

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. José R. Espinoza C.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Diseño de una topología y estrategia de control de
una etapa para generación de hidrógeno con paneles
solares sin el uso de baterías.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante
Dr. José R. Espinoza C.

Diseño de una topología y estrategia de control de una etapa para generación de hidrógeno con paneles solares sin el uso de baterías.

Gustavo Marcelo Valenzuela Figueroa

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Abril 2025

Resumen

El uso de energías renovables no convencionales ha ido en aumento en los últimos años debido a su impacto al momento de frenar el cambio climático y reducir los gases de efecto invernadero. Otro vector de vital importancia son los combustibles fósiles, ya que el 76% de las emisiones de gases invernadero provienen de esta fuente. Como alternativa a esto surge el hidrógeno verde, un hidrógeno que se genera con fuentes ERNC. En esta memoria se estudia la factibilidad de alimentar una celda de electrólisis PEM con un arreglo de paneles fotovoltaicos sin el uso de baterías. Al no utilizar baterías, los lazos de control tendrán que regular el sistema en caso de cambios de irradiancia o de temperatura ambiente. Para realizar esto se desarrolla el modelo del arreglo fotovoltaico de modo que la irradiancia del sol y la temperatura ambiente sean variables de entrada. Se comparan los distintos modelos de celdas de electrólisis y se elige el tipo de membrana de intercambio de protones (PEM). Posteriormente se desarrolla el modelo dejando la temperatura de operación de la celda como una variable de entrada. Se une el arreglo de paneles con la celda PEM mediante un convertidor Buck. Luego se simula el modelo de la celda de electrólisis, el modelo del arreglo de paneles solares y el sistema completo sin lazos de control. Se observa que el sistema funciona, pero no en el punto de máxima potencia, por lo que la eficiencia del sistema no era máxima. Para solucionar esto se emplea lazos de control. Un lazo encargado del voltaje en el condensador que se encuentra a la salida del arreglo de paneles solares, y otro lazo que considera la corriente en la celda de electrólisis PEM. Mediante estos dos lazos es posible obtener el ciclo de trabajo del convertidor. Para obtener las ganancias de los controladores, se encuentra la función de transferencia del sistema, y posteriormente la función de transferencia del lazo externo. El voltaje de referencia se encuentra mediante un algoritmo MPPT de observar y perturbar, con el objetivo de que el sistema este siempre trabajando en el MPP. Finalmente se simula con un cambio de irradiancia en forma de parábola inversa. El sistema registra una respuesta positiva al cambio constante de irradiancia, pues en todo momento se encuentra trabajando en el MPP, y la celda de electrólisis no recibe cambios abruptos en su potencia. Eso sí, el sistema colapsa en niveles de irradiancia muy bajos, pues el arreglo de paneles no es capaz de abastecer a la celda PEM. Para solucionar esto se necesita la implementación de un lazo superior, capaz de acoplar la celda cuando la potencia que otorgan los paneles sea suficiente para alimentar la celda PEM.

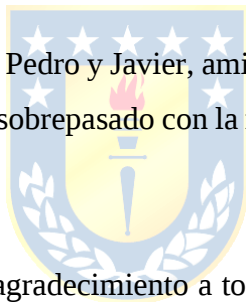
Agradecimientos

Me gustaría empezar agradeciendo a cada una de las personas que me apoyaron durante toda mi etapa universitaria, ya sea con algún consejo, alguna palabra de aliento o con el simple hecho de estar.

Agradecer a mis padres Mario y Sandra por siempre haberme dado el cariño y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, igual que a mis hermanas Natalia y Sofia. Sin ellos nada de esto sería posible.

A mis amigos que han sido parte fundamental en todo este proceso universitario, en especial a Tomás Montecinos, Joaquín Salazar y Felipe Toledo, gracias a ustedes todo el proceso se hizo mucho más abordable y por todas las experiencias vividas.

A Sebastián, Nicolas, Guillermo, Pedro y Javier, amigos desde el colegio que han sido de vital importancia, ya que cada vez que estaba sobrepasado con la memoria podía acudir a ellos, despejarme y volver con las ideas claras.



Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a todos los profesores que tuve a lo largo de mi carrera, por su paciencia, dedicación y siempre excelente disposición. En especial al profesor Dr. José Espinoza Castro, profesor patrocinante de esta memoria de título. Muchas gracias por la paciencia, dedicación y apoyo a lo largo de todo el proceso; y gracias por hacerme reencantarme con la carrera. También agradecer a los profesores Dr. Leonardo Palma Fanjul y Dr. Luis Moran Tamayo por formar parte de la comisión evaluadora y por su nivel de compromiso en las asignaturas que imparten.

Se agradece el apoyo del proyecto ANID / FONDAP / 1523A0006 y ANID / FONDEQUIP / EQM 140148.

Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	15
1.1	INTRODUCCIÓN GENERAL	15
1.2	TRABAJOS PREVIOS	17
1.2.1	Sistemas Fotovoltaicos.....	17
1.2.2	Celdas de electrólisis.....	18
1.2.3	Convertidores.....	19
1.2.4	Sistema Panel-Celda.....	20
1.2.5	Discusión	21
1.2.6	Hipótesis de Trabajo.....	21
1.3	OBJETIVOS	22
1.3.1	Objetivo General	22
1.3.2	Objetivos Específicos.....	22
1.4	ALCANCES Y LIMITACIONES	22
1.5	TEMARIO Y METODOLOGÍA.....	22
Capítulo 2.	Sistemas Fotovoltaicos.....	24
2.1	INTRODUCCIÓN	24
2.2	FUNCIONAMIENTO CELDA FOTOVOLTAICA	24
2.3	CURVAS CELDA FOTOVOLTAICA	28
2.3.1	Efecto de la Irradiación Solar.....	29
2.3.2	Efectos de la Temperatura	31
2.3.3	Interconexión Módulos Fotovoltaicos.....	32
2.4	VALORES DE RESISTENCIA SERIE Y PARALELO.....	34
2.4.1	Método de obtención.....	34
2.4.2	Corriente Fotovoltaica a partir de R_s y R_p	35
2.5	SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA.....	36
2.5.1	Método de Perturbar y Observar	37
Capítulo 3.	Celda de Electrólisis.....	39
3.1	INTRODUCCIÓN	39
3.2	ELECTRÓLISIS	39
3.2.1	Fundamentos.....	40
3.2.2	Tipos de Celdas	41
3.3	MODELO CELDA PEM	45
3.4	CURVA VOLTAJE/DENSIDAD DE CORRIENTE	49
3.4.1	Efecto de la temperatura.....	49
3.4.2	Efecto de la densidad de corriente	50
Capítulo 4.	Convertidor DC/DC	52
4.1	INTRODUCCIÓN	52
4.2	CLASIFICACIÓN	53
4.2.1	Según su configuración topológica.....	53
4.2.2	Según su técnica de modulación.....	54
4.3	MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO	55
Capítulo 5.	Simulación.....	57
5.1	INTRODUCCIÓN	57
5.2	CELDA DE ELECTROLISIS PEM.....	57
5.3	CELDA FOTOVOLTAICA	62
5.4	CONVERTIDOR BUCK.....	65
Capítulo 6.	Control	70
6.1	INTRODUCCIÓN	70

6.2	GANANCIAS CONTROLADORES.....	70
6.3	SIMULACIÓN	76
Capítulo 7.	Conclusiones.....	84
7.1	SUMARIO	84
7.2	CONCLUSIONES	85
7.3	TRABAJOS FUTUROS.....	86
Referencias Bibliográficas		87
Anexo A: Modelo Plecs celda PEM.....		90
Anexo B: Datasheet panel fotovoltaico.....		94
Anexo C: Código Matlab un panel fotovoltaico		96
Anexo D: Modelo Plecs panel fotovoltaico.....		98
Anexo E: Sistema completo sin control		100
Anexo F: Matlab punto de equilibrio		100
Anexo G: Matlab FdeT y Ganancia de los controladores.....		101
Anexo H: MPPT		102
Anexo I: Sistema completo con control		103



Lista de Tablas

Tabla 5.1 Valores simulación celda PEM.....	58
Tabla 5.2 Corriente, voltaje y potencia celda PEM a 80°C	62
Tabla 5.3 Parámetros de simulación celda fotovoltaica	63
Tabla 5.4 Valores resistencia serie y paralelo celda fotovoltaica	63
Tabla 5.5 Ciclo de trabajo convertidor Buck	66
Tabla 5.6 Parámetros convertidor Buck	66
Tabla 5.7 Valor condensador y frecuencia de conmutación	67
Tabla 6.1 Valores para obtener resistencia de la celda mediante ecuación de la recta	71
Tabla 6.2 Parámetros para obtener punto de equilibrio.....	73
Tabla 6.3 Puntos de equilibrio del sistema	73
Tabla 6.4 Variables de estado, entrada y salida del sistema	74
Tabla 6.5 Ganancias controlador lazo ciclo de trabajo.....	75
Tabla 6.6 Ganancia controlador lazo de corriente.....	76



Lista de Figuras

Figura 1-1 Reporte energético octubre 2023 [1]	15
Figura 1-2 Potencial descarbonización del hidrógeno verde [3].....	16
Figura 2-1 Estructura celda solar unión PN [7]	24
Figura 2-2 Circuito equivalente ideal celda solar.....	25
Figura 2-3 Circuito equivalente celda solar	26
Figura 2-4 Forma curvas IV y PV panel solar [8].....	28
Figura 2-5 Origen comportamiento curva IV [7].....	29
Figura 2-6 Cambio de irradiancia curva IV [9].....	30
Figura 2-7 Cambio de irradiancia curva PV [9].....	30
Figura 2-8 Cambio de temperatura curva IV [9].....	31
Figura 2-9 Cambio de temperatura curva PV [9].....	31
Figura 2-10 Módulos fotovoltaicos en serie [10].....	32
Figura 2-11 Módulos fotovoltaicos en paralelo [10].....	32
Figura 2-12 Módulos fotovoltaicos en serie y paralelo [10].....	32
Figura 2-13 Algoritmo MPP P&O [14].....	38
Figura 3-1 Primera ley de Faraday [17].....	40
Figura 3-2 Celda de electrólisis alcalina [16]	41
Figura 3-3 Celda de electrólisis de óxido sólido [16].....	42
Figura 3-4 Celda de electrólisis microbiana [16].....	43
Figura 3-5 Celda de electrólisis membrana de intercambio de protones [16]	44
Figura 3-6 Curva VI celda PEM [18].....	48
Figura 3-7 Efecto temperatura celda PEM [20]	49
Figura 3-8 Efecto cambio de densidad de corriente en el ánodo [20]	50
Figura 3-9 Efecto cambio de densidad de corriente en el cátodo [20]	51
Figura 4-1 Ciclo de trabajo convertidor [21]	52
Figura 4-2 Convertidor reductor o Buck	53
Figura 4-3 Convertidor elevador o Boost	54
Figura 4-4 Convertidor reductor elevador o Buck-Boost.....	54
Figura 4-5 Relación señales portadora y moduladora	55
Figura 4-6 Porcentaje ciclo de trabajo [22]	56

Figura 5-1 Simulación curva VI celda PEM distintas temperaturas	59
Figura 5-2 Curva VI distintas temperaturas celda PEM [18]	60
Figura 5-3 Simulación curva VI celda PEM temperatura arbitraria	61
Figura 5-4 Simulación curva VI celda PEM 80°C.....	61
Figura 5-5 Simulación Panel fotovoltaico 1000 W/m ² y 25°C a) Curva PV b) Curva IV	64
Figura 5-6 Simulación panel fotovoltaico 25°C y distintas irradiancias a) Curva PV b) Curva IV ..	64
Figura 5-7 Panel fotovoltaico datasheet a) Curva PV b) Curva IV	65
Figura 5-8 Simulación arreglo 12 paneles en paralelo a) Curva PV b) Curva IV	65
Figura 5-9 Modelo convertidor Buck utilizado.....	67
Figura 5-10 Sistema completo sin control	67
Figura 5-11 Voltaje, corriente y potencia de paneles y celda PEM sin control.....	68
Figura 5-12 MPP sistema sin control	68
Figura 5-13 Voltaje, corriente y potencia del sistema ante cambio en irradiancia sin control	69
Figura 5-14 MPP sistema sin control ante cambio de irradiancia.....	69
Figura 6-1 Sistema con esquema de control	70
Figura 6-2 Modelo mediante fuentes dependientes del sistema completo	72
Figura 6-3 Voltaje, corriente y potencia sistema solo con controlador ciclo de trabajo	77
Figura 6-4 MPP sistema solo con controlador ciclo de trabajo	77
Figura 6-5 Ciclo de trabajo solo con controlador ciclo de trabajo	78
Figura 6-6 Voltaje, corriente y potencia sistema con controlador ciclo de trabajo y controlador de corriente	79
Figura 6-7 MPP sistema con controlador ciclo de trabajo y controlador de corriente.....	79
Figura 6-8 Ciclo de trabajo con controlador ciclo de trabajo y controlador de corriente.....	80
Figura 6-9 Cambio de irradiancia sistema con control completo	81
Figura 6-10 Voltaje, corriente y potencia sistema con control completo.....	81
Figura 6-11 MPP de sistema con control completo	82
Figura 6-12 Voltaje de referencia y voltaje del condensador con control completo.....	82
Figura 6-13 Ciclo de trabajo sistema con control completo	83

Nomenclatura

Matrices

- A** : Matriz de parámetros de dimensión 2x2.
B : Matriz de parámetros de dimensión 2x1.
C : Matriz de parámetros de dimensión 1x1.
D : Matriz de parámetros de dimensión 1x1.

Vectores

- u** : Vector de 1 variable de entrada, $u = [D]$.
x : Vector de 2 variables de estado, $x = \begin{bmatrix} v_c \\ i_{cell} \end{bmatrix}$.
y : Vector de 1 variable de salida, $y = [i_{cell}]$.

Escalares

- a : Coeficiente de idealidad del diodo.
 α_a : Coeficiente de transferencia de carga en el ánodo.
 α_c : Coeficiente de transferencia de carga en el cátodo.
 CO_2 : Dióxido de Carbono.
 C : Condensador del Convertidor $[F]$.
 $C_{PI,D}$: Controlador proporcional integral, lazo ciclo de trabajo.
 $C_{PI,I}$: Controlador proporcional integral, lazo corriente.
 D : Ciclo de trabajo.
 F : Constante de Faraday $\left[\frac{J}{mol}\right]$.
 f : Frecuencia de conmutación $[Hz]$.
 G : Irradiancia $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
 $G_D(s)$: Función de transferencia planta, plano Laplace.
 $G_I(s)$: Función de transferencia control, plano Laplace.
 G_n : Irradiancia nominal $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
 H_2 : Hidrógeno.

H_2O	: Agua.
I_{mp}	: Corriente a la máxima potencia [A].
$I_{ph,n}$	: Corriente fotoeléctrica nominal [A].
$I_{sc,n}$	: Corriente de cortocircuito nominal [A].
i_a	: Densidad de corriente en el ánodo $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$.
$i_{PV,array}$	: Corriente total arreglo fotovoltaico [A].
i_c	: Densidad de corriente en el cátodo $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$.
i_{celda_i}	: Corriente celda fotovoltaica [A].
i_{cell}	: Densidad de corriente celda electrólisis $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$.
i_d	: Corriente en el diodo [A].
$i_{el,cell}$	: Corriente total celda electrólisis [A].
$i_{L,a}$	: Corriente limitante $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$.
i_o	: Corriente de saturación inversa del diodo [A].
$i_{o,a}$	: Densidad de corriente de intercambio del ánodo $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$.
$i_{o,c}$	: Densidad de corriente de intercambio del cátodo $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$.
i_{ph}	: Corriente fotovoltaica [A].
$i_{PV,array}$	: Corriente arreglo paneles solares [A].
i_{sw}	: Corriente en el interruptor.
K_I	: Coeficiente Corriente/Temperatura de corto circuito $\left[\frac{\%}{^\circ C}\right]$.
$K_{i,D}$	: Ganancia integral, lazo ciclo de trabajo.
$K_{i,I}$	: Ganancia integral, lazo corriente.
KOH	: Hidróxido de potasio.
$K_{p,D}$	: Ganancia proporcional, lazo ciclo de trabajo.
$K_{p,I}$	: Ganancia proporcional, lazo corriente.
K_V	: Coeficiente Voltaje/Temperatura de circuito abierto $\left[\frac{\%}{^\circ C}\right]$.
k	: Constante de Boltzmann $\left[\frac{J}{K}\right]$.
L	: Inductancia del convertidor [H].

$NaOH$	: Hidróxido de sodio.
N_p	: Número de paneles en paralelo.
N_s	: Número de paneles en serie.
n	: Factor de idealidad del módulo,
n_{mat}	: Factor del material de la celda.
n_s	: Número de celdas en serie.
η_a	: Sobretensión de activación del ánodo [V].
η_c	: Sobretensión de activación del cátodo [V].
$\eta_{electrodes}$	: Sobretensión en los electrodos [V].
η_{ion}	: Sobretensión iónica [V].
η_{ohm}	: Sobretensión óhmica [V].
O_2	: Oxígeno.
OH^-	: Ion de hidróxido.
$\sigma_{m,ref}$	: Conductividad de referencia de la celda $\left[\frac{s}{cm}\right]$.
$p_{el,cell}$	: Potencia total celda electrolisis [W].
q	: Carga de un electrón [C].
R	: Constante de los gases $\left[\frac{J}{K \cdot mol}\right]$.
R_c	: Resistencia celda [Ω].
R_l	: Resistencia interfacial normalizada [Ω].
R_p	: Resistencia paralelo arreglo [Ω].
R_s	: Resistencia serie arreglo [Ω].
R_1	: Resistencia 1 del convertidor [Ω].
R_2	: Resistencia 2 del convertidor [Ω].
R_3	: Resistencia 3 del convertidor [Ω].
sw	: Estado del interruptor.
T	: Temperatura [K].
T_{con}	: Periodo [s].
T_n	: Temperatura nominal [K].
T_{ref}	: Temperatura referencia [K].
t_m	: Grosor Celda [m].

t_{off}	: Tiempo apagado [s].
t_{on}	: Tiempo encendido [s].
$V_{ext,PEM}$	: Voltaje extra, celda PEM [V].
V_{mp}	: Voltaje a la máxima potencia [V].
V_{oce}	: Voltaje circuito abierto modelo simplificado [V].
$V_{oc,n}$	: Voltaje de circuito abierto nominal [V].
$V_{op,cell}$	: Voltaje circuito abierto [V].
V_t	: Voltaje térmico [V].
$v_{array,PV}$	: Voltaje total arreglo fotovoltaico [V].
v_c	: Voltaje en el condensador C [V].
v_{celda_i}	: Voltaje celda fotovoltaica [V].
$v_{el,cell}$	: Voltaje total celda electrólisis [V].
$v_{exp,PEM}$	: Voltaje exponencial, celda PEM [V].
$v_{PV,array}$	: Voltaje arreglo paneles solares [V].
v_i	: Voltaje de entrada, convertidor [V].
v_o	: Voltaje de salida, convertidor [V].
v_{sw}	: Voltaje en el interruptor.
z	: Coeficiente estequiométrico del número de electrones.
Δ_T	: Delta temperatura [K].

Abreviaciones

AC	: Corriente alterna.
DC	: Corriente continua.
ERNC	: Energías renovables no convencionales.
FdeT	: Función de transferencia.
GDL	: Capa de difusión de gas.
MEC	: Celda de electrólisis microbiana.
MPP	: Punto de máxima potencia.

MPPT : Seguimiento punto de máxima potencia.

NOCT : Temperatura normal de condiciones de la célula.

PEM : Celda de membrana de intercambio de protones.

PELP : Planificación energética de largo plazo.

PES : Puesta en servicio.

PI : Proporcional integral.

P&O : Perturbar y observar.

SEN : Sistema eléctrico nacional.

SOE : Celda de electrólisis de óxido sólido.

STC : Condiciones estándar de prueba.

WAE : Celda de electrólisis alcalina.



Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción General

Con vistas al futuro de nuestro planeta se vuelve de vital importancia adoptar una matriz energética más limpia con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático.

Aquí es donde entran en juego la importancia de abastecer la matriz energética con energías renovables no convencionales (ERNC); energías que destacan por contribuir a mitigar el cambio climático debido a su bajo impacto en el medio ambiente.

A octubre de 2023 el sistema eléctrico nacional (SEN) tiene instalada una capacidad de 34.653,0 [MW] de los cuales 15.521,2 [MW] corresponden a ERNC [1].

Dentro de la potencia instalada en el SEN las principales energías corresponden a: Solar, hidroeléctrica, gas natural y eólica. La lista completa se presenta a continuación.

