Esto sólo si la referencia de conductividad está dentro de la capacidad de remoción para el máximo voltaje especificado de 20 V (17.6 para el caso de 40 mS/cm).

Para el caso del sistema de energización, no fue posible realizar el estudio con la celda ED acoplada a la salida, a consecuencia de las limitaciones impuestas por el solver de Simulink. Sin

perjuicio de lo anterior, se realizó el estudio del convertidor para la resistencia eléctrica relativa a cada valor de conductividad eléctrica de entrada, aplicando escalones de referencia de profundidad con el fin de analizar en el peor escenario posible. Los resultados arrojados indican que se alcanzó un *peak* de corriente máximo de 6 A para 3.92Ω (40 mS/cm), 5 A para 5.01Ω (25 mS/cm) y 2 A para 12.35Ω (10 mS/cm). De aquí se tiene que debe ser preferible operar a menor voltaje tanto mayor sea la conductividad de la solución a la entrada de la celda ED, sin embargo, *peaks* de corriente de muy corta duración no dañan o merman el desempeño del equipo. En cuanto a las dinámicas eléctricas para las pruebas mencionadas, tardaron menos de 1.5 segundos en alcanzar s.s. para cada caso, un orden de 10^2 veces más rápidas que los tiempos encontrados para las dinámicas de conductividad de salida.

10.3. Trabajo Futuro

- Extender la cantidad de variables que gobiernan el modelo de la celda ED, implementando sensores de pH, de temperatura, y de flujo en la planta real.
- Diseñar controladores que regulen el flujo a través de los canales de la celda,
- Implementar el sistema PV en un software optimizado para simulación de circuitos, de modo que sea posible simular de forma simultánea ambos sistemas: de energización y de electrodiálisis
- Utilizar el modelo matemático de la celda ED desarrollado para estudiar la operación del equipo configurado en modo de recirculación, de modo que sea posible diseñar un control de tipo batch para obtener volúmenes determinados de agua con cierta conductividad eléctrica esperada.
- Implementar controladores de voltaje y corriente análogos para los convertidores, de modo que mejore la velocidad en las dinámicas, y se supervigile el comportamiento de la corriente, evitando *peaks* que actúen en desmedro del proceso.
- Realizar un estudio en profundidad de las dinámicas eléctricas de la celda ED para variaciones de conductividad de entrada, de modo que se realice un modelo más detallado de la resistencia eléctrica de la misma.
- Realizar estudios de optimización de consumo de energía de la celda ED, de modo que la operación de la misma garantice la mejor relación entre de consumo de energía y capacidad de remoción de minerales.

Bibliografía

- [1] P.E. Troncoso, R.J. Mantz and P.E. Battaiotto, "Electrodialysis Processes Assisted by Photovoltaic Panels. Concentration Control," Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, Aug. 2014.
- [2] H. Strathmann, "Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications," *Desalination*, vol. 264, pp. 268-288, Dec. 2010.
- [3] Natasha C. Wright, Georgia D. Van de Zande, Amos G. Winter V., "Design of a Village-Scale PV Powered Electrodialysis Reversal System for Brackish Water Desalination in India," Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139, USA, Sep. 2015.
- [4] Laura J. Banasiak, Thomas W. Kruttschnitt, and Andrea I. Schäfer, "Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration," in EuroMed '06 conf., Montpellier, France, 21-25 May 2006, pp. 38-46.
- [5] David Valero, Vicente García-García, Eduardo Expósito, Antonio Aldaz and Vicente Montiel, "Application of electrodialysis for the treatment of almond industry wastewater," *Journal of Membrane Science*, vol. 476, pp. 580-589, Nov. 2014.
- [6] Daniella Cardoso Buzzi, Lucas Stéphano Viegas, Marco Antônio Siqueira Rodrigues, Andréa Moura Bernardes, Jorge Alberto Soares Tenório, "Water recovery from acid mine drainage by electrodialysis," *Minerals Engineering*, vol. 40, pp. 82-89, Ene. 2013.
- [7] Ahmed Abou-Shady, Huizhen Xu, Changsheng Peng, "Production of pure water suitable for laboratory experiments by electrodialysis technology," Collage of Engineering, Ocean, University of China (OUC), Qingdao, China, May. 2011.
- [8] M. Sadrzadeh, T. Mohammadi, "Sea water desalination using electrodialysis," *Desalination*, vol. 221, pp. 440-447, Mar. 2008.
- [9] Jing Guolin, Xing Lijie, Li Shulin, "Study of mathematical model in electrodialysis of desalination," in *The 4th int. conf. on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Jun. 2010.

- [10] Zubair Mehmood, Yumna Bilal, Muniba Bashir, and Ali Asghar, "Performance Analysis of MPPT Charge Controller with Single and Series/Parallel Connected PV Panels," Department of Electrical Engineering, University of Gujrat, Gujrat, Pakistan, Jan. 2016.
- [11] Ganesh Baliram Ingale, Subhransu Padhee, and Umesh C. Pati, "Design of stand alone PV system for DC-micro grid," Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India, Apr. 2016.
- [12] *Off Grid PV Power Systems. System Design Guidelines*, SEI-API in collaboration with PPA, Issue 1, Copyright 2012, Sep. 2012.
- [13] *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*, Texas Instruments, SLVA477B, Dec. 2011.
- [14] *Input and Output Capacitor Selection*, Texas Instruments, SLTA055, Feb. 2006.
- [15] *Design Calculations for Buck-Boost Converters*, Texas Instruments, SLVA535A, Aug. 2012.
- [16] S. Shongwe and M. Hanif, "Gauss-Seidel Iteration Based Parameter Estimation for a Single Diode Model of a PV Module," *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Oct. 26-28, 2015, pp. 278-284.
- [17] Abir Chatterjee, Ali Keyhani, and Dhruv Kappor, "Identification of Photovoltaic Source Models," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 883-889, Jun. 2011.
- [18] Dezso Sera, Remus Teodorescu, and Pedro Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE '07*, pp. 2392-2396, Jun. 4-7, 2007.
- [19] Iñigo Larrea, and Sridhar Seshagiri, "Voltage Mode SMC of DC-DC Buck Converters," in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2016*, pp. 534-539, Jun. 8-10, 2016.
- [20] Lopamudra Mitra, and Nibedita Swain, "Closed Loop Control of Solar Powered Boost Converter with PID Controller," in *Proc. of IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers and Energy Systems PEDES 2014*, Dec. 16-19, 2014.

- [21] (2014) Ingelibre blog. Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica. Accessed december 2016. [Online]. Available: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
- [22] Química del Agua. Accessed december 2016. [Online]. Available: <http://www.quimicadelagua.com/Conceptos.Analiticos.Conductividad.html>
- [23] Ministerio de energía de Chile. Accessed november 2016 [Online]. Available: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>
- [24] Propiedades químicas del agua de Mar: Salinidad, Clorinidad y pH. Accessed december 2016. [Online]. Available: http://www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros_1/ciencia2/12/htm/SEC_17.HTM
- [25] (2008) Instituto Nacional de Estadísticas. Población y sociedad, aspectos demográficos. Accessed december 2016 [Online]. Available: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/demografia_y_vitales/demografia/pdf/poblacion_sociedad_enero09.pdf
- [26] MathWorks. Battery: Implement generic battery model. Accessed december 2016 [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>