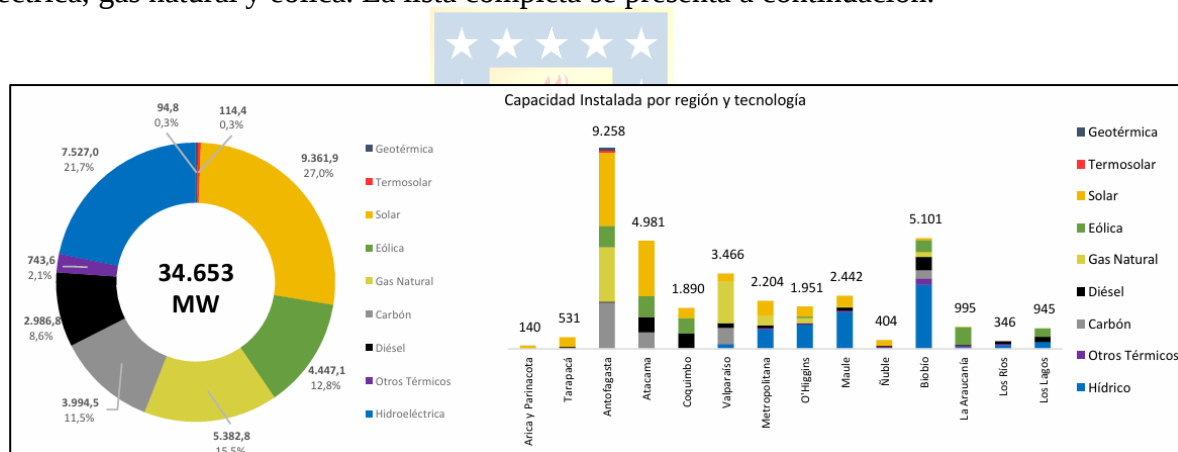


Figura 1-1 Reporte energético octubre 2023 [1]

Otro vector importante para la descarbonización de la matriz energética son los combustibles, pues, el 63% del consumo final de energía proviene de fuentes fósiles, sin considerar los combustibles fósiles utilizados para la generación de electricidad, y este sector es responsable del 76% de las emisiones de gases invernadero de nuestro país. El 22% del uso energético final de nuestro país es suministrado por electricidad y las proyecciones en la planificación energética de largo plazo (PELP) 2022-2060 muestran que la electrificación directa podría aumentar hasta un 50%. [2]. De ahí la importancia que tiene el hidrógeno verde ya que este es el combustible que permite llegar a estos niveles de electrificación debido a que se obtiene a partir de energías renovables. A continuación, se

presenta la Figura 1-2 donde se puede apreciar el potencial de descarbonización del hidrógeno verde:

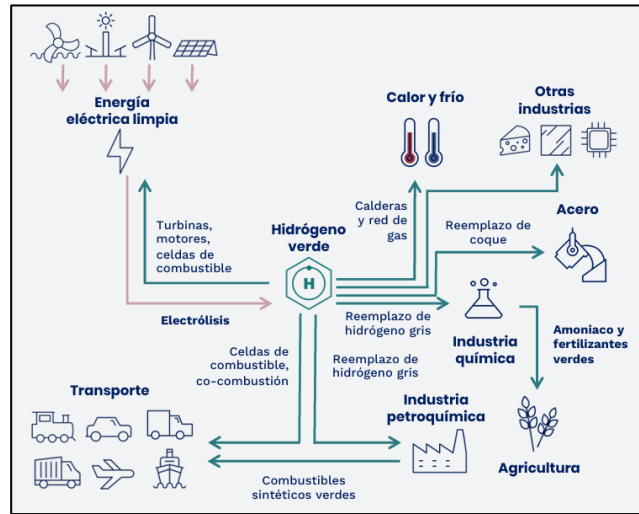


Figura 1-2 Potencial descarbonización del hidrógeno verde [3]

Otra ventaja que presenta el hidrógeno verde es que se puede utilizar la infraestructura existente de gaseoductos para su transporte [4]. Esta alternativa debe evaluarse para cada sistema existente, ya que estos pueden requerir mejoras en su infraestructura. En algunos casos, resulta más viable adaptar el sistema actual que construir uno nuevo. Por ejemplo, puede ser necesario reemplazar o recubrir las tuberías, debido a que el hidrógeno puede debilitar ciertos materiales y facilitar su fragilización. Otro aspecto de vital importancia es la mejora de los sellos y de los sistemas de detección de fugas, ya que, al tener un tamaño molecular menor que el metano, el hidrógeno presenta una mayor probabilidad de fuga si el sistema no es adecuadamente acondicionado.

En el presente informe se presenta un modelo en el cual se abastecen 7 celdas en serie de hidrógeno verde mediante paneles solares sin el uso de baterías. En reemplazo del actuar de la batería sobre el sistema, se emplea el uso de lazos de control retroalimentados. Al utilizar lazos de control en vez de baterías también se disminuye el nivel de contaminación que ocurre en las plantas de reciclaje de baterías, ya que estas al tener ácido contaminan el suelo, pudiendo incluso llegar a contaminar fuentes de agua, afectando la salud de trabajadores y de población civil [5].

1.2 Trabajos Previos

En este apartado se menciona la literatura que fue leída y analizada antes de empezar a realizar la memoria de título. Se analiza literatura correspondiente a sistemas fotovoltaicos, a celdas de electrólisis, convertidores y algoritmos capaces de seguir el punto de máxima potencia.

1.2.1 Sistemas Fotovoltaicos

♣ M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," en *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009.

En este paper se desarrolla el modelo mediante el cual se representa el comportamiento de una celda fotovoltaica. Se empieza por un modelo simple el cual trata a la temperatura ambiental y a la irradiancia del sol como constantes, desarrollando los térmicos hasta tener la temperatura e irradiancia como una entrada. También se desarrolla un método iterativo para obtener la resistencia serie y resistencia paralela.

♣ M. Matam, "PV Array IV Curves: Why We See Them The Way We Do?," *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Calgary, AB, Canada, pp. 1578-1580, 2020.

Este paper desarrolla el concepto de los arreglos fotovoltaicos y como su interconexión afecta el voltaje y corriente final del arreglo. Haciendo diferencia entre conexión serie, que aumenta los niveles de voltaje, o conexión paralela, que aumenta los niveles de corriente. También muestra el efecto que tendría la pérdida de algún panel en su sistema de varios paneles interconectados.

♣ M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays," *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, pp. 1244-1254, 2009.

El paper habla sobre el desarrollo del modelo de una celda fotovoltaica con un modelo más complejo del usado normalmente en la literatura desarrollando desde los conceptos más simples como por ejemplo por qué se modela una celda mediante un diodo, hasta conceptos más avanzados como

pueden ser el efecto de los coeficientes voltaje/temperatura y corriente/temperatura. Al final se desarrolla un modelo en Simulink que sea capaz de replicar una celda fotovoltaica.

♣ Singh, O. P., Bhalla, D. K., & Yadav, U. “Modeling and analysis of MPTT control techniques for grid connected PV generation”. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, Volumen 3, Número 4, páginas 324-330, julio-septiembre 2016.

En este paper se explican los distintos algoritmos existentes para encontrar el punto de máxima potencia en un sistema. Explica específicamente el método de perturbar y observar, método de lógica difusa y el método incremental de conductancia. Muestra su diagrama de flujo y se comparan las ventajas y desventajas de cada uno.

1.2.2 Celdas de electrólisis

♣ S. Shiva Kumar, V. Himabindu, “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review”, *Materials Science for Energy Technologies*, Volumen 2, Número 3, Páginas 442-454, mayo 2019.

En este artículo se desarrolla el concepto de electrólisis, se explica por qué ocurre y cuáles son los tipos de celdas que pueden llevar a cabo este proceso. Se mencionan las celdas de óxido sólido, celdas microbianas, celdas alcalinas y celdas de membrana de intercambio de protones. Se desarrollan sus procesos químicos, los materiales que emplean y a que temperatura operan, con el objetivo de ver cuál conviene utilizar en cada caso.

♣ D.S. Falcão, A.M.F.R. Pinto, “A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners”, *Journal of Cleaner Production*, Volumen 261, abril 2020.

El paper explica todo el concepto de la electrólisis desde lo básico hasta conceptos más complejos como las densidades de corriente, y el motivo por lo que en la literatura existente aún no se pueden encontrar valores exactos sin tener que realizar mediciones en laboratorios.

♣ García-Valverde, R., Miguel, C., Martínez-Bejar, R., & Urbina, A. "Optimized photovoltaic generator-water electrolyser coupling through a controlled DC-DC converter". *International journal of hydrogen energy*, 33, 5352-5362. septiembre 2008.

El paper se centra en un sistema compuesto por un arreglo de celdas de electrólisis del tipo PEM, un arreglo de paneles solares y un convertidor Buck-Boost sin el uso de baterías. Este paper desarrolla los modelos tanto del panel como de la celda PEM, de modo que varíen con la temperatura. Se utiliza un algoritmo MPPT para obtener la máxima potencia que puede entregar el arreglo independiente del nivel de irradiancia y de temperatura.

♣ A. H. A. Rahim, A. S. Tijani, F. H. Shukri, S. Hanapi and K. I. Sainan, "Mathematical modelling and simulation analysis of PEM electrolyzer system for hydrogen production," *3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT) 2014*, Kuching, pp. 1-7, 2014.

Este paper desarrolla el concepto de una celda de electrólisis del tipo membrana de intercambio de protones y muestra cómo cambia su comportamiento dependiendo de variables externas, como lo pueden ser la temperatura de operación de la celda, distintos niveles de densidad de corriente, tanto en el ánodo como en el cátodo. Y como dependiendo de los valores de los parámetros varía la producción de hidrógeno y los valores de conductancia de la celda.

1.2.3 Convertidores

♣ Dariusz Czarkowski, *Power Electronics Handbook* (Tercera edición), capítulo 13 - DC-DC Converters, Editor: Muhammad H. Rashid, Editorial: Butterworth-Heinemann, Páginas 249-263, enero 2011.

En este libro de desarrollan los convertidores, mostrando las diferencias que existen, dependiendo de su técnica de modulación o del uso para el cual sea necesitado. Se muestran desde los convertidores básicos como lo son el Buck, Boost y Buck-Boost; hasta convertidores más complejos como por ejemplo el convertidor Push-Pull, Half Bridge, Full Bridge, Flyback entre otros.

♣ Marulanda Durango, J. J., Ordoñez, J. J., & Mosquera Machado, L. F. “Diseño y construcción de un convertidor dc/dc tipo Boost con PWM ajustable”. *Scientia Et Technica*, 22(1), 9-14, marzo 2017.

El presente estudio detalla el proceso de diseño de un convertidor, abarcando desde la elección del tipo de convertidor hasta la determinación de los parámetros de sus componentes. Para la modulación se implementa una modulación PWM ajustable y posteriormente se realiza una simulación computacional.

1.2.4 Sistema Panel-Celda

♣Biddyut Paul, John Andrews, “Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in solar–hydrogen systems for remote area power supply”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volumen 33, Número 2, Páginas 490-498, 2008.

Los autores proponen un modelo que consiste en un arreglo de celdas fotovoltaicas conectado directamente a una celda de electrólisis tipo PEM. En su estudio, se analizan las curvas IV tanto de los paneles solares como de la celda de electrólisis, con el objetivo de encontrar una configuración óptima de los paneles solares que permita la coincidencia entre ambas curvas. Una vez determinada la cantidad adecuada de módulos en serie y en paralelo, se logra alcanzar hasta un 94 % de la potencia máxima que pueden entregar los paneles.

♣Antonio Sánchez-Squella, Ricardo Flores, Rolando Burgos, Felipe Morales, Andrés Nader, Patricio Valdivia-Lefort, “99.6% efficiency DC-DC coupling for green hydrogen production using PEM electrolyzer, photovoltaic generation and battery storage operating in an off-grid área”, *Renewable Energy*, Volumen 237, Parte C, 2024.

En este paper, los autores presentan un modelo que emplea un sistema compuesto por un arreglo fotovoltaico, una celda de electrólisis, un convertidor y baterías. Se propone un esquema de control que almacena energía cuando la irradiancia diaria supera la irradiancia histórica correspondiente a ese día. Durante las horas con bajos niveles de irradiancia, el sistema utiliza la

energía previamente almacenada, lo que permite evitar grandes fluctuaciones de corriente en el electrolizador.

1.2.5 Discusión

Los sistemas fotovoltaicos han sido ampliamente estudiados en los últimos años, centrándose en encontrar un modelo representativo capaz de tener en consideración factores ambientales como la temperatura, la irradiancia, la temperatura del viento y su velocidad. También se ha estudiado ampliamente los materiales de construcción de las celdas solares y como volverlos más eficientes y que ocupen menos espacio. Otra área de gran relevancia es la búsqueda del punto de máxima potencia, ya que contar con un sistema capaz de encontrarlo de manera eficiente, permite minimizar los intervalos de tiempo donde el funcionamiento del sistema no es óptimo.

En cuanto a las celdas de electrólisis, las investigaciones se centran en los tipos existentes de celdas de electrólisis, cuál es el proceso químico que realiza cada una para cumplir su función y en qué condiciones conviene utilizar cada tipo. Igual se desarrolla un modelo capaz de representar con fidelidad el comportamiento físico de una celda, considerando variables la temperatura a la que opera, y obteniendo parámetros confiables independiente de la presión de trabajo y los materiales de construcción.

La conexión entre estos dos componentes se realiza a través de un convertidor DC/DC. Para evitar que la celda de electrólisis experimente grandes variaciones de corriente, se incorpora el uso de baterías. Diversos autores han propuesto distintos modelos para el funcionamiento óptimo del sistema panel fotovoltaico–celda de electrólisis sin baterías. Estas propuestas incluyen estrategias de control orientadas a minimizar las variaciones de potencia en la celda, garantizar la operación del sistema en el punto de máxima potencia (MPP) y maximizar la eficiencia en la producción de hidrógeno.

1.2.6 Hipótesis de Trabajo

Es posible desarrollar un modelo matemático capaz de representar un arreglo de paneles solares teniendo la irradiancia y la temperatura como variables de entradas, conectado a una celda de electrólisis mediante un convertidor controlado, entonces es posible prescindir de componentes de almacenamiento de energía y mantener el sistema operando en su punto de máxima potencia únicamente mediante la implementación de lazos de control.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer una topología DC/DC y una estrategia de control que conecte un panel solar con una celda de hidrógeno sin el uso de baterías de almacenamiento y que permita extraer la máxima energía desde los paneles para generación de hidrógeno.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la topología óptima del convertidor DC/DC que conecta el panel solar con la celda electrolítica.
- Diseñar y sintonizar los lazos de control, tanto de voltaje como de corriente del convertidor DC/DC de forma de obtener siempre la máxima potencia desde el panel solar.

1.4 Alcances y Limitaciones

Los modelos y simulaciones se implementan en la aplicación de PLECS. Los distintos cálculos de parámetros a lo largo del informe se obtuvieron de Matlab. El modelo consta de un arreglo de paneles solares, constituido de 12 módulos en paralelo. El módulo fotovoltaico es TheTallMax Framed 144 Layout Module TSM-DE17M(II) de TrinaSolar. Cada módulo genera 445 [W], aportando el arreglo 5340 [W] en condiciones STC. Los componentes tales como capacitores, inductores, resistencias, switches y transistores utilizados para el convertidor DC/DC fueron considerados como ideales. Para la celda de electrólisis se opta por utilizar celdas del tipo Proton Exchange Membrane (PEM). Se utiliza un arreglo de 7 celdas PEM en serie. Se utiliza como modelo la celda desarrollada en la referencia [18] y en el Capítulo 3 se desarrolla más a fondo sus propiedades.

Finalmente, para poder implementar el algoritmo de MPPT se utilizó el bloque de C-Script de PLECS el cual utiliza lenguaje de programación C.

1.5 Temario y Metodología

Esta memoria de título consta de 7 capítulos, en los cuales se presentan los modelos a utilizar, las ecuaciones que rigen a los respectivos modelos y sus simulaciones.

En el capítulo 1 se presenta una introducción general donde se presenta la problemática a resolver, que información previa se conoce para llevar a cabo de mejor manera esta investigación, los objetivos del trabajo y finalmente como se lleva a cabo.

En el capítulo 2 se presenta los sistemas fotovoltaicos, desde el más simple llegando a un modelo más complejo mediante desarrollo matemático. Igual se analizan cuáles son las variables que impactan en el comportamiento del arreglo fotovoltaico y mediante qué métodos se puede obtener su máxima potencia.

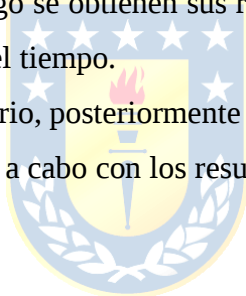
En el capítulo 3 se estudia las celdas que llevan a cabo el proceso de electrólisis. Los tipos existentes, que ventajas y desventajas presentan en comparación a otras, que factores externos e internos cambian su comportamiento y su respectivo modelo matemático.

En el capítulo 4 se presentan los distintos tipos de convertidores, su clasificación por topología y los métodos de modulación que existen para su control.

En el capítulo 5 se simulan las respectivas partes del sistema completo; tanto arreglo fotovoltaico, celda de electrólisis y convertidor con sus respectivos valores comerciales. También se comparan con los datasheets de los cuales se obtuvieron los parámetros para la simulación.

En el capítulo 6 se realiza el control del sistema. Se presenta la función de transferencia del sistema simulado en el capítulo 5, y luego se obtienen sus respectivas ganancias. Luego se simula el sistema con una irradiancia variante en el tiempo.

En el capítulo 7 se realiza un sumario, posteriormente las conclusiones del trabajo, y finalmente los trabajos futuros que se pueden llevar a cabo con los resultados obtenidos.



Capítulo 2. Sistemas Fotovoltaicos

2.1 Introducción

La introducción muestra, específicamente en la Figura 1-1, que el país tiene un gran potencial a lo que generación de ERNC se refiere, específicamente en energía solar. Según el reporte energético del SEN a fecha de octubre de 2023 en Chile hay 9361,9 [MW] de capacidad instalada, y hay 911.25 [GW] en proyectos en prueba o puesta en servicio (PES).

Normalmente los arreglos de paneles fotovoltaicos se conectan mediante un inversor a la red eléctrica, ya que estos generan corriente directa (DC), y mediante el inversor llega esta corriente en forma de corriente alterna (AC). Para el caso del modelo de este informe, el arreglo de paneles solares no se conectará a la red eléctrica nacional.

En este capítulo se muestra cómo funciona un arreglo de paneles solares, desde que se capta la luz solar hasta que se transforma en energía y cuáles son las ecuaciones que lo rigen para que ocurra este fenómeno.

2.2 Funcionamiento Celda Fotovoltaica

En la actualidad casi toda la conversión de energía fotovoltaica utiliza materiales semiconductores con unión del tipo PN. Usar una unión con estas características nos permite que la corriente fluya en la dirección deseada (polarización directa) pero no en la opuesta (polarización inversa), replicando de esta manera el comportamiento de un diodo básico [6]. La mayoría de las celdas solares están fabricadas a base de silicio. Uno de los lados de la capa de silicio es dopada para de esta forma crear la unión PN, sumado al hecho de que en su superficie se pone una rejilla metálica, esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 2-1. La generación de cargas ocurre cuando la energía del fotón es suficiente para liberar los electrones del enlace covalente del semiconductor [6]. Este electrón se mueve hacia el material n y el hueco hacia el material p, este movimiento genera un voltaje. Finalmente, la rejilla recoge los electrones de la capa n y la base metálica recoge los huecos de la capa p.

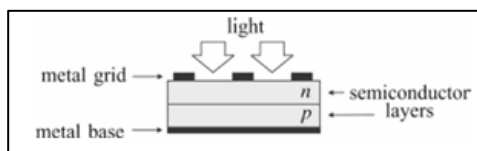


Figura 2-1 Estructura celda solar unión PN [7]

El modelo más utilizado en la literatura debido a su simpleza es el modelo de un diodo de Shockley. Este modelo solo tiene en consideración los fenómenos estáticos que ocurren en la celda solar. El circuito equivalente del modelo ideal se puede apreciar en la Figura 2-2.

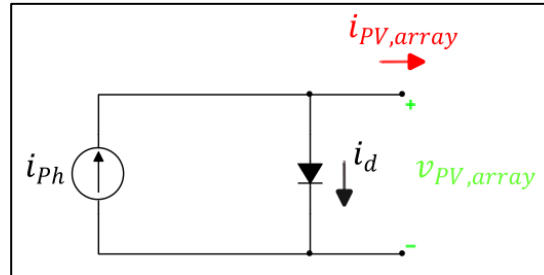


Figura 2-2 Circuito equivalente ideal celda solar

Al utilizar leyes de Kirchhoff de corriente (LCK) sobre el circuito que muestra la Figura 2-2 se obtiene la siguiente ecuación:

$$i_{PV,array} = i_{ph} - i_d, \quad (2.1)$$

donde,

- $i_{PV,array}$: Corriente arreglo paneles solares [A],
- i_{ph} : Corriente fotovoltaica [A],
- i_d : Corriente en el diodo [A].

I_d se puede reemplazar en la ecuación (2.1) quedando:

$$i_{PV,array} = i_{ph} - i_o * \left(e^{\left(\frac{q * v_{PV,array}}{a * k * T} \right)} - 1 \right), \quad (2.2)$$

donde,

- i_o : Corriente de saturación inversa del diodo [A],
- q : Carga de un electrón [C],
- $v_{PV,array}$: Voltaje arreglo paneles solares [V],
- a : Coeficiente de idealidad del diodo,
- k : Constante de Boltzmann $\left[\frac{J}{K} \right]$,
- T : Temperatura [K].

Para simplificar la forma de visualización se puede reemplazar la temperatura en kelvin, la constante de Boltzmann y la carga del electrón por el voltaje térmico [V].

$$V_t = \frac{k*T}{q}. \quad (2.3)$$

Como se menciona anteriormente, un arreglo está compuesto por varias celdas, por lo que para representar de forma correcta el comportamiento que tendrá el arreglo es necesario agregar nuevos parámetros.

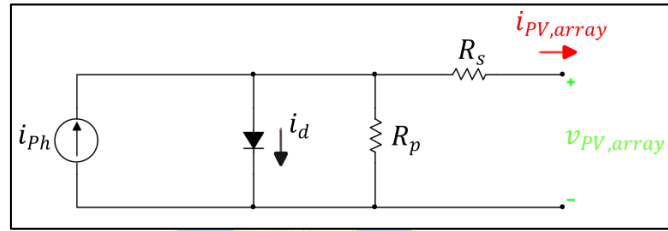


Figura 2-3 Circuito equivalente celda solar

Al realizar LCK sobre el circuito mostrado en la Figura 2-3 y teniendo en consideración (2.3) se obtiene la siguiente ecuación para el modelo:

$$i_{PV,array} = i_{ph} - i_o \left(e^{\left(\frac{v_{PV,array} + R_s * i_{PV,array}}{V_t * a} \right)} - 1 \right) - \frac{v_{PV,array} + R_s * i_{PV,array}}{R_p}, \quad (2.4)$$

donde,

R_s : Resistencia serie arreglo [Ω],

R_p : Resistencia paralelo arreglo [Ω].

En el circuito presentado en Figura 2-3 la fuente de corriente ideal representa la corriente fotoeléctrica, la juntura del tipo PN está representada por el diodo, R_s representa las pérdidas por contacto del metal, mientras que R_p representa las pérdidas de fuga de este mismo. Los valores de corriente de saturación inversa del diodo y corriente fotovoltaica cambian dependiendo de las condiciones ambientales como la temperatura del ambiente y la irradiancia solar [8]

Para que el modelo sea más realista en [7] se presentan una serie de reemplazos en la ecuación (2.4) con:

$$\Delta_T = T - T_n, \quad (2.5)$$

donde,

- Δ_T : Delta temperatura [K],
- T : Temperatura [K],
- T_n : Temperatura nominal [K].

El primer término en modificarse es la corriente fotoeléctrica (i_{ph}) quedando:

$$i_{ph} = (I_{ph,n} + K_V * \Delta_T) \frac{G}{G_n}, \quad (2.6)$$

donde,

- $I_{ph,n}$: Corriente fotoeléctrica nominal [A],
- K_V : Coeficiente Voltaje/Temperatura de circuito abierto $\left[\frac{\%}{^\circ\text{C}}\right]$,
- Δ_T : Delta temperatura [K],
- G : Irradiancia $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$,
- G_n : Irradiancia nominal $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$.



Con estos cambios, ahora la corriente fotoeléctrica depende directamente de la temperatura y de la irradiancia.

El siguiente término en verse modificado es la corriente de saturación inversa del diodo (i_o).

$$i_o = \frac{I_{sc,n} + K_I * \Delta_T}{e^{\left(V_{oc,n} + \frac{K_V * \Delta_T}{V_t * \alpha}\right)} - 1}, \quad (2.7)$$

donde,

- $I_{sc,n}$: Corriente de cortocircuito nominal [A],
- K_I : Coeficiente Corriente/Temperatura de corto circuito $\left[\frac{\%}{^\circ\text{C}}\right]$,
- $V_{oc,n}$: Voltaje de circuito abierto nominal [V].

Finalmente reemplazando (2.6) y (2.7) en (2.4), se obtiene la ecuación:

$$i_{PV,array} = (I_{Ph,n} + K_V * \Delta T) \frac{G}{G_n} - \left(\frac{I_{sc,n} + K_I * \Delta T}{\left(V_{oc,n} + \frac{K_V * \Delta T}{V_t * \alpha} \right) - 1} \right) \left(e^{\left(\frac{v_{PV,array} + R_s * i_{PV,array}}{V_t * a} \right)} - 1 \right) - \frac{v_{PV,array} + R_s * i_{PV,array}}{R_p} . \quad (2.8)$$

2.3 Curvas Celda Fotovoltaica

Como se ve en el apartado anterior la potencia que es capaz de otorgar un arreglo de celdas fotovoltaicas depende de varios factores, tanto constructivos como externos. Como se sabe, la potencia que entrega el arreglo está dada por la multiplicación entre la corriente ($i_{PV,array}$) y el voltaje ($v_{PV,array}$). Las curvas IV de los paneles solares tienen la siguiente forma:

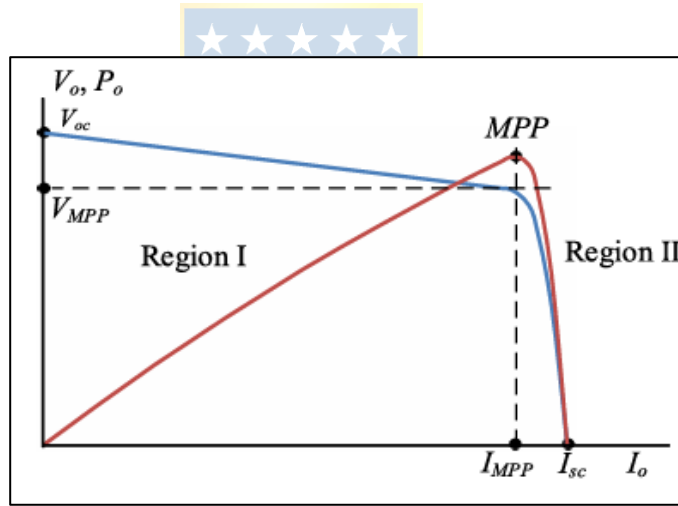


Figura 2-4 Forma curvas IV y PV panel solar [8]

El comportamiento de la curva está determinado la combinación de una fuente de corriente continua, el comportamiento de un diodo sumado a las pérdidas generadas por R_s y R_p . Esto se puede ver de mejor manera en la Figura 2-5. Esta imagen no tiene en consideración las pérdidas que representan las resistencias.

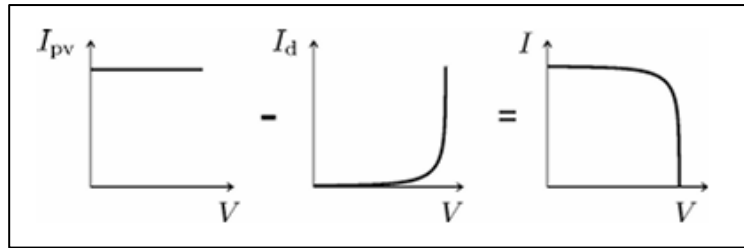


Figura 2-5 Origen comportamiento curva IV [7]

En la Figura 2-4 se puede apreciar que los paneles tienen un comportamiento híbrido, pudiendo operar como fuente de corriente (Región 1) o como fuente de voltaje (Región 2) dependiendo de en qué parte de la curva se esté operando [8]. Normalmente se busca operar en el punto de máxima potencia (MPP).

De la curva IV de la celda se pueden destacar 3 puntos importantes los cuales vienen siendo el cortocircuito (I_{sc}), el de circuito abierto (V_{oc}) y el de máxima potencia (MPP). En caso de que por algún motivo no se quiera operar en el MPP, normalmente se opera en la región 1 debido a que así se evita tener que someter la carga a altos niveles de voltaje.

2.3.1 Efecto de la Irradiación Solar.

La cantidad de potencia que es capaz de suministrar la celda solar depende fuertemente de las condiciones ambientales como se puede apreciar en el modelo mejorado de la ecuación (2.8).

Los fabricantes en los datasheets entregan las curvas I-V y curvas P-V solo en “Standard Test Condition” (STC) las cuales son $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ a $25\text{ }^{\circ}C$, y algunos incluyen las condiciones “Nominal Operating Cell Temperature” (NOCT) $\left[800 \left[\frac{W}{m^2} \right] \right]$ a $20\text{ }^{\circ}C$. De ahí la importancia de cual será el comportamiento de nuestra celda en condiciones distintas a las ya testeadas.

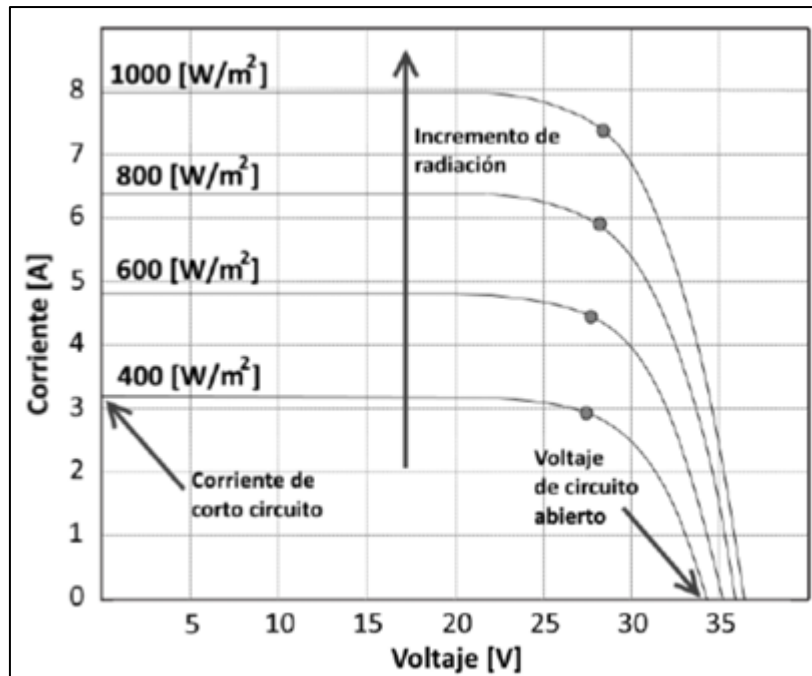


Figura 2-6 Cambio de irradiancia curva IV [9]

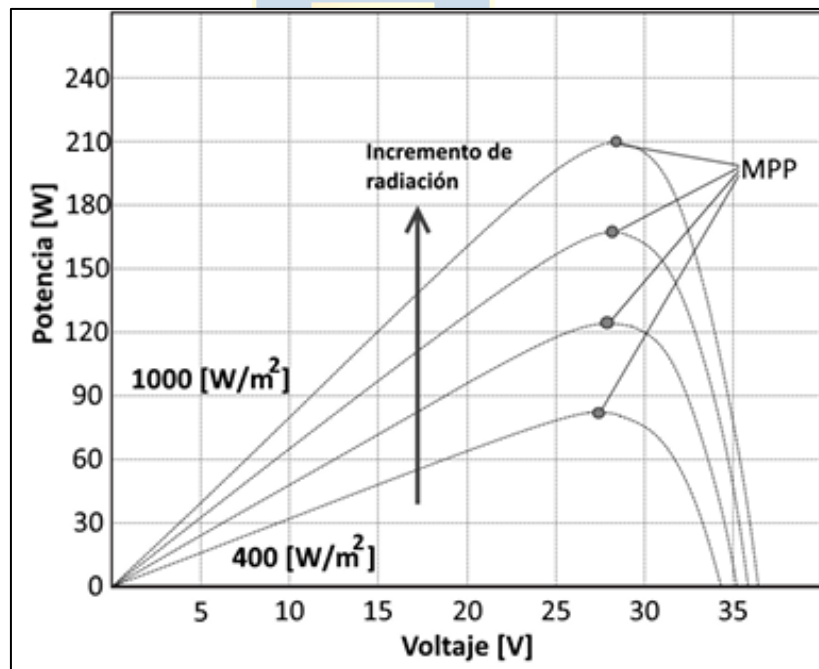


Figura 2-7 Cambio de irradiancia curva PV [9]

En la Figura 2-6 y Figura 2-7 se puede apreciar que un menor nivel de irradiancia tiene un gran impacto en la magnitud de corriente de cortocircuito, mientras que, aunque se logra apreciar un cambio en el voltaje de circuito abierto, no es tan grande como en el de corriente. Por otro lado, la

potencia que es capaz de suministrar la celda igual depende en gran magnitud de la irradiancia, impactado principalmente por la corriente, pues el MPP sigue ocurriendo en el mismo valor de voltaje.

2.3.2 Efectos de la Temperatura

La temperatura igual tiene directa incidencia en los valores de corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto y MPP. Esto se puede apreciar en las Figura 2-8 y Figura 2-9.

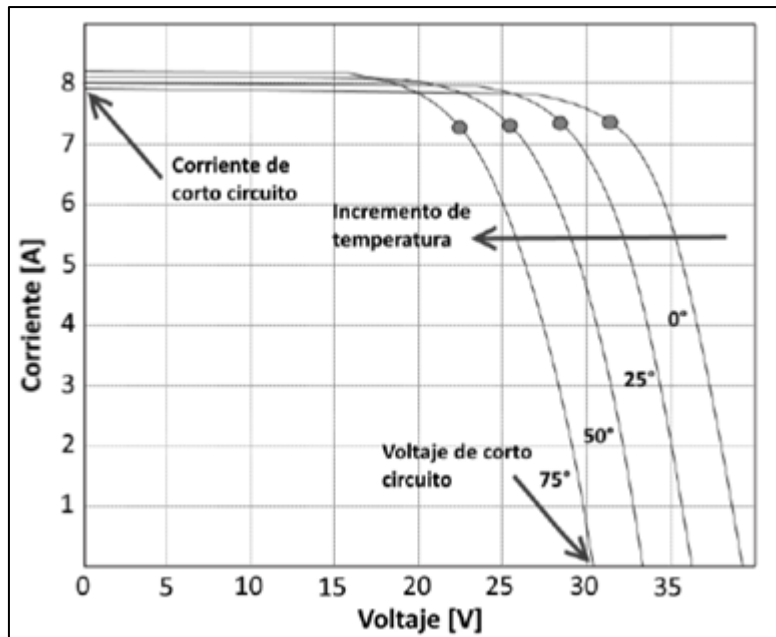


Figura 2-8 Cambio de temperatura curva IV [9]

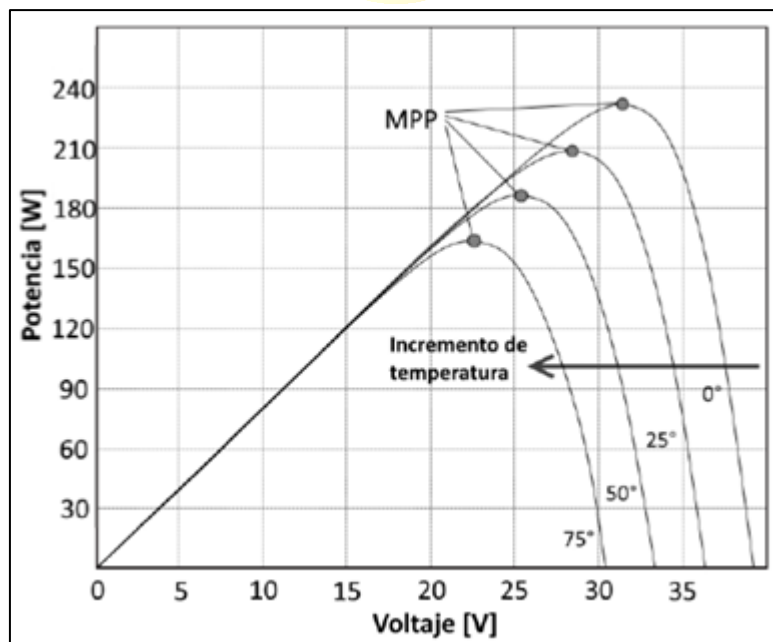


Figura 2-9 Cambio de temperatura curva PV [9]

Se puede apreciar que, a diferencia de la irradiancia, la temperatura a la que se encuentra la celda solar tiene mayor impacto en el voltaje de circuito abierto, que en la corriente de cortocircuito. En el caso del punto de máxima potencia este ocurre en el mismo nivel de corriente, pero a distintos niveles de voltaje.

2.3.3 Interconexión Módulos Fotovoltaicos

Como se menciona con anterioridad un arreglo fotovoltaico está compuesto por varias celdas fotovoltaicas, pero como sea la interconexión de éstas, dictará si se ve aumentado el voltaje o la corriente de nuestro arreglo. A continuación, se presenta el comportamiento de las curvas dependiendo del tipo de conexión:

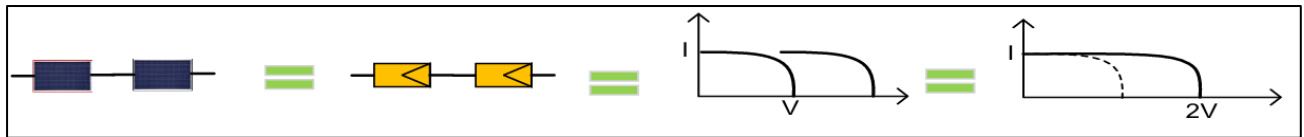


Figura 2-10 Módulos fotovoltaicos en serie [10]

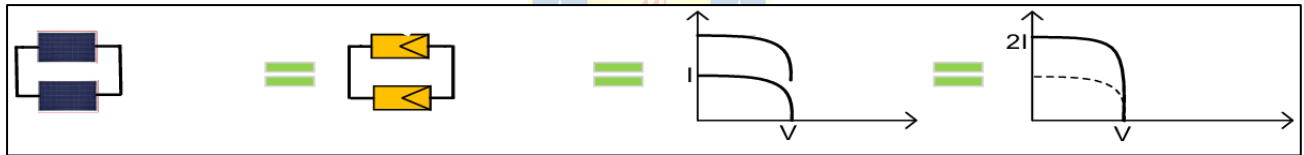


Figura 2-11 Módulos fotovoltaicos en paralelo [10]

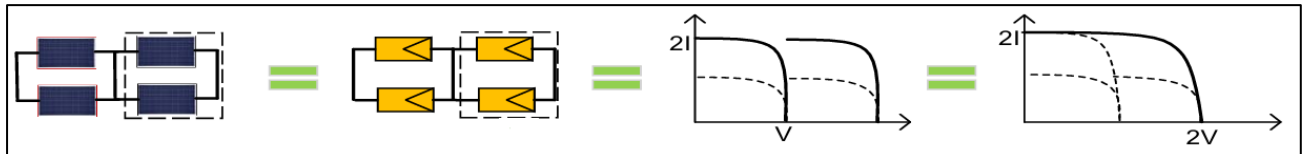


Figura 2-12 Módulos fotovoltaicos en serie y paralelo [10]

Podemos apreciar en la Figura 2-10, agregar paneles solares en serie aumenta el voltaje, dependiendo de la cantidad de paneles que se agreguen. Por otro lado, al ubicar los paneles en paralelo el parámetro que aumenta de forma proporcional a la cantidad de paneles es la corriente. Esto se puede representar matemáticamente de la siguiente manera:

$$i_{array,PV} = \sum_{i=1}^{N_p} i_{celda_i}, \quad (2.9)$$

$$v_{array,PV} = \sum_{i=1}^{N_s} v_{celda_i}, \quad (2.10)$$

donde,

- $i_{array,PV}$: Corriente total arreglo fotovoltaico [A],
- $v_{array,PV}$: Voltaje total arreglo fotovoltaico [V],
- i_{celda_i} : Corriente celda fotovoltaica [A],
- v_{celda_i} : Voltaje celda fotovoltaica [V],
- N_p : Número de paneles en paralelo,
- N_s : Número de paneles en serie.

Luego de [11] se obtiene que el comportamiento que tendrán R_s y R_p al agregar más paneles está dictado por:

$$R_s = R_s * \frac{N_s}{N_p}, \text{ y} \quad (2.11)$$

$$R_p = R_p * \frac{N_s}{N_p}. \quad (2.12)$$

Si se considera la ecuación presentada en (2.4), se nota que aún no se contempla el efecto de agregar paneles en serie y paralelo sobre la corriente fotovoltaica y la corriente inversa de saturación del diodo. De [11] se desprende que:

$$i_{PV,array} = i_{ph} * N_p - i_o * N_p \left(e^{\left(\frac{v_{PV,array} + R_s * i_{PV,array}}{V_t * a} \right)} - 1 \right) - \frac{v_{PV,array} + R_s * i_{PV,array}}{R_p}. \quad (2.13)$$

Finalmente, si se tiene en consideración (2.8), (2.11), (2.12) y (2.13) nos queda que la corriente de un arreglo fotovoltaico esta dado por:

$$i_{PV,array} = \left((I_{ph,n} + K_V * \Delta_T) \frac{G}{G_n} \right) N_p - \left(\frac{I_{sc,n} + K_I * \Delta_T}{e^{(V_{oc,n} + \frac{K_V * \Delta_T}{V_t * \alpha})} - 1} \right) * N_p * \left(e^{\left(\frac{v_{PV,array} + R_s * \frac{N_s}{N_p} * i_{PV,array}}{N_s * V_t * a} \right)} - 1 \right) - \frac{v_{PV,array} + R_s * \frac{N_s}{N_p} * i_{PV,array}}{R_p * \frac{N_s}{N_p}}. \quad (2.14)$$

La ventaja que presenta este modelo en comparación a los mencionados con anterioridad es que permite manipular la temperatura e irradiancia como una entrada, además de agregar la cantidad de paneles en serie y paralelo que se desee.

2.4 Valores de resistencia serie y paralelo

Del modelo presentado en (2.14), se puede observar que todos los parámetros se pueden obtener del datasheet del panel fotovoltaico, de factores ambientales o de condiciones de diseño como la cantidad de paneles a instalar. Los únicos parámetros que se desconocen sus valores son la resistencia serie (R_s), resistencia paralela (R_p) y la corriente fotovoltaica nominal ($I_{ph,n}$).

2.4.1 Método de obtención

En la literatura se encuentran distintos métodos para obtener los valores de las resistencias. Varios autores optan por obtener estos valores por mediciones debido a que el valor de la resistencia paralelo no es el mismo dependiendo de en qué región se esté operando [8]. Esto no se abarca en esta memoria de título ya que no se tienen paneles solares físicos para poder realizar estas mediciones.

Otros autores presentan métodos iterativos, esto con el conocimiento de que solo existe un par de valores de resistencia para poder operar en el MPP. Esto se realiza subiendo de a poco el valor de R_s hasta que la curva I-V presente la misma forma que la presentada en el datasheet sumado al hecho de que igual debe poseer el mismo MPP [7].

En [12] se presenta un método el cual solo depende de valores del datasheet del panel fotovoltaico a utilizar, la temperatura y estimando el factor del material de la celda, valor que depende del material que este compuesto la celda.

Lo primero a calcular es:

$$n = n_{mat} * n_s, \quad (2.15)$$

donde,

- n : Factor de idealidad del módulo,
- n_{mat} : Factor del material de la celda,
- n_s : Número de celdas en serie.

Luego se procede a obtener R_s mediante una ecuación implícita, esto quiere decir que no se puede despejar la variable de forma directa y por ende se requiere de métodos numéricos para ser resuelta.

$$\frac{n \cdot V_t \cdot V_{mp} (2I_{mp} - I_{sc,n})}{(V_{mp} \cdot I_{sc,n} - (I_{sc,n} - I_{mp}) V_{oc,n}) (V_{mp} - I_{mp} \cdot R_s) - n \cdot V_t (V_{mp} \cdot I_{sc,n} - V_{oc,n} \cdot I_{mp})} = e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s - V_{oc,n}}{n \cdot V_t} \right)}, \quad (2.16)$$

donde,

- V_t : Voltaje térmico [V],
- V_{mp} : Voltaje a la máxima potencia [V],
- I_{mp} : Corriente a la máxima potencia [A],
- $I_{sc,n}$: Corriente de cortocircuito nominal [A],
- $V_{oc,n}$: Voltaje de circuito abierto nominal [V].

Una vez se tiene el valor de la resistencia serie, es posible encontrar el valor de la resistencia paralela mediante:

$$R_p = \frac{(V_{mp} - I_{mp} \cdot R_s)(V_{mp} - (I_{sc,n} - I_{mp}) R_s - n \cdot V_t)}{(V_{mp} - I_{mp} \cdot R_s)(I_{sc,n} - I_{mp}) - n \cdot V_t \cdot I_{mp}}. \quad (2.17)$$

2.4.2 Corriente Fotovoltaica a partir de R_s y R_p

En varios modelos se opta por considerar la corriente fotovoltaica ($I_{ph,n}$) igual a la de cortocircuito nominal ($I_{sc,n}$) con el objetivo de simplificar el modelo, esto debido a que en la práctica la resistencia serie es pequeña y la resistencia paralela tiene un valor grande. Esto cobra más sentido al observar cómo se calcula la corriente fotovoltaica nominal:

$$I_{ph,n} = I_{sc,n} \frac{R_p + R_s}{R_p}. \quad (2.18)$$

Con todos los valores definidos, es posible utilizar el modelo planteado en (2.14) solo con los datos entregados por el fabricante y teniendo en conocimiento la potencia que necesita abastecer el arreglo fotovoltaico.

2.5 Seguimiento del punto de máxima potencia

En la Figura 2-7 y Figura 2-9 se puede apreciar el nivel de tensión y corriente al cual se encuentra el MPP, depende directamente de la radiación del sol y de la temperatura, valores que van cambiando a lo largo del día, de ahí la importancia de que exista un mecanismo que permita encontrar el MPP independiente de las condiciones ambientales. Esto se conoce como “seguimiento del punto de máxima potencia” o por sus siglas en inglés, MPPT. Para poder emplear el MPPT es necesario conectar un convertidor DC/DC entre la carga y el arreglo fotovoltaico [13].

A continuación, se hace una breve explicación de los algoritmos de MPPT más comunes:

1. Método Perturbar y Observar (P&O): Es un método iterativo, en el cual se perturba el punto de operación del arreglo fotovoltaico, y se compara con el punto de operación anterior, con el objetivo de encontrar la dirección del cambio. El MPP se encuentra cuando $\left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0\right)$.
2. Algoritmo de Inductancia Incremental: Este algoritmo presenta la ventaja de que una vez encontrado el MPP no oscila tanto en comparación a otros métodos. Esto se hace comparando la conductancia instantánea $\left(\frac{I}{V}\right)$ con la conductancia incremental $\left(\frac{\Delta I}{\Delta V}\right)$. Una vez se encuentra el MPP este se mantiene hasta que existe un cambio en ΔI .
3. Método de Lógica Difusa: Es un control de algoritmo variable. Este algoritmo debe seguir unas reglas dadas por el operador y depende de cuatro pasos. El método de lógica difusa tiene la ventaja de que no trabaja con entradas específicas, no tiene un modelo matemático exacto, permite trabajar con sistemas no lineales, y va a depender netamente de la habilidad del operador y la precisión de las reglas.

Aún que estos son los métodos más populares, en la literatura se pueden encontrar métodos más complejos o incluso mezcla de métodos como el presentado en [14], el cual utiliza el método P&O sumado al de lógica difusa; teniendo como resultado una menor oscilación en el MPP. En esta memoria de título se opta por la elección del P&O debido a su sencillez y popularidad.

2.5.1 Método de Perturbar y Observar

Tal como se menciona con anterioridad, el método de P&O es un método iterativo el cual perturba el punto de operación del arreglo fotovoltaico.

Para poder realizar esto, se mide el voltaje y la corriente en un instante de tiempo, y en el instante anterior y se comparan. Primero se observa si $\Delta P > 0$ y luego si $\Delta V > 0$, dependiendo de las respuestas se opta por reducir o aumentar el voltaje de referencia. Estas interrogantes se resuelven con la intención de saber si nos encontramos al lado derecho o izquierdo del MPP.

El algoritmo se presenta a continuación:



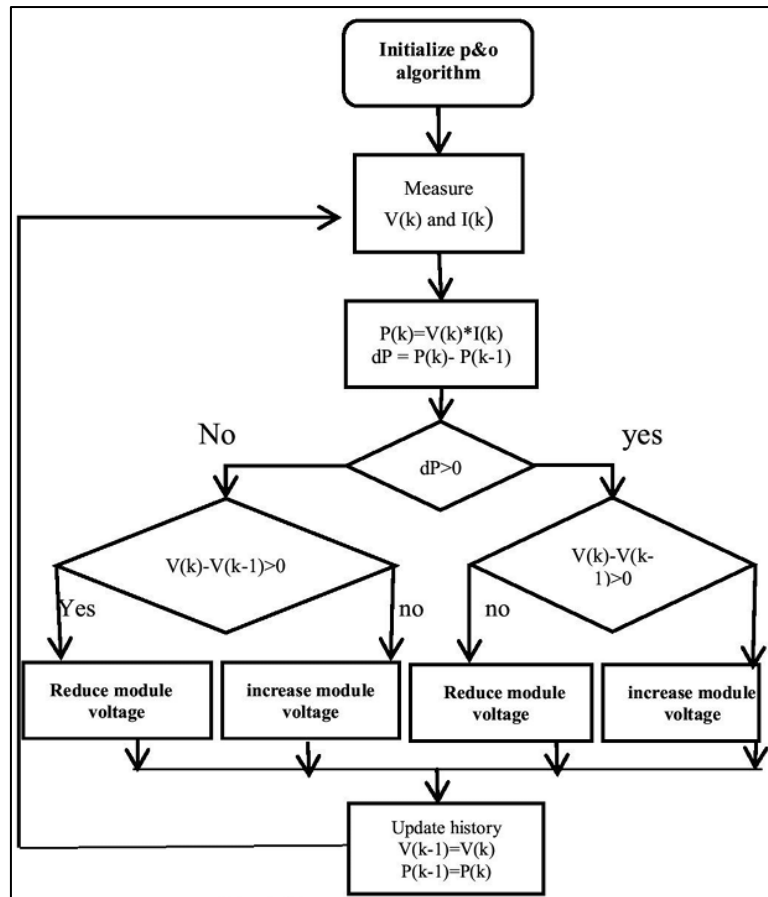


Figura 2-13 Algoritmo MPP P&O [14]

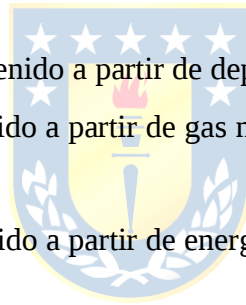
Para este método se debe seleccionar cada cuánto se realiza la medición, y de cuánto es el cambio en el voltaje de referencia.

Capítulo 3. Celda de Electrólisis

3.1 Introducción

La producción de hidrógeno es un proceso que se ha realizado a lo largo de los años mediante distintos métodos, adquiriendo mucha fuerza estos últimos años con la utilización de las energías renovables para su producción. Dependiendo de que fuente se obtiene el hidrógeno este se nombrará con un color o con otro. Las clasificaciones son las siguientes [15]:

- Hidrógeno Verde: Obtenido a partir de energías renovables
- Hidrógeno Gris: Obtenido a partir de gas natural
- Hidrógeno Negro: Obtenido a partir de carbón
- Hidrógeno Marrón: Obtenido a partir de lignito
- Hidrógeno Naranja: Obtenido a partir de emisiones de CO₂ de otras industrias
- Hidrógeno Ámbar: Obtenido a partir de emisiones de CO₂ sumado a su almacenamiento
- Hidrógeno Blanco: Obtenido a partir de depósitos subterráneos de hidrógeno
- Hidrógeno Azul: Obtenido a partir de gas natural reformado, sumado a la captura de CO₂
- Hidrógeno Rosa: Obtenido a partir de energía nuclear.



Sumado a los tipos de hidrógeno están los mecanismos por los cuales se produce el hidrógeno, siendo estos el reformado con vapor, oxidación parcial, reformado autotérmico, fotólisis biológica, fermentación oscura, foto fermentación, gasificación, pirólisis, termólisis, fotólisis y electrólisis [16].

3.2 Electrólisis

Para esta memoria de título el proceso que se elige para la producción de hidrógeno es la electrólisis, debido a que es una tecnología que produce cero emisiones y produce como subproducto oxígeno puro (O_2). Una celda de electrólisis se conforma de un cátodo (electrodo negativo), de un ánodo (electrodo positivo) y un líquido conductor también llamado electrolítico. Todo esto conectado a una batería o una fuente de electricidad.

3.2.1 Fundamentos

La electrólisis se puede definir en grandes rasgos como un fenómeno que permite separar los elementos que conforman un compuesto mediante una corriente eléctrica. La electrólisis se rige por las leyes de Faraday de la electrólisis. La primera ley de Faraday nos dice que “La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante el proceso de electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida a este electrodo”. Esto se puede apreciar fácilmente en la siguiente imagen extraída de [17].

<i>Proceso</i>	<i>Cantidad depositada</i>	<i>moles e^- necesarios</i>	<i>Carga electrica</i>
$Na^+ + 1e^- \longrightarrow Na$	1mol Na	1mol e^-	$96500C = 1F$
$Mg^{2+} + 2e^- \longrightarrow Mg$	1mol Mg	2mol e^-	$2 \cdot 96500C = 2F$
$Al^{3+} + 3e^- \longrightarrow Al$	1mol Al	3mol e^-	$3 \cdot 96500C = 3F$

Figura 3-1 Primera ley de Faraday [17]

En el caso de la segunda ley, se indica que “Para una determinada cantidad de electricidad, la masa depositada de una especie química en un electrodo es directamente proporcional al peso equivalente del elemento. El peso equivalente de una sustancia es su masa molar dividido por un entero que depende de la reacción que tiene lugar en el material”.

La electrólisis se puede dividir en:

- Ionización: Fase previa de disolución del compuesto antes de que entre en contacto con la corriente eléctrica.
- Orientación: Con la corriente eléctrica activa, los iones, según su carga positiva o negativa, se dirigen hacia cátodo y ánodo.
- Descarga: Los aniones, ya situados en el ánodo, ceden electrones, mientras que los cationes, localizados en el cátodo adquieren electrones [17].

3.2.2 Tipos de Celdas

La electrólisis del agua se puede realizar en cuatro tipos de celdas, que varían en su electrolito, sus condiciones de operación y sus agentes iónicos [16].

3.2.2.1 Celda de electrólisis alcalina (WAE)

La producción de hidrógeno por celdas de electrólisis alcalina es uno de los métodos más utilizados en la actualidad junto a la obtención por celdas PEM. El proceso consiste en tener dos moléculas de una solución alcalina ($KOH/NaOH$) en el cátodo, donde se reducen a una molécula de hidrógeno (H_2) y dos iones de hidróxido (OH^-). El hidrógeno es eliminado de la superficie del cátodo y luego se recombina en forma gaseosa, mientras que los hidróxidos se transfieren al ánodo por medio de un campo eléctrico externo. Los hidróxidos que atraviesan la membrana se reorganizan en el ánodo como agua (H_2O) y como media molécula de oxígeno (O_2). Las moléculas de oxígeno se recombinan en la superficie del electrodo y escapan como hidrógeno. El proceso entero se puede apreciar en la imagen Figura 3-2.

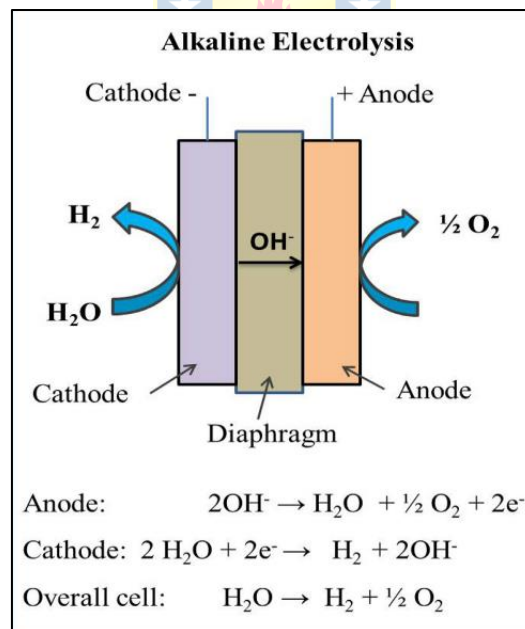


Figura 3-2 Celda de electrólisis alcalina [16]

Este proceso ocurre a una temperatura de entre 30~80°C. Los aspectos negativos de este tipo de celdas es su muy limitada densidad de corriente (alrededor de 400mA/cm²), su baja eficiencia energética, de entre 70~80%, y la baja presión al momento de la operación (entre 3 y 30 [bar])[16].

3.2.2.2 Celda de electrólisis de óxido sólido (SOE)

Para este tipo de electrólisis, el agua es introducida en forma de vapor y al entrar en contacto con el cátodo da como resultado hidrógeno en forma gaseosa y aniones de oxígeno. Estos iones de oxígeno viajan al ánodo y ahí se produce la formación de oxígeno gaseoso. Al momento de formarse las moléculas de oxígeno igual se producen electrones que luego son utilizados como reductores en la reacción catódica [17].

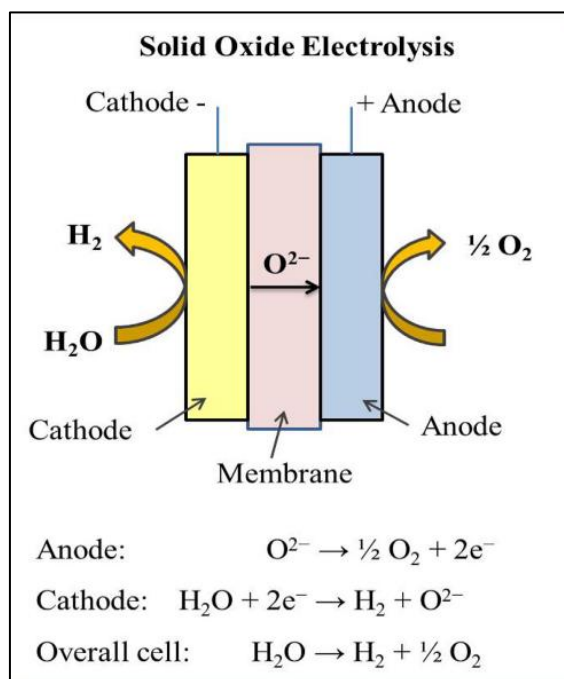


Figura 3-3 Celda de electrólisis de óxido sólido [16]

Las celdas de electrólisis de óxido sólido son un tipo de tecnología que ha ido adquiriendo fuerza estos últimos años debido a que capaz de generar hidrógeno ultrapuro con un alto nivel de eficiencia de entre 90 y 100%. Este tipo de electrólisis ocurre a altas temperaturas (500~850°C) y a altos niveles de presión. Los problemas de este tipo de celdas, por el cual aún no se pueden comercializar a gran escala es su falta de estabilidad y su rápida degradación.

3.2.2.3 Celda de electrólisis microbiana (MEC)

Las celdas de electrólisis microbianas producen hidrógeno de materiales orgánicos con la influencia de una corriente eléctrica. Inicialmente se tiene un sustrato en el ánodo el cual se oxida por microbios generando de esta forma (CO_2), electrones y protones. Los electrones se mueven al cátodo por un circuito externo, mientras que los protones se mueven hacia el lado del cátodo por la membrana. Luego en el cátodo; protones y electrones se juntan para formar hidrógeno.

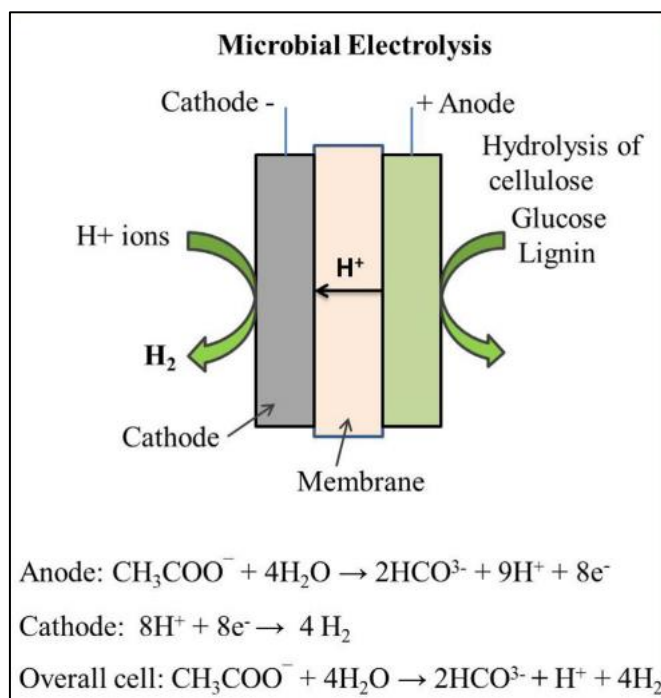


Figura 3-4 Celda de electrólisis microbiana [16]

Esta tecnología se encuentra aún en desarrollo, debido a que presenta problemas en el ratio de producción de hidrógeno, una muy alta resistencia interna y elegir los materiales óptimos de los electrodos.

3.2.2.4 Celda de electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM)

El agua es introducida en el ánodo y esta se disocia en oxígeno, electrones y protones. Los protones son conducidos por un campo eléctrico a través de la membrana hacia el cátodo donde se combina con electrones que vienen de un circuito externo para formar hidrógeno.

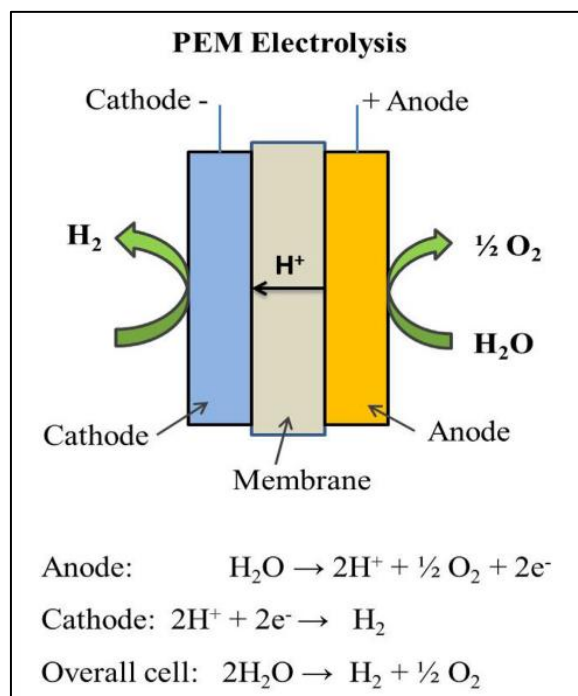


Figura 3-5 Celda de electrólisis membrana de intercambio de protones [16]

Este tipo de celdas tienen muchas ventajas, como una gran conductividad de los protones, una baja permeabilidad a los gases, un menor espesor, trabaja a mayores niveles de presión, las celdas son más compactas, se puede trabajar con altos niveles de densidad de corriente (2 A/cm^2), alta eficiencia (entre 80 y 90%), rápida respuesta, trabaja a bajos niveles de temperatura ($20\sim 80^\circ\text{C}$), produce un hidrógeno de alta calidad y como subproducto produce oxígeno. Uno de los principales desafíos es abaratar los costos sin perder los niveles de eficiencia.

3.3 Modelo Celda PEM

Como vimos en el apartado anterior, las celdas PEM presentan un gran número de ventajas en comparación a los otros tipos de celdas de electrólisis, por lo que se elige este tipo de celda para ser utilizada en esta memoria de título.

El voltaje de una celda PEM se puede representar como una suma del voltaje de circuito abierto, un sobrepotencial óhmico, un sobrepotencial de los electrodos y finalmente un sobrepotencial debido a las resistencias internas [18]:

$$v_{el,cell}(i_{cell}) = V_{op,cell} + \eta_{electrodes}(i_{cell}) + \eta_{ohm}(i_{cell}) + \eta_{ion}(i_{cell}) , \quad (3.1)$$

donde,

$v_{el,cell}$	: Voltaje total celda electrólisis [V],
$V_{op,cell}$	: Voltaje circuito abierto [V],
$\eta_{electrodes}$	: Sobretensión en los electrodos [V],
η_{ohm}	: Sobretensión óhmica [V],
η_{ion}	: Sobretensión iónica [V],
i_{cell}	: Densidad de corriente celda electrólisis $\left[\frac{A}{cm^2} \right]$.

Para la expresión del voltaje de circuito abierto de la celda, este se puede obtener de la derivación de la ecuación de Nerst de la electrólisis del agua. Esta se obtiene de forma empírica a una presión atmosférica constante siendo:

$$V_{op,cell} = 1.5184 - 1.5421 * 10^{-3}T + 9.523 * 10^{-5}T * \ln(T) + 9.84 * 10^{-8}T^2 , \quad (3.2)$$

hay que tener en consideración que la temperatura se encuentra en Kelvin [K].

La aparición de un sobrepotencial óhmico es debido a la resistencia que generan los colectores de corriente, las placas bipolares y los electrodos de la celda PEM. Todas vienen siendo características constructivas de la celda. Y se pueden representar como:

$$\eta_{ohm}(i_{cell}) = R_l * i_{cell}, \quad (3.3)$$

donde,

R_l : Resistencia interfacial normalizada [Ω],

T : Temperatura [K].

En el caso de la sobretensión en los electrodos, representa la transferencia de carga y transferencia de masa que ocurre dentro de los electrodos. En el caso del ánodo, esto se puede representar como:

$$\eta_a = \frac{R*T}{\alpha_a * Z * F} \ln \left(\frac{i_a}{i_{o,a}} \right), \quad (3.4)$$

donde,

η_a : Sobretensión de activación del ánodo [V],

R : Constante de los gases [$\frac{J}{K * mol}$],

F : Constante de Faraday [$\frac{J}{mol}$],

α_a : Coeficiente de transferencia de carga en el ánodo,

z : Coeficiente estequiométrico del número de electrones,

i_a : Densidad de corriente en el ánodo [$\frac{A}{cm^2}$],

$i_{o,a}$: Densidad de corriente de intercambio del ánodo [$\frac{A}{cm^2}$].

Para el caso del cátodo, la ecuación es:

$$\eta_c = \frac{-R*T}{\alpha_c * Z * F} \ln \left(\frac{i_c}{i_{o,c}} \right), \quad (3.5)$$

donde,

η_c : Sobretensión de activación del cátodo [V],

α_c : Coeficiente de transferencia de carga en el cátodo,

i_c : Densidad de corriente en el cátodo [$\frac{A}{cm^2}$],

$i_{o,c}$: Densidad de corriente de intercambio del cátodo [$\frac{A}{cm^2}$].

Para el caso de la electrólisis del agua específicamente, el coeficiente estequiométrico del número de electrones (z) tiene un valor de 2, mientras que se toman a los coeficientes de transferencia de carga (α_a, α_c) como 0.5, esto debido a que se consideran a las reacciones como simétricas [19]. Esto sumado a simplificaciones matemáticas, nos deja que las sobretensiones de cada electrodo están dadas por:

$$\eta_a = \frac{R*T}{F} \sinh^{(-1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_a}{i_{o,a}} \right) \right), \text{ y} \quad (3.6)$$

$$\eta_c = \frac{-R*T}{F} \sinh^{(-1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_c}{i_{o,c}} \right) \right). \quad (3.7)$$

Cuando se está trabajando a altos niveles de densidad de corriente, las limitaciones en la transferencia de masa no se pueden obviar. El agua que se agrega por el lado del ánodo llega al electrolizador y a la membrana PEM a través de una capa de difusión de gas, GLD por sus siglas en inglés. Esta capa juega un rol importante en la difusión del oxígeno (O_2), en la cantidad de agua que entra al electrolizador y en la conducción eléctrica. Esto nos da por consecuente que la mayor limitante para el transporte de masa es el oxígeno que sale del catalizador y cruza la GLD como una burbuja de gas [18].

Este efecto nos obliga a agregar una corriente limitante a la ecuación del sobrepotencial de los electrodos, quedando:

$$\eta_{\text{electrodes}}(i_{\text{cell}}) = \eta_a - \eta_c = \frac{R*T}{F} \sinh^{(-1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\frac{i_{\text{cell}}}{i_{o,a}}}{1 - \frac{i_{\text{cell}}}{i_{L,a}}} \right) \right) + \frac{R*T}{F} \sinh^{(-1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_{\text{cell}}}{i_{o,c}} \right) \right), \quad (3.8)$$

donde,

$$i_{L,a} \quad : \quad \text{Corriente limitante} \left[\frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right].$$

El término faltante para obtener el voltaje total de la celda de electrolisis (3.1) es la sobretensión iónica. Esta sobretensión aparece debido a la resistencia de los protones al pasar a través de la membrana:

$$\eta_{\text{ion}}(i_{\text{cell}}) = \frac{t_m}{\sigma_{m,\text{ref}} * e^{1268 \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right)}} i_{\text{cell}} \quad (3.9)$$

donde,

- t_m : Grosor Celda [m],
 $\sigma_{m,ref}$: Conductividad de referencia de la celda $\left[\frac{S}{cm}\right]$,
 T_{ref} : Temperatura referencia [K].

Finalmente, el modelo de la celda PEM queda definido por:

$$v_{el,cell}(i_{cell}) = 1.5184 - 1.5421 * 10^{-3}T + 9.523 * 10^{-5}T * \ln(T) + 9.84 * 10^{-8}T^2 + \quad (3.10)$$

$$\frac{R*T}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_{cell}}{i_{o,a}} \right) \right) + \frac{R*T}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_{cell}}{i_{o,c}} \right) \right) + R_l i_{cell} + \frac{t_m}{\sigma_{m,ref} * e^{1268 \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}} i_{cell}.$$

Este modelo permite tener la temperatura del electrolizador como entrada, y de esta forma ver cómo es su comportamiento tanto con temperaturas fijas, o con cambios de temperatura a lo largo de un tiempo definido.

Al graficar el voltaje de la celda en función de la densidad de corriente, se obtiene una gráfica similar a la mostrada en la Figura 3-6. Donde la sobretensión de activación relación con la tensión necesaria para iniciar las reacciones químicas y en este informe hace referencia a $\eta_{electrodes}(i_{cell})$. En el caso de la sobretensión de concentración, existe debido al efecto limitante que ocurre en el traspaso de oxígeno a través de la GLD.

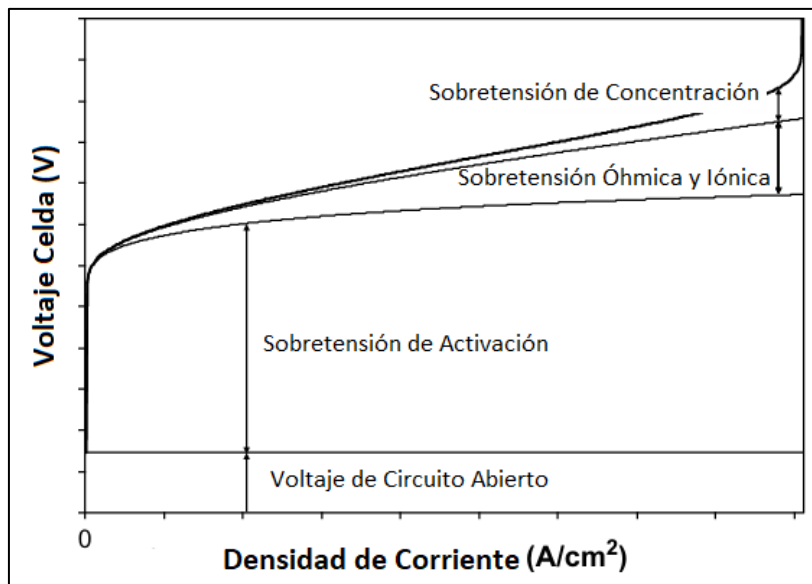


Figura 3-6 Curva VI celda PEM [18]

Para la utilización de este modelo se tuvieron algunas consideraciones, como:

- No se tienen en cuenta los efectos de la presión, la presión global del electrolizador se considera como 1 [atm].
- Se asume que la temperatura en todo el electrolizador es uniforme.
- Al conectar celdas en serie, se asume que todas son exactamente iguales.
- La membrana se considera que está llena de agua, por lo tanto, su conductividad solo depende de la temperatura.

3.4 Curva Voltaje/Densidad de Corriente

Como se puede apreciar en la Figura 3-6, en el caso de las celdas de electrólisis PEM, se ve su comportamiento mediante una gráfica que relaciona el voltaje con la densidad de corriente (valor que depende de la corriente y del área de la celda de electrolisis). Al igual que en el caso del panel solar, el comportamiento de la celda se ve afectado por factores externos, como lo pueden ser la temperatura o las densidades de corriente tanto de ánodo como del cátodo.

3.4.1 Efecto de la temperatura

En el modelo presentado en el apartado anterior, se observa que la temperatura tiene directa incidencia en el voltaje de circuito abierto (3.2), la sobretensión en los electrodos (3.8) y la sobretensión iónica (3.9). En términos matemáticos, solo la sobretensión en los electrodos aumenta al aumentar la temperatura.

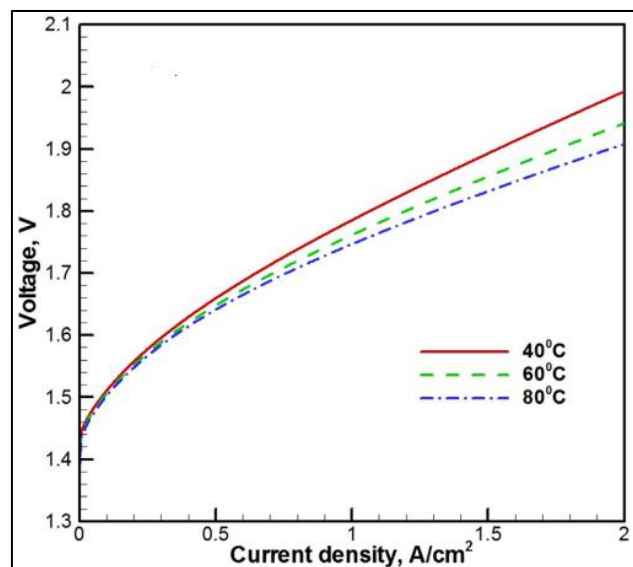


Figura 3-7 Efecto temperatura celda PEM [20]

En la imagen Figura 3-7 se puede apreciar el efecto positivo que tiene trabajar a mayores temperaturas en una celda PEM, debido a que se trabaja a voltajes menores, mejorando el rendimiento de esta. Otra cosa para destacar es que entre mayor sea la densidad de corriente, mayor será esta diferencia de voltaje.

3.4.2 Efecto de la densidad de corriente

La densidad de corriente es un valor que depende de los materiales del catalizador, la temperatura de operación y otros parámetros físicos del cátodo y del ánodo que son difíciles de cuantificar [20]. Los valores de densidad de corriente varían entre modelos y normalmente se eligen los valores que mejor se adapten, tanto al modelo como a la celda PEM:

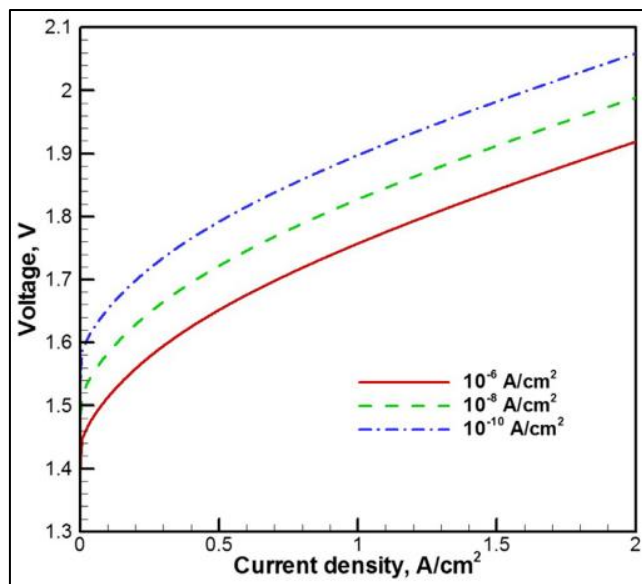


Figura 3-8 Efecto cambio de densidad de corriente en el ánodo [20]

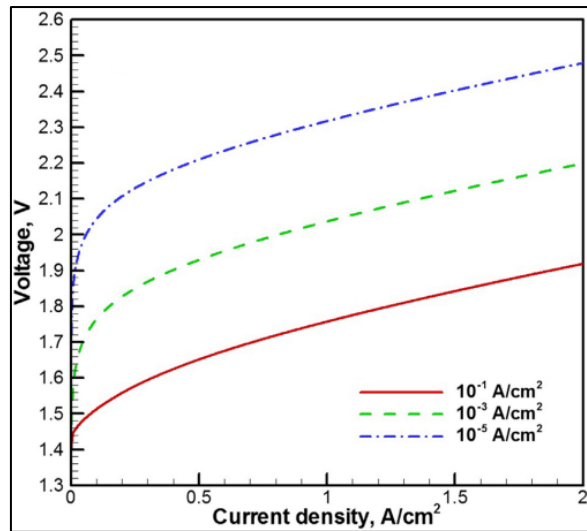


Figura 3-9 Efecto cambio de densidad de corriente en el cátodo [20]

En las figuras se puede apreciar que entre menores sean los valores de densidad de corriente, peor será el rendimiento de la celda PEM, esto tanto por el ánodo como el cátodo.



Capítulo 4. Convertidor DC/DC

4.1 Introducción

La unidad generadora (arreglo de paneles fotovoltaicos) y la carga a alimentar (Celda de electrólisis PEM), requieren agregarles algún elemento capaz de acoplar el sistema y que todo funcione como conjunto. Este elemento es conocido como convertidor.

Los convertidores pueden ser de DC/AC, AC/DC, AC/AC o DC/DC. Dado el comportamiento del panel solar y la celda, se concluye que el tipo de convertidor a utilizar es DC/DC.

Dentro de las funciones que cumplen los convertidores DC/DC, tenemos [21]:

- Convertir un voltaje de entrada (v_i) en un voltaje de salida (V_o)
- Regular el voltaje de salida (v_o) en caso de cambios en la carga
- Reducir el rizado de tensión en la salida (v_o)
- Agregar aislamiento entre la fuente y la carga
- Proteger al sistema suministrada y a la fuente de interferencias electromagnéticas

Para medir el tiempo que el interruptor del convertidor está abierto o cerrado, se utiliza el ciclo de trabajo. La forma de obtener el ciclo de trabajo va a depender de la topología que se esté empleando.

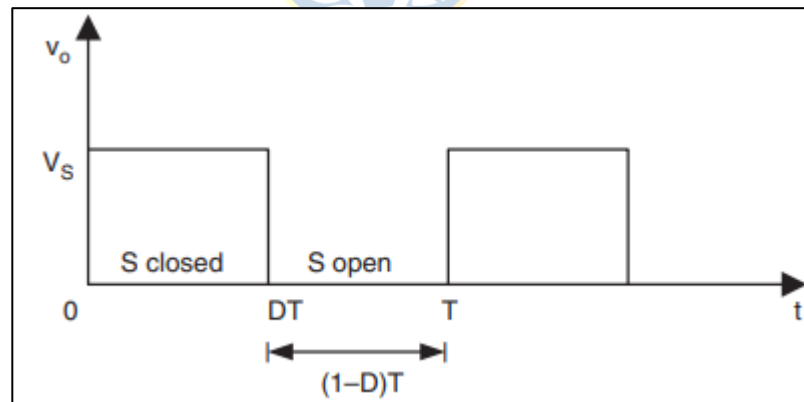


Figura 4-1 Ciclo de trabajo convertidor [21]

La fórmula matemática de obtener el ciclo de trabajo es:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{T_{con}}, \text{ con} \quad (4.1)$$

$$T_{con} = \frac{1}{f} \quad (4.2)$$

donde,

- D : Ciclo de trabajo,
- t_{on} : Tiempo encendido [s],
- t_{off} : Tiempo apagado [s],
- T_{con} : Periodo [s],
- f : Frecuencia de conmutación [Hz].

4.2 Clasificación

Los convertidores tienen un lugar fundamental en la industria debido a los múltiples usos que se les puede dar, a continuación, se presentan algunos.

4.2.1 Según su configuración topológica

- **Convertidor Reductor o Buck:** Un convertidor Buck se encarga de disminuir el voltaje en la salida con respecto al voltaje en la entrada ($v_i > v_o$), esto lo logra debido a que cuando se cierra el interruptor, la corriente fluye hacia la bobina, y se almacena. Una vez abierto el interruptor, la corriente de la bobina circula por el diodo y alimenta la carga.

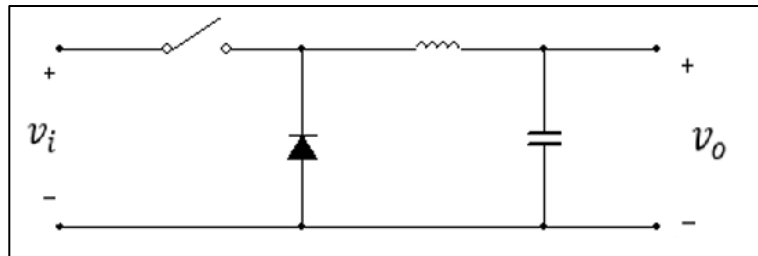


Figura 4-2 Convertidor reductor o Buck

- **Convertidor Elevador o Boost:** Un convertidor Boost se encarga de aumentar el voltaje en la salida con respecto al voltaje en la entrada ($v_i < v_o$). Al estar el interruptor cerrado,

la bobina se carga, y una vez se abre el interruptor, la energía de la bobina se suma al voltaje proveniente de la entrada del circuito y fluye a través del diodo.

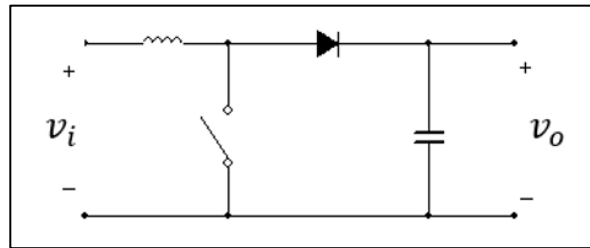


Figura 4-3 Convertidor elevador o Boost

- Convertidor Reductor-Elevador o Buck-Boost: El convertidor reductor-elevador, puede reducir o aumentar el voltaje en la salida, dependiendo de con qué ciclo de trabajo se esté alimentando al convertidor. La desventaja que presenta es que el voltaje sale con la polaridad invertida. Para lograr esto, al estar el interruptor cerrado, se almacena energía en la bobina, una vez se abre el interruptor, la energía de la bobina fluye hacia la carga.

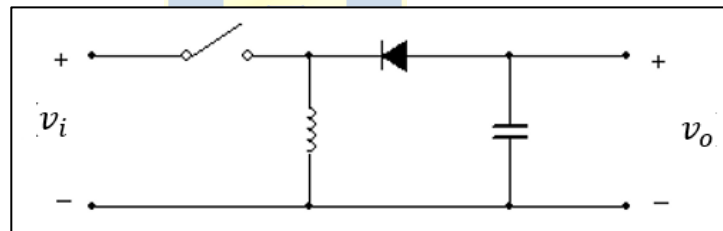


Figura 4-4 Convertidor reductor elevador o Buck-Boost

- Existen otros tipos de configuraciones más complejas, las cuales no se abarcan en esta memoria de título.

4.2.2 Según su técnica de modulación

- Modulación por ancho de pulso (PWM): Se modifica el ciclo de trabajo, y el transistor alterna entre encendido y apagado.

- **Conmutación Suave:** Busca eliminar las pérdidas por la conmutación del PWM, esto lo logra mediante métodos más sofisticados que hacen que el transistor alterne cuando el voltaje o el voltaje es cero.
- **Modulación de frecuencia:** Se mantiene constante el ciclo de trabajo, pero se modifica la frecuencia de conmutación.
- **Modulación por densidad de pulso:** No se cambia ni el ancho del pulso ni la frecuencia, en cambio se modifica la frecuencia con la cual van apareciendo los pulsos.

4.3 Modulación por ancho de pulso

Como se mencionó en el apartado anterior, la modulación por ancho de pulso consta en variar el ancho del pulso. Esto se logra comparando una señal portadora, que cumple el rol de referencia, con una señal de control, o también llamada señal moduladora. En el caso de DC, la referencia normalmente es una señal triangular o diente de sierra [22].

Dependiendo de la relación entre la portadora y la moduladora, el ciclo de trabajo tendrá un valor u otro, siendo 100% cuando la moduladora es siempre mayor a la portadora, mientras que si la portadora es siempre mayor a la moduladora el ciclo de trabajo es 0%:

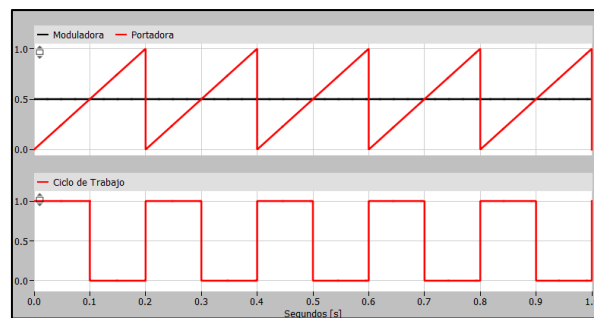


Figura 4-5 Relación señales portadora y moduladora

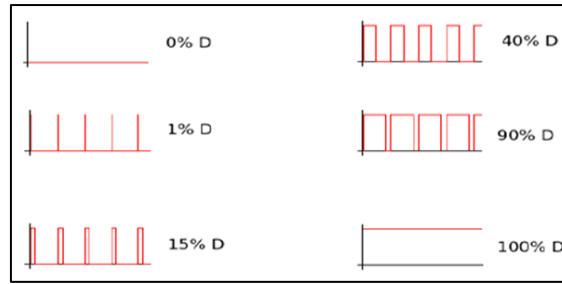


Figura 4-6 Porcentaje ciclo de trabajo [22]

La modulación PWM tiene la ventaja de que es más sencilla de implementar y es más robusta que otros tipos de modulación, con el inconveniente de que al realizarse la conmutación del transistor se generan pérdidas por conmutación y ruido electromagnético.



Capítulo 5. Simulación

5.1 Introducción

En este capítulo se realizan las simulaciones tanto del panel fotovoltaico, de la celda de electrólisis del tipo PEM y del convertidor. Cuando se utilizan componentes como resistencias, inductores, capacitores, diodos o transistores, se consideran como ideales y no presentan pérdidas por temperatura, ni pérdidas por corrientes parásitas.

Para esto se tienen en consideración datasheets de los equipos que se encuentran en el comercio, y valores obtenidos de otros trabajos de investigación.

Las simulaciones fueron realizadas en PLECS y en MATLAB.

5.2 Celda de Electrólisis PEM

Para el caso de la celda de electrólisis, se utiliza como referencia la celda empleada en [18], la cual obtuvo sus datos de [23] y [24]. Cabe recalcar que en el caso de las densidades de corriente de intercambio tanto del ánodo ($i_{o,a}$) como del cátodo ($i_{o,c}$), los valores elegidos para las simulaciones de los modelos son por conveniencia dentro de los intervalos normales. Esto se debe a la dificultad de obtener los valores exactos ya que existe una gran cantidad de factores que son difíciles de cuantificar. En [20] se aprecia como distintos autores a lo largo de los años han ido utilizando una gran variedad de valores para las densidades de corriente independiente de que se esté utilizando modelos muy parecidos.

Con todo lo anterior mencionado, los valores utilizados para el modelo presentado en (3.10) se muestran en la Tabla 5.1.:

Tabla 5.1 Valores simulación celda PEM

Parámetro	Valor	Unidad de Medida
$i_{o,a}$	10^{-12}	$\frac{A}{cm^2}$
$i_{L,a}$	10^{-7}	$\frac{A}{cm^2}$
$i_{o,c}$	10^{-3}	$\frac{A}{cm^2}$
R_l	0	Ω
t_m	178	μm
$\sigma_{m,ref}$	0.14	$\frac{S}{cm}$
T_{ref}	353.15	K

Las simulaciones se realizaron en celdas 7 celdas PEM conectadas en paralelo, cada una con un área de 300 cm^2 . Debido a que los valores seleccionados en [18] no fueron todos mencionados, y la forma de la curva voltaje corriente no dio exactamente igual, se optó por ecuaciones externas con tal de que las curvas calzaran perfectamente independiente de la temperatura de operación de la celda PEM. Los valores fueron obtenidos por método iterativo. Las nuevas ecuaciones por agregar al modelo son:

$$V_{ext,PEM} = -0.000375 * T + 0.6739, \text{ y} \quad (5.1)$$

$$v_{exp,PEM} = e^{0.8(i_{cell} - (2.5 * T + 350))}, \quad (5.2)$$

donde,

$V_{ext,PEM}$: Voltaje extra, celda PEM [V],

$v_{exp,PEM}$: Voltaje exponencial, celda PEM [V].

Para el caso de η_{ion} (3.9), se busca que su cambio respecto a la temperatura sea distinto, por lo tanto, se modificó de la siguiente manera:

$$\eta_{ion,nuevo} = \eta_{ion} * (0.0025 * T + 0.4). \quad (5.3)$$

El modelo final de la celda PEM a usar en esta memoria de título queda dado por

$$v_{el,cell}(i_{cell}) = 1.5184 - 1.5421 * 10^{-3}T + 9.523 * 10^{-5}T * \ln(T) + 9.84 * 10^{-8}T^2 + \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{R*T}{F} \sinh^{(-1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_{cell}}{i_{o,a}} \right) \right) + \frac{R*T}{F} \sinh^{(-1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_{cell}}{i_{o,c}} \right) \right) + R_l i_{cell} + \\ & \left(\frac{t_m}{\sigma_{m,ref} * e^{1268 \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}} i_{cell} \right) * (0.0025 * T + 0.4) + e^{0.8(i_{cell} - (2.5*T + 350))} - 0.000375 * \\ & T + 0.6739. \end{aligned}$$

En (3.10), (5.1), (5.2) y (5.3) se aprecia que todos los términos dan como resultado un voltaje, por lo que se opta por trabajarlos como fuente de tensión controladas por corriente, con la temperatura como variable externa. El modelo implementado en PLECS se puede apreciar en [Anexo A].

Como se menciona con anterioridad, las celdas tienen un área de cm², y la corriente se grafica en un intervalo de 0 a 600 amperes. Por lo que, en términos de densidad de corriente, se estaría graficando en un intervalo de 0 a 2 amperes por centímetro cuadrado. En la Figura 5-1 se puede apreciar la relación voltaje corriente de 7 celdas PEM en serie a distintas temperaturas.

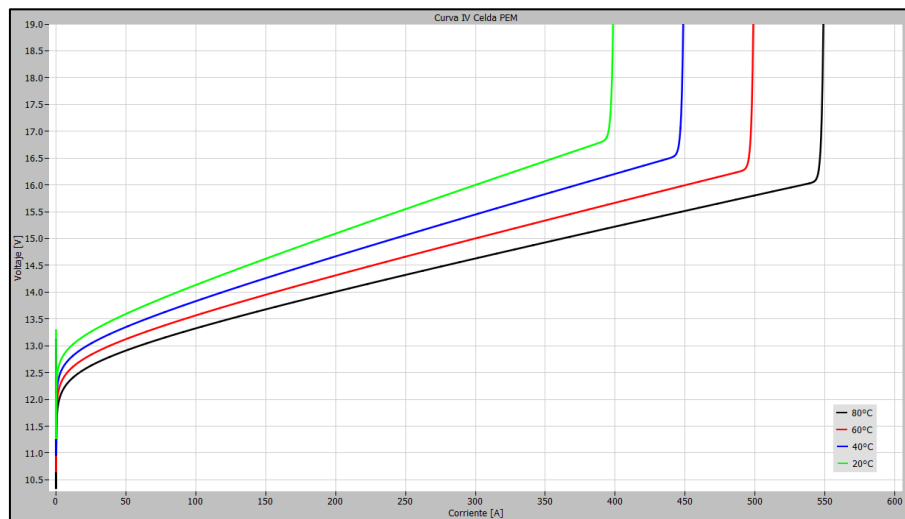


Figura 5-1 Simulación curva VI celda PEM distintas temperaturas

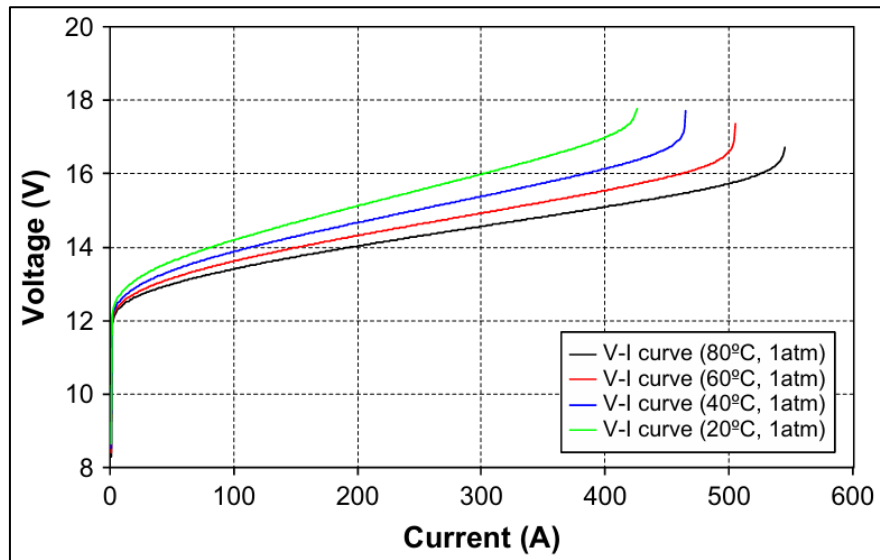


Figura 5-2 Curva VI distintas temperaturas celda PEM [18]

Si se compara la simulación obtenida, con los resultados de simulación del modelo presentado en [18], se puede notar que los valores de voltaje y corriente son muy similares en la zona que presenta un comportamiento lineal para todas las temperaturas; zona en la cual opera el sistema. Por lo que el modelo se considera válido.

Con el modelo validado, y teniendo la temperatura de la celda de electrólisis como una entrada, se pueden obtener las curvas corriente voltaje para cualquier temperatura (mientras se encuentre dentro del rango de operación de una celda PEM), e incluso cambiar la temperatura de la celda a lo largo de la simulación.

A continuación, se presenta la curva voltaje corriente para una temperatura de 70°C:

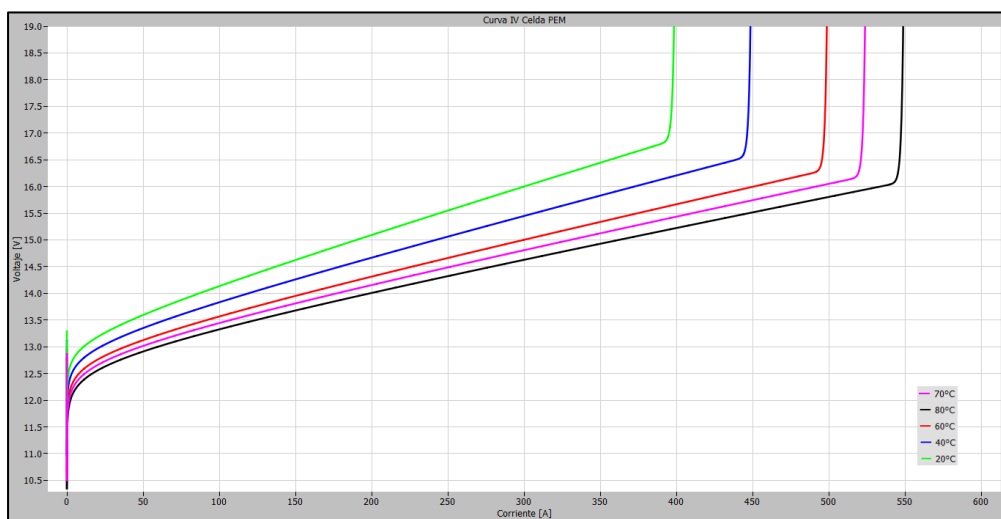


Figura 5-3 Simulación curva VI celda PEM temperatura arbitraria

Para esta memoria de título se elige una temperatura de operación de la celda de electrólisis de 80°C, debido a que como se observa en la Figura 3-7 entre mayor sea la temperatura, mejor es la eficiencia:

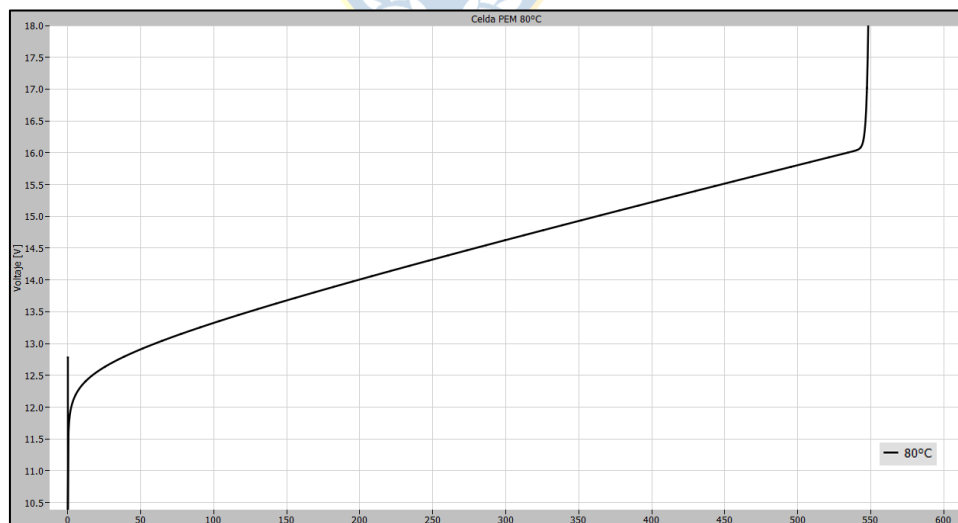
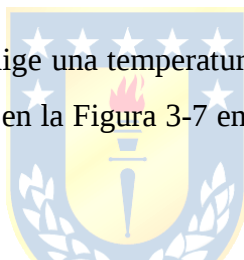


Figura 5-4 Simulación curva VI celda PEM 80°C

De la Figura 5-4 se pueden desprender los niveles de potencia que necesita la celda PEM para funcionar a distintos niveles de voltaje y corriente. Teniendo en consideración que la potencia se

obtiene de la relación:

$$p_{el,cell} = v_{el,cell} * i_{el,cell} \quad (5.5)$$

donde,

$p_{el,cell}$: Potencia total celda electrolisis [W],

$v_{el,cell}$: Voltaje total celda electrolisis [V],

$i_{el,cell}$: Corriente total celda electrolisis [A].

A continuación, se presenta la tabla de niveles de corriente, voltaje y potencia para una celda PEM a 80°C:

Tabla 5.2 Corriente, voltaje y potencia celda PEM a 80°C

Corriente [A]	Voltaje [V]	Potencia [W]
10	12.4	124
50	12.9	645
100	13.3	1330
200	14	2800
300	14.6	4380
330	14.8	4884
400	15.2	6080
500	15.8	7900

5.3 Celda Fotovoltaica

El modelo matemático descrito en (2.14) nos permite obtener la curva IV y PV del panel fotovoltaico solamente mediante los datos del datasheet. El panel elegido fue uno que se encuentra en el comercio el cual su datasheet se puede apreciar en el [Anexo B]. Se elige su versión de 445 [W]. Sus datos relevantes para su simulación son:

Tabla 5.3 Parámetros de simulación celda fotovoltaica

Parámetro	Valor	Unidad de medida
V_{mp}	40.8	V
I_{mp}	10.9	A
$V_{oc,n}$	49.4	V
$I_{sc,n}$	11.46	A
n_s	24	-
K_V	-0.25	%/°C
K_I	0.04	%/°C

Para el caso de n_{mat} se elige un valor arbitrario de 1.13, ya que se encuentra dentro de los márgenes normales [12].

Con todos los datos obtenidos del datasheet y las ecuaciones presentes en (2.16) y (2.17) es posible calcular los valores de R_s y R_p .

Tabla 5.4 Valores resistencia serie y paralelo celda fotovoltaica

Parámetro	Valor	Unidad de medida
R_s	0.5356	Ω
R_p	116.2203	Ω

La simulación de un solo panel fotovoltaico se realizó en Matlab, al igual que la obtención de los valores de R_s y R_p . Ambos códigos se pueden encontrar en [Anexo C].

A continuación, se presentan las curvas IV y PV para una temperatura de 25[°C] y 1000 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ ∴

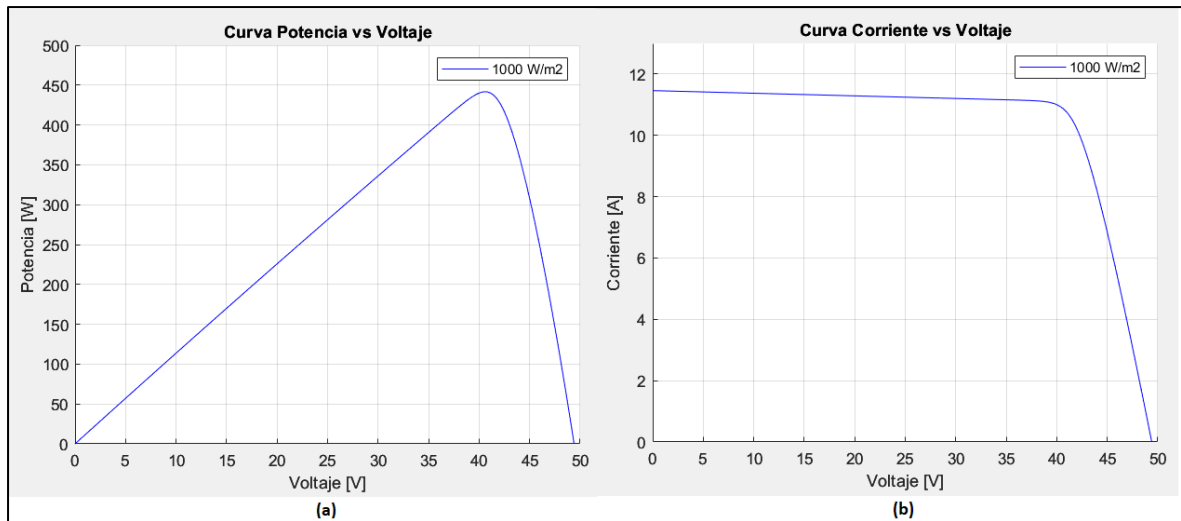


Figura 5-5 Simulación Panel fotovoltaico 1000 W/m² y 25°C a) Curva PV b) Curva IV

Para validar el modelo, se compararon las curvas IV y PV para distintas irradiancias del datasheet, con las que se obtuvieron mediante simulación. Estas simulaciones se realizaron en Plecs y el modelo se encuentra en [Anexo D].

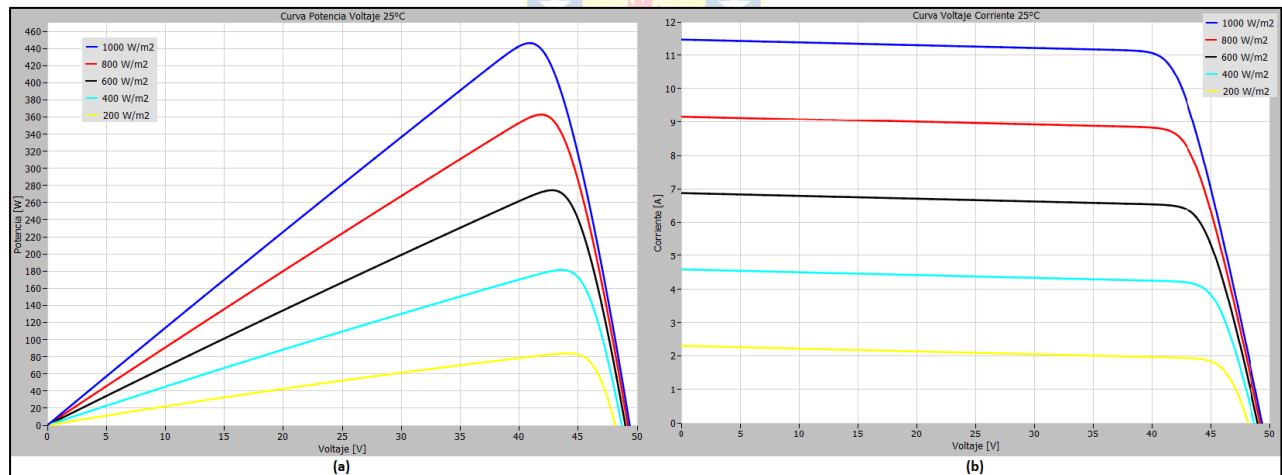


Figura 5-6 Simulación panel fotovoltaico 25°C y distintas irradiancias a) Curva PV b) Curva IV

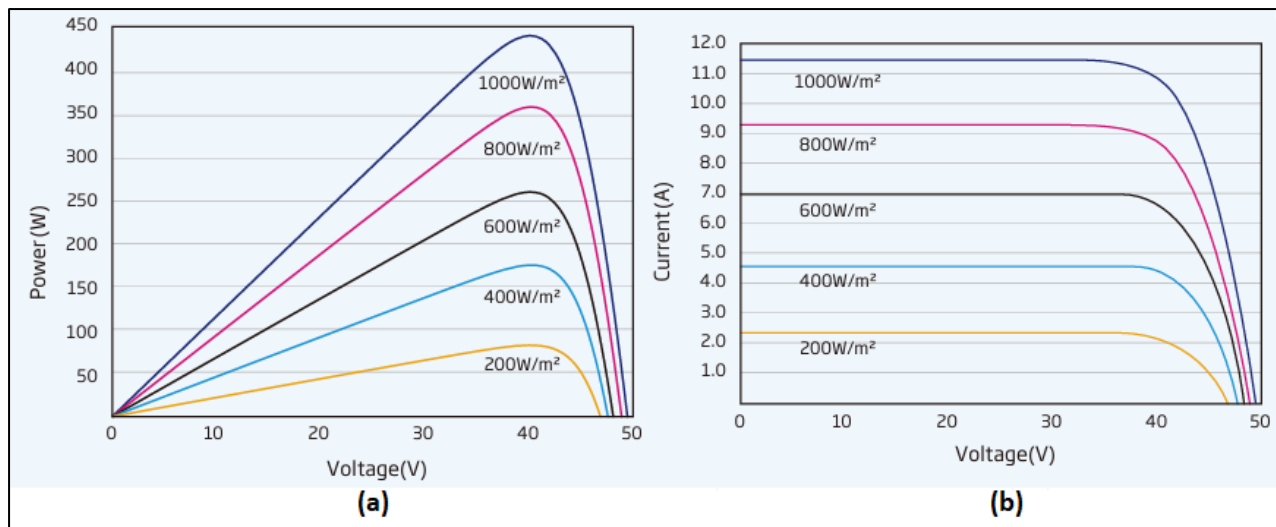


Figura 5-7 Panel fotovoltaico datasheet a) Curva PV b) Curva IV

Para esta memoria de título se opta por poner un arreglo de 12 paneles solares ubicados en paralelo para abastecer la potencia que necesita la celda de electrólisis para funcionar en su zona que tiene un comportamiento lineal:

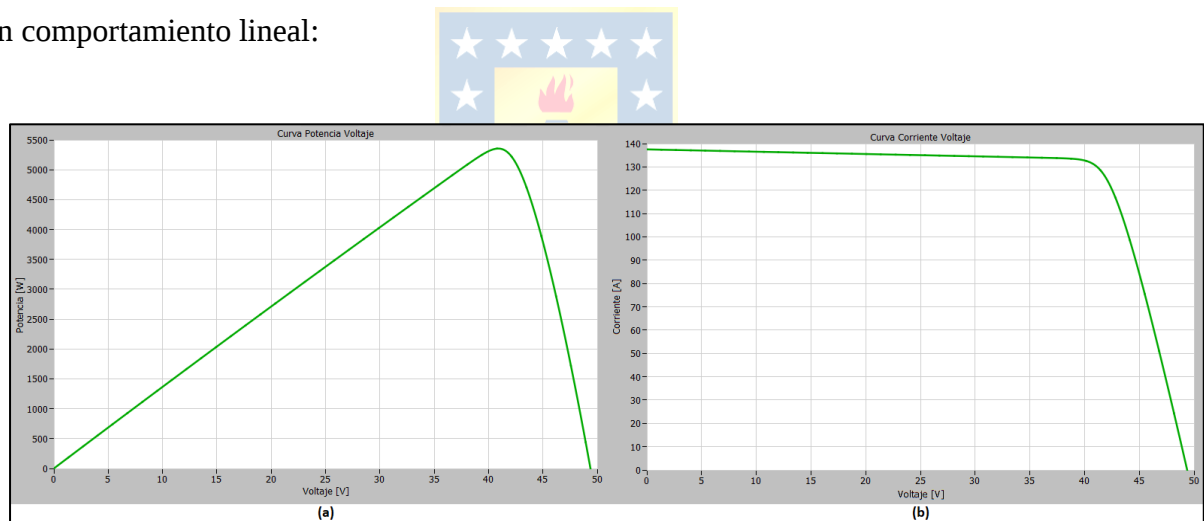


Figura 5-8 Simulación arreglo 12 paneles en paralelo a) Curva PV b) Curva IV

5.4 Convertidor Buck

Para conectar el arreglo de paneles fotovoltaicos con la celda de electrólisis se necesita un convertidor. En este caso se utiliza un convertidor del tipo Buck, pues el voltaje que requiere la celda es siempre menor al que entrega el panel.

Para conectar ambas cargas, se eligió un valor arbitrario para la celda PEM de 14.8 [V], con el

objetivo de que la celda requiera unos 4.9 [kW] de potencia. Para el caso del arreglo fotovoltaico el voltaje fue de 40.8 [V], pues es el MPP del panel, y teniendo en consideración que el arreglo es de 12 paneles en paralelo, el arreglo en su MPP suministra 5340 [W].

Considerando que es un convertidor Buck, el ciclo de trabajo se obtiene:

$$D = \frac{v_o}{v_i}. \quad (5.6)$$

Tabla 5.5 Ciclo de trabajo convertidor Buck

Parámetro	Valor	Unidad de medida
v_o	14.8	V
v_i	40.8	V
D	0.363	-

Como se vio en [Anexo A] la celda de electrólisis PEM está compuesta por fuentes de voltaje controladas, por lo que al momento de realizar la simulación con el esquema típico de un convertidor Buck, el programa entrega error, para evitar esto, se opta por cambiar algunos componentes por resistencias, y agregar otras extras. Con lo anterior mencionado, los valores del convertidor DC/DC Buck se pueden apreciar en la Tabla 5.6:

Tabla 5.6 Parámetros convertidor Buck

Parámetro	Valor	Unidad de medida
L	0.001	H
R_1	10000	Ω
R_2	0.0001	Ω
R_3	10000	Ω

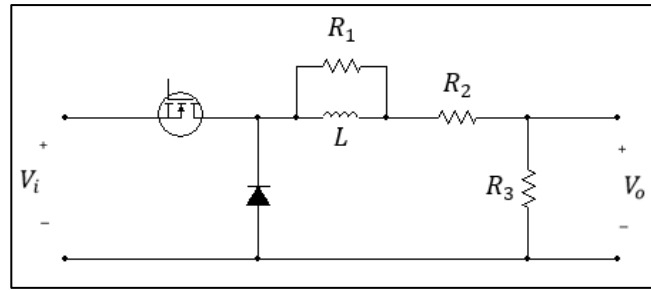


Figura 5-9 Modelo convertidor Buck utilizado

El sistema completo requiere un condensador para conectar el panel solar con el convertidor, por lo que se agrega un condensador C . El sistema completo sin control se puede apreciar en la Figura 5-10. En el caso del transistor, se utilizó un mosfet con una frecuencia de conmutación f_s . El modelo en PLECS se puede encontrar en el [Anexo E]:

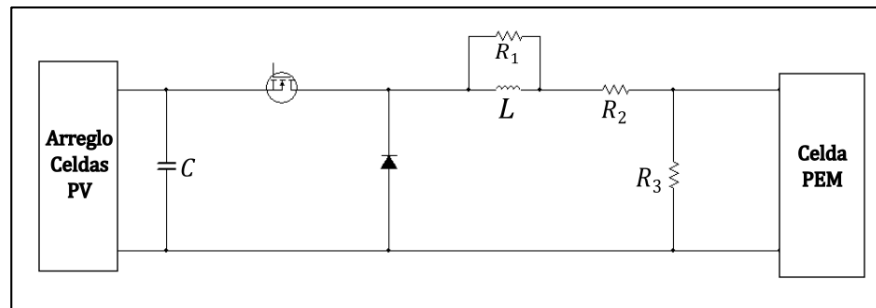


Figura 5-10 Sistema completo sin control

Tabla 5.7 Valor condensador y frecuencia de conmutación

Parámetro	Valor	Unidad de medida
C	33	mF
f	20	kHz

A continuación, se presenta las simulaciones del sistema completo sin control para una temperatura e irradiancia constantes de $25^{\circ}C$ y $1000 W/m^2$:

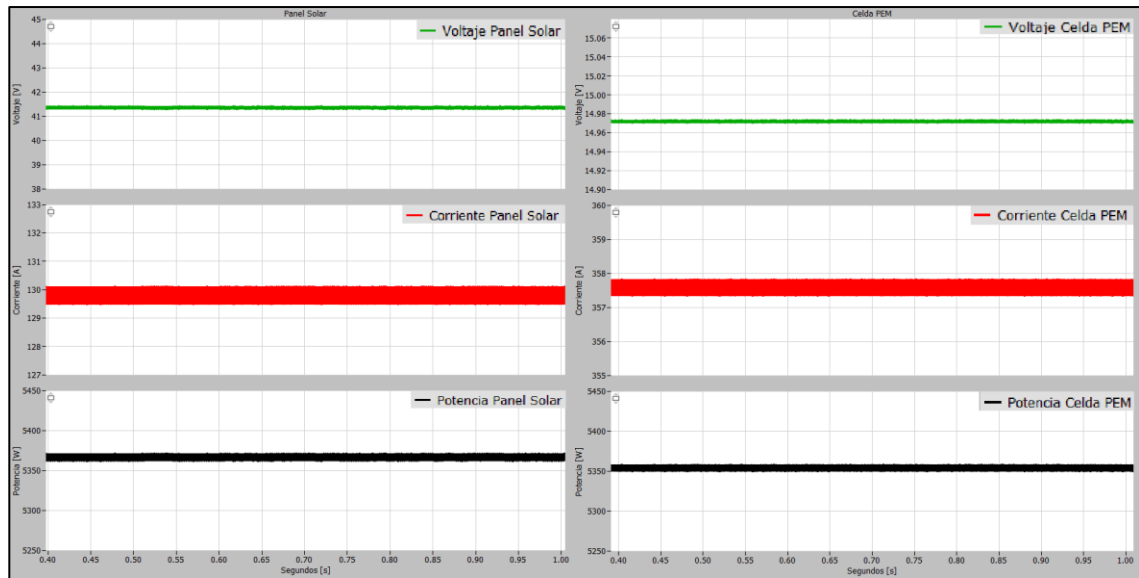


Figura 5-11 Voltaje, corriente y potencia de paneles y celda PEM sin control

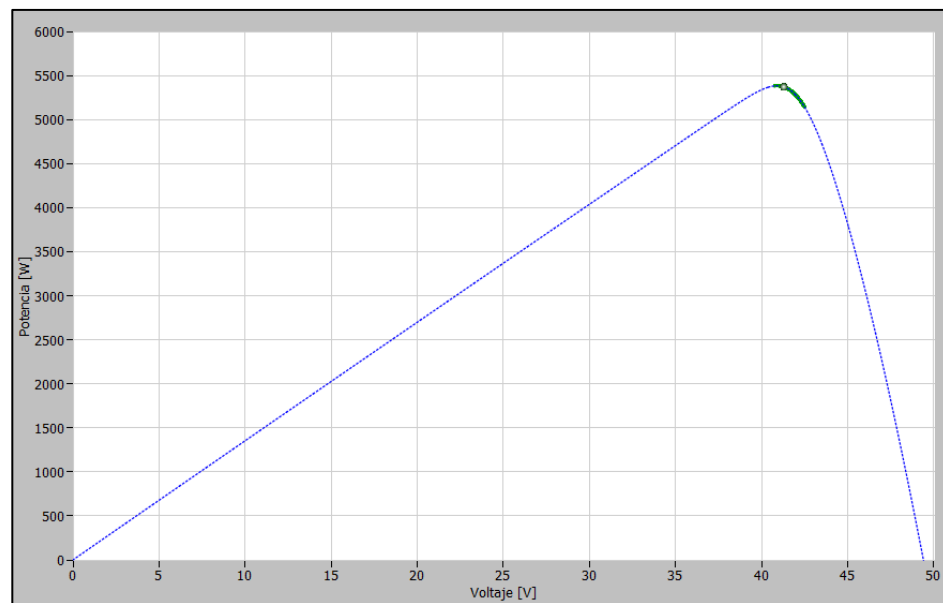


Figura 5-12 MPP sistema sin control

De la Figura 5-11 se puede apreciar que el arreglo fotovoltaico si es capaz de suministrar la potencia que necesita la celda PEM para funcionar, pero debido a que no existe un control, el valor de voltaje al que opera el panel no es el MPP, aun que si se encuentra muy cercano.

Posteriormente se realiza la simulación con un cambio escalón a los 0.6 segundos. Este cambio fue de 1000 W/m^2 a 800 W/m^2 :

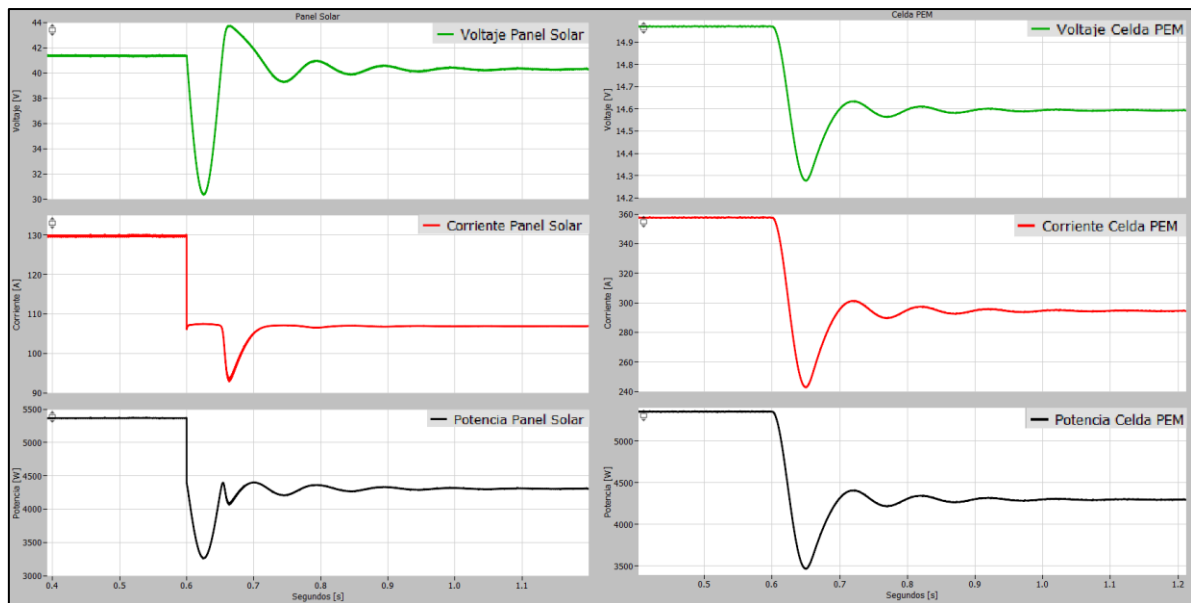


Figura 5-13 Voltaje, corriente y potencia del sistema ante cambio en irradiancia sin control

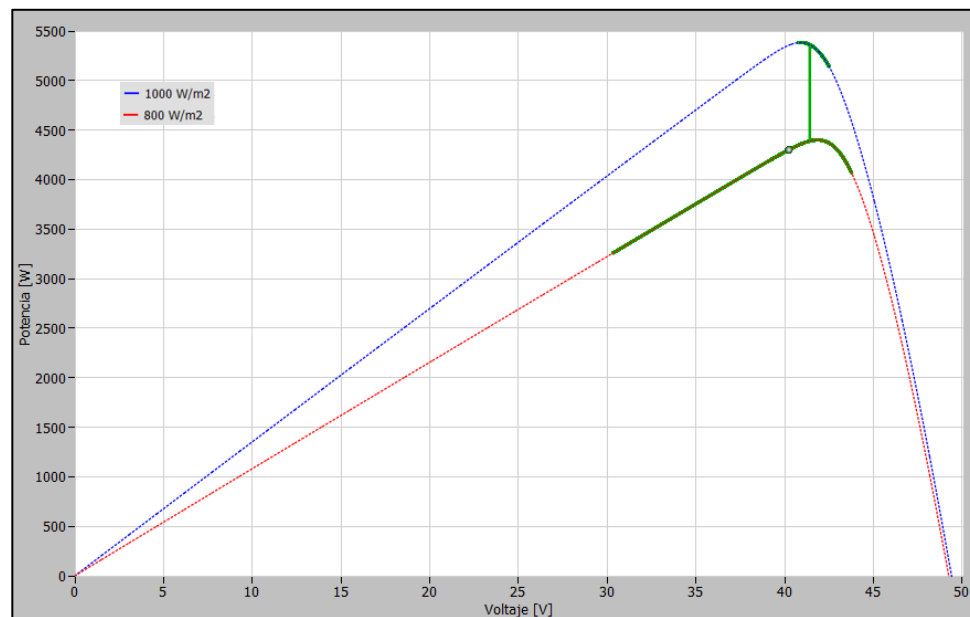


Figura 5-14 MPP sistema sin control ante cambio de irradiancia

Debido a que no existe ningún tipo de control, al existir un cambio rampa todos los valores tienen una oscilación y se demoran en llegar a un estado estacionario unos 0.4 segundos aproximadamente. Al igual que en el caso de una irradiancia fija, el arreglo de paneles puede abastecer la demanda de la celda de electrólisis, pero no trabaja en su MPP, sino que muy cercano a este.

Capítulo 6. Control

6.1 Introducción

Como se pudo ver en el capítulo anterior, al realizar las simulaciones el sistema se logra acoplar y funcionar, pero no a los niveles de tensión deseados y en caso de una perturbación, el sistema presenta una oscilación considerable.

Para el control, el modelo propuesto consta de controlar la corriente que llega a la carga. Para esto se compara con una referencia, y la resta de estos entra en un controlador PI para obtener el ciclo de trabajo del transistor. La referencia de corriente se obtiene midiendo el voltaje en el condensador C y comparando con el algoritmo de MPPT, que luego pasan por un controlador PI. En la Figura 6-1 se puede apreciar de forma gráfica.

En este capítulo se muestra cómo fue que se obtuvieron las ganancias de los controladores, y el efecto que tienen en el funcionamiento del sistema.

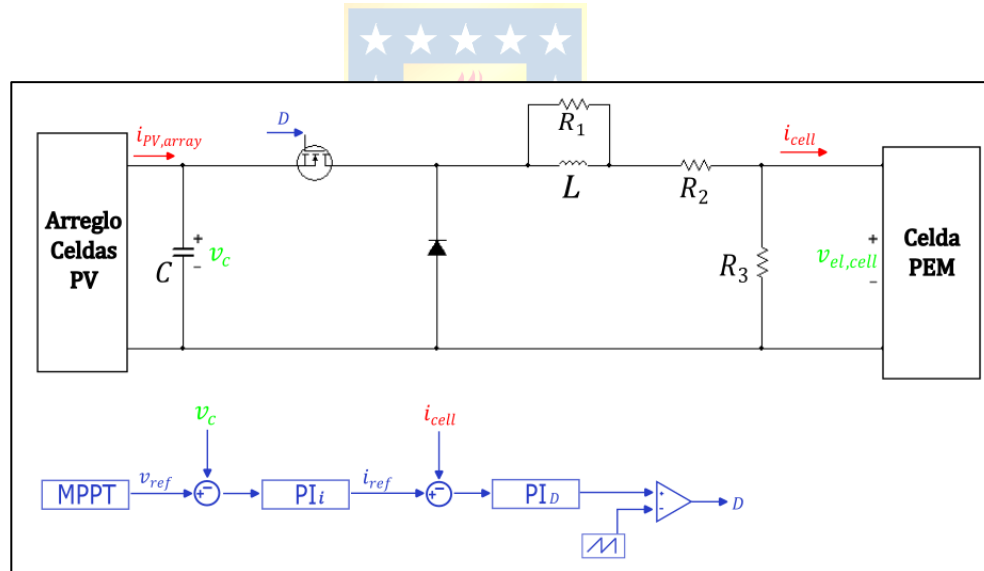


Figura 6-1 Sistema con esquema de control

6.2 Ganancias Controladores

Para obtener las ganancias de los controladores, lo primero es obtener la función de transferencia del sistema completo. De los modelos presentados en (2.14) y (5.4), correspondientes al arreglo fotovoltaico y la celda PEM, se puede observar que son modelos no lineales y modelos muy complejos. Por lo que para la obtención de la matriz de transferencia se opta por utilizar modelos más

simples del sistema, y posteriormente, se procede a linealizarlos.

En el caso del panel solar, el modelo utilizado es presentado en [25] y es:

$$i_{PV,array} = n_p * I_{sc,n} \left(1 - e^{\frac{v_{PV,array} - V_{oc,n}}{k_{PV}}} \right). \quad (6.1)$$

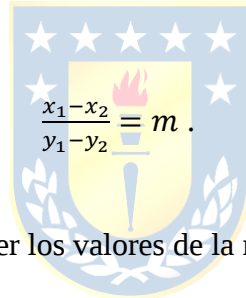
$$v_{PV,array} = v_c \quad (6.2)$$

donde,

v_c : Voltaje en el condensador C [V].

En el caso de la celda de electrólisis, se modela como un voltaje sumado a una resistencia multiplicado por la corriente que ingresa a la carga. En cuanto a la resistencia, se elige para que represente el efecto de pendiente en una ecuación de la recta. Para obtener este valor, se toman datos del tramo que presenta un comportamiento lineal en la gráfica voltaje corriente de la celda PEM que se muestra en Figura 5-4.

La ecuación que se utilizó es:



$$\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} = m. \quad (6.3)$$

Los valores que se utilizaron para obtener los valores de la resistencia se aprecian en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Valores para obtener resistencia de la celda mediante ecuación de la recta

x_1	x_2	y_1	y_2	m
14	13.3	200	100	0.007
13.3	12.9	100	50	0.008

Posteriormente, se obtuvo el promedio de m dando que la resistencia que modela la celda de electrólisis es de $R_c = 0.0075 \Omega$. Quedando el modelo de la celda como

$$v_{el,cell} = V_{oce} + i_{cell} * R_c \quad (6.4)$$

donde,

V_{oce} : Voltaje circuito abierto modelo simplificado [V],

R_c : Resistencia celda [Ω].

Una vez obtenidas las funciones que modelan tanto como al arreglo de celdas fotovoltaicas, como a la celda de electrólisis, es posible obtener la función de transferencia del sistema completo. Para obtener la función de transferencia, el diodo y el mosfet se modelaron como una fuente de tensión y una fuente de corriente.

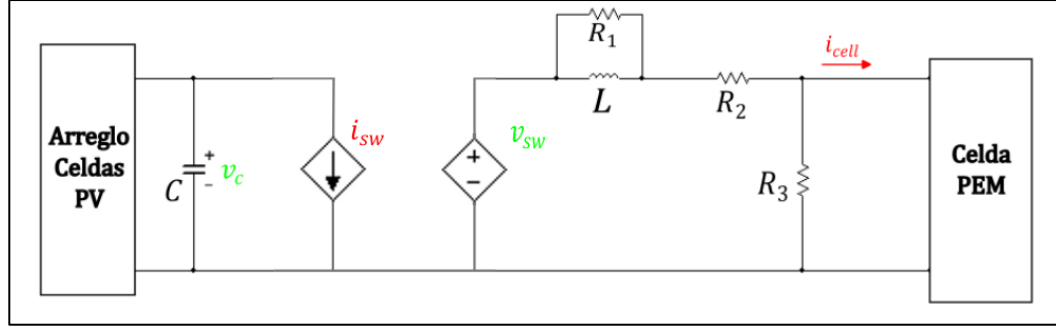


Figura 6-2 Modelo mediante fuentes dependientes del sistema completo

Las ecuaciones de ligazón quedan definidas por:

$$i_{sw} = i_{cell} * SW, \quad (6.4)$$

$$v_{sw} = v_c * SW \quad (6.5)$$

donde

- i_{sw} : Corriente en el interruptor,
- v_{sw} : Voltaje en el interruptor,
- sw : Estado del interruptor.

Mediante LCK en el condensador C , y LVK en el inductor L se obtienen las ecuaciones dinámicas que rigen el sistema, siendo estas:

$$i_{sw} = -C * \frac{dv_c}{dt} + n_p * I_{sc,n} \left(1 - e^{\frac{v_{PV,array} - V_{oc,n}}{k_{PV}}} \right), \quad (6.6)$$

$$v_{sw} = L * \frac{di_{cell}}{dt} + i_{cell} * R_2 + V_{oce} + i_{cell} * R_C. \quad (6.7)$$

Luego se despejan las derivadas, y se reemplaza por las ecuaciones de ligazón, quedando:

$$f_1 = \frac{dv_C}{dt} = \frac{-i_{cell}*D + n_p*I_{sc,n} \left(1 - e^{\frac{v_{PV,array} - V_{oc,n}}{k_{PV}}} \right)}{C}, \quad (6.8)$$

$$f_2 = \frac{di_{cell}}{dt} = \frac{v_C*D - i_{cell}*R_2 - V_{oce} - i_{cell}*R_C}{L}. \quad (6.9)$$

Como se trabaja con el modelo promedio, el estado del switch (sw) se reemplaza por el ciclo de trabajo (D). Debido a que es un sistema no lineal, es necesario encontrar el punto de equilibrio, los datos que se utilizaron se encuentran en la Tabla 6.2 y el código utilizado en [Anexo F]:

Tabla 6.2 Parámetros para obtener punto de equilibrio

Parámetro	Valor	Unidad de medida
n_p	12	-
$I_{sc,n}$	11.46	A
$V_{oc,n}$	49.4	V
k_{PV}	50	-
R_2	0.0001	Ω
V_{oce}	12.5	V
R_C	0.0075	Ω
C	33	mF
L	0.001	H
D	0.363	-

Los valores del punto de equilibrio son:

Tabla 6.3 Puntos de equilibrio del sistema

Parámetro	Valor	Unidad de medida
$v_{c,ss}$	36.27	V
$i_{cell,ss}$	87.51	A

Debido a que el modelo utilizado, no tiene en consideración R_s y R_p , el resultado dista un poco

de la realidad, pero sigue siendo útil para obtener la función de transferencia.

Posteriormente se procede a definir el vector de estado, entrada y la salida, y posteriormente se calcula el espacio de estados.

Tabla 6.4 Variables de estado, entrada y salida del sistema

Variables de estado	Entrada	Salida
$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} v_c \\ i_{cell} \end{bmatrix}$	$\mathbf{u} = [D]$	$\mathbf{y} = [i_{cell}]$

Las matrices A, B, C y D están definidas respectivamente por:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v_c} & \frac{\partial f_1}{\partial i_{cell}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial v_c} & \frac{\partial f_2}{\partial i_{cell}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-n_p * I_{sc,n} * e^{\left(\frac{v_{c,ss} - V_{oc,n}}{k_{PV}}\right)}}{C * k_{PV}} & \frac{-D}{C} \\ \frac{D}{L} & \frac{-R_2 - R_C}{L} \end{bmatrix}, \quad (6.10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial D} \\ \frac{\partial f_2}{\partial D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-i_{cell,ss}}{C} \\ \frac{v_{c,ss}}{L} \end{bmatrix}, \quad (6.11)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{\partial i_{cell}}{\partial v_c} & \frac{\partial i_{cell}}{\partial i_{cell}} \end{bmatrix} = [0 \quad 1], \quad (6.12)$$

$$\mathbf{D} = \left[\frac{\partial i_{cell}}{\partial D} \right] = [0]. \quad (6.13)$$

De esta forma, el espacio de estados del sistema es:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \frac{-n_p * I_{sc,n} * e^{\left(\frac{v_{c,ss} - V_{oc,n}}{k_{PV}}\right)}}{C * k_{PV}} & \frac{-D}{C} \\ \frac{D}{L} & \frac{-R_2 - R_C}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_{cell} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-i_{cell,ss}}{C} \\ \frac{v_{c,ss}}{L} \end{bmatrix} [D], \quad (6.14)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} v_c \\ i_{cell} \end{bmatrix} + [0][D]. \quad (6.15)$$

La FdeT, se obtiene de la forma $G(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$. Reemplazando nos queda que la

FdT del sistema completo es:

$$G_D(s) = \frac{\frac{-D \cdot i_{cell,ss}}{C \cdot L} + \frac{v_{c,ss}}{L} \left(s + \frac{n_p \cdot I_{sc,n} \cdot e^{\left(\frac{v_{c,ss} - V_{oc,n}}{k_{PV}} \right)}}{C \cdot k_{PV}} \right)}{\left(s + \frac{n_p \cdot I_{sc,n} \cdot e^{\left(\frac{v_{c,ss} - V_{oc,n}}{k_{PV}} \right)}}{C \cdot k_{PV}} \right) \left(s + \frac{R_2 + R_C}{L} \right) + \frac{D^2}{C \cdot L}} \quad (6.16)$$

Evaluando con los datos entregados en Tabla 5.1 y Tabla 5.3, la función de transferencia queda finalmente como:

$$G_D(s) = \frac{36267.4s + 1362894}{s^2 + 71.65s + 4478.23} \quad (6.17)$$

El controlador que se utilizó fue del tipo PI, controlador que es del tipo:

$$C_{PI,D}(s) = K_{p,D} + \frac{K_{i,D}}{s}, \quad (6.18)$$

donde,

$C_{PI,D}$: Controlador proporcional integral, lazo ciclo de trabajo,

$K_{p,D}$: Ganancia proporcional, lazo ciclo de trabajo,

$K_{i,D}$: Ganancia integral, lazo ciclo de trabajo.

Se utilizó la herramienta “*pidtune*” de Matlab para obtener los valores de las respectivas ganancias. El código de Matlab se puede ver en [Anexo G]:

Tabla 6.5 Ganancias controlador lazo ciclo de trabajo

Parámetro	Valor
$K_{p,D}$	0.0053
$K_{i,D}$	1.07

En el caso del controlador que nos da la corriente de referencia, se utiliza un control en cascada. Para obtener las ganancias del segundo controlador, primero tenemos que obtener la función de

transferencia del nuevo sistema retroalimentado, que se obtiene de la forma:

$$G_I(s) = \frac{G(s) * C_{PI,D}(s)}{1 + G(s) * C_{PI,D}(s)} = \frac{192.22s^2 + 45928.6s + 1458285.6}{s^3 + 263.87s^2 + 50406.8s + 1458285.6} \quad (6.19)$$

Al igual que en el lazo que nos entrega el ciclo de trabajo, se utilizó un controlador PI del tipo:

$$C_{PI,I}(s) = K_{p,I} + \frac{K_{i,I}}{s} \quad (6.20)$$

donde,

$C_{PI,I}$: Controlador proporcional integral, lazo corriente,

$K_{p,I}$: Ganancia proporcional, lazo corriente,

$K_{i,I}$: Ganancia integral, lazo corriente,

y se obtuvieron sus ganancias mediante “*pidtune*” de Matlab.

Tabla 6.6 Ganancia controlador lazo de corriente

Parámetro	Valor
$K_{p,I}$	1.76
$K_{i,I}$	645

6.3 Simulación

Para comprobar que las ganancias de los controladores se obtuvieron de forma correcta, primero se realizó la simulación con una referencia externa fija, sin tener en consideración el MPPT. Para este caso el valor al cual se fijó la referencia fue de 250 [A] y el cambio de irradiancia fue del tipo escalón al segundo de simulación, pasando de 1000 W/m² a 800 W/m². Al momento de elegir el valor de la referencia hay que tener en consideración que el panel solar tiene que ser capaz de abastecer a la celda PEM con el nuevo nivel de potencia que puede entregar debido al cambio de irradiancia. Las simulaciones se muestran a continuación:

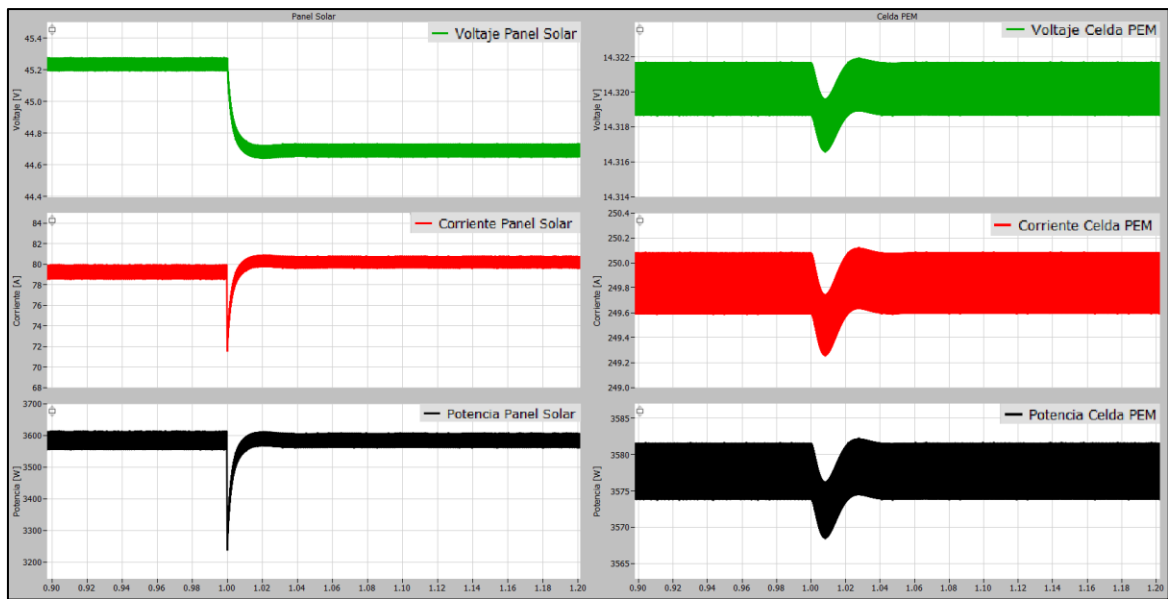


Figura 6-3 Voltaje, corriente y potencia sistema solo con controlador ciclo de trabajo

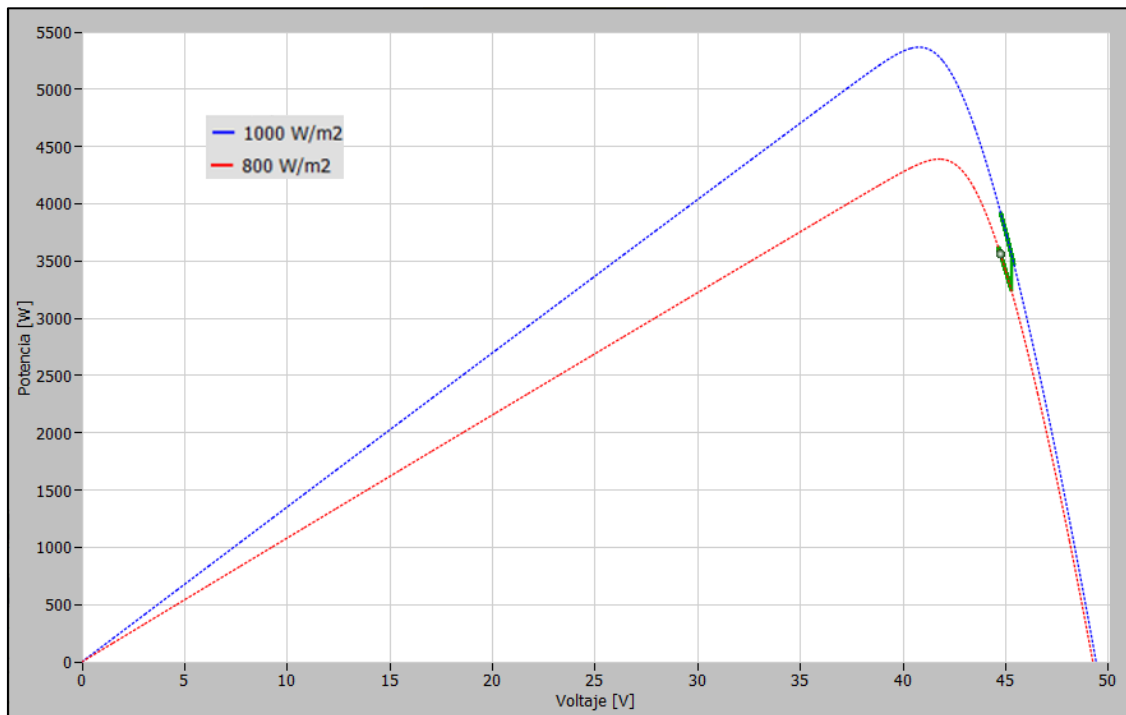


Figura 6-4 MPP sistema solo con controlador ciclo de trabajo

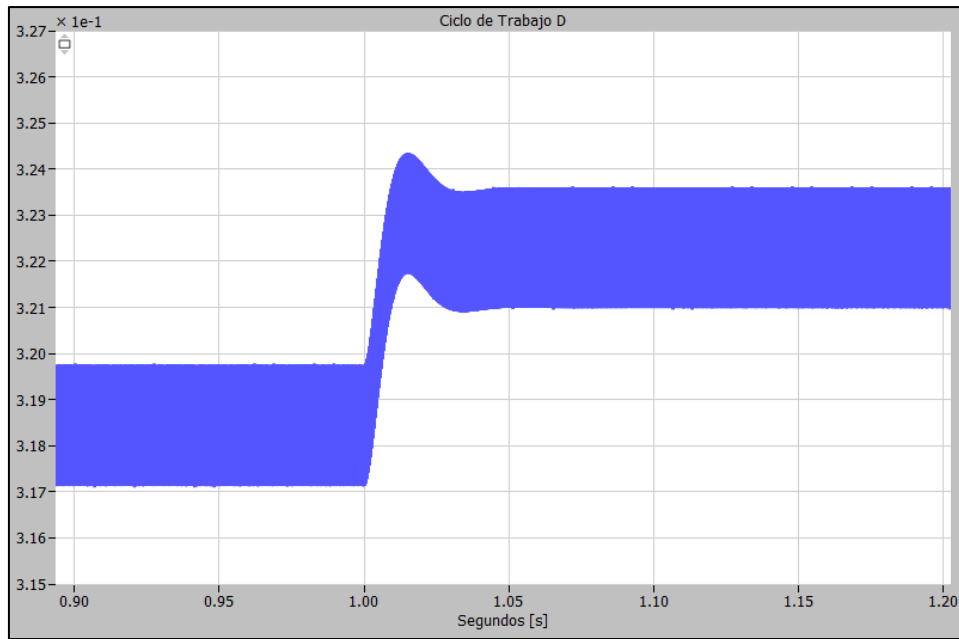


Figura 6-5 Ciclo de trabajo solo con controlador ciclo de trabajo

De las simulaciones se puede concluir que el cálculo de los parámetros del controlador fue realizado correctamente pues el nivel de corriente en la celda se logró mantener constante con el nuevo nivel de irradiancia; pero el sistema no operó en el MPPT. Debido a que la salida del controlador es el ciclo de trabajo D , al existir un cambio en el sistema, este cambió. En el sistema simulado en la Figura 5-11 no existió una variación en el ciclo de trabajo.

Posteriormente se comprobó el lazo de corriente que mide el voltaje en el condensador C y posteriormente nos entrega la referencia de corriente que entra en el controlador del lazo interno. Para esta simulación, se utiliza el mismo escalón que en la simulación anterior, y con un voltaje de referencia de 40.8 [V]:

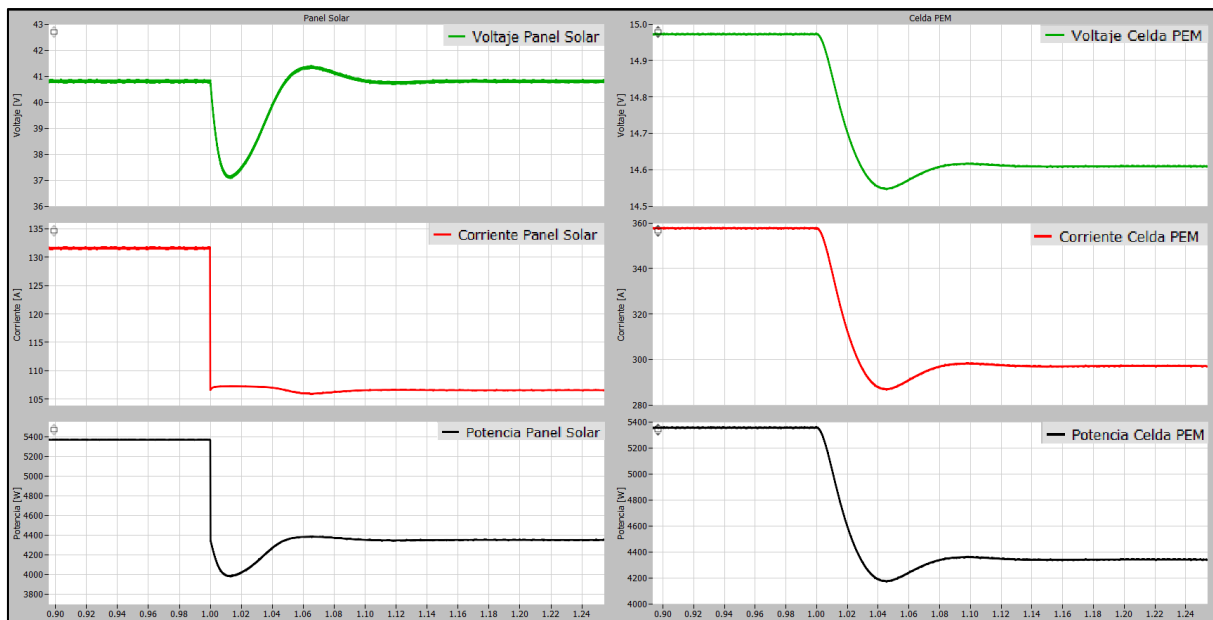


Figura 6-6 Voltaje, corriente y potencia sistema con controlador ciclo de trabajo y controlador de corriente

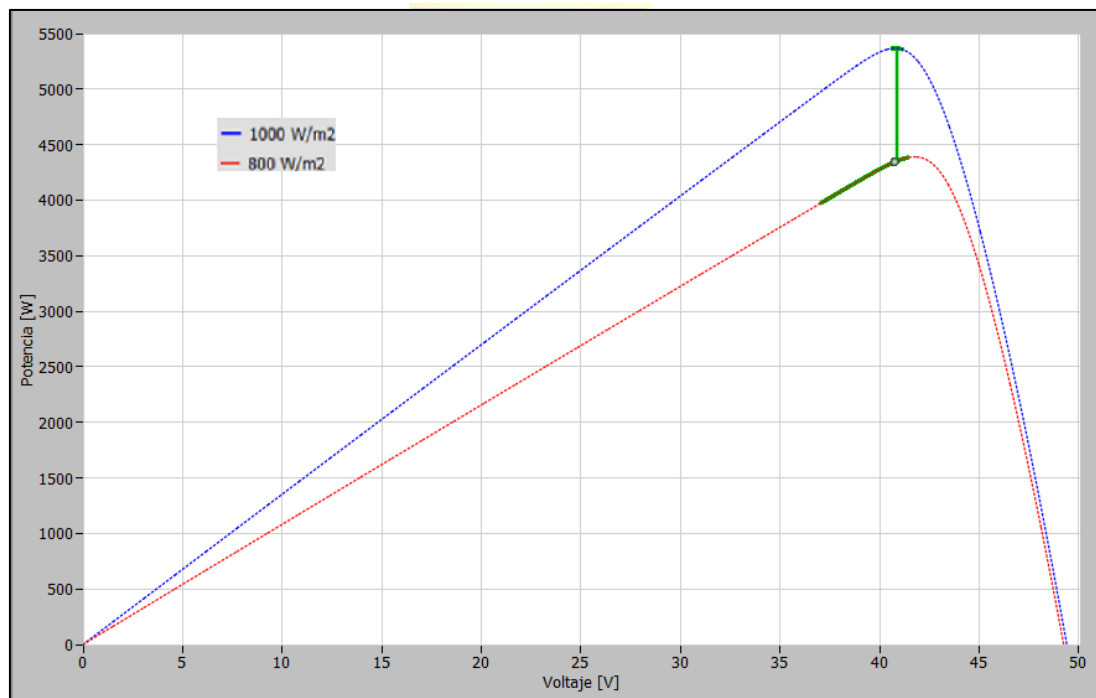


Figura 6-7 MPP sistema con controlador ciclo de trabajo y controlador de corriente

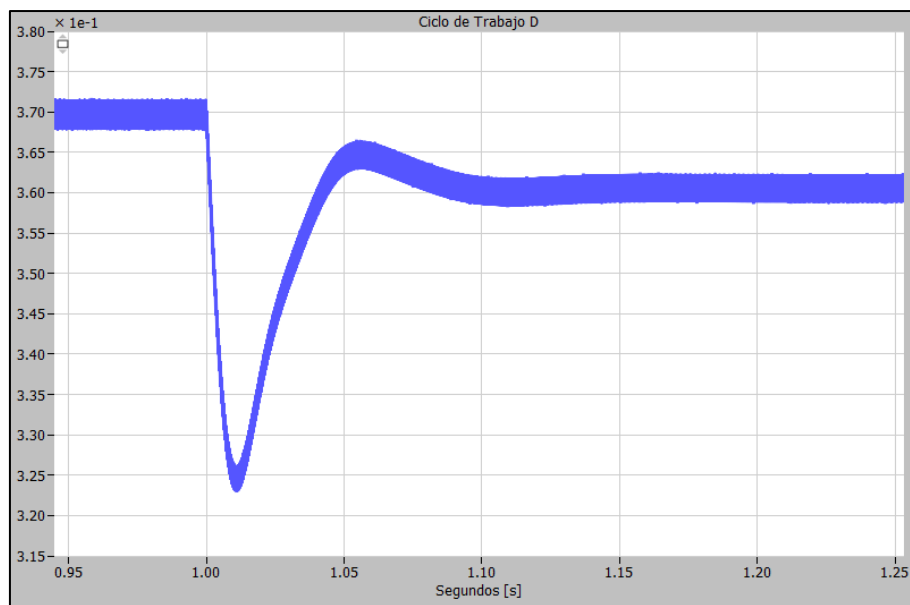


Figura 6-8 Ciclo de trabajo con controlador ciclo de trabajo y controlador de corriente

De la simulación del sistema con referencia fija del voltaje del condensador (v_c), se puede concluir que los parámetros del controlador del lazo de voltaje igual están bien calibrados, pues al existir un cambio de irradiancia, el voltaje en el panel solar se logra mantener constante. Al tener como referencia 40.8 [V] y estar con una irradiancia de 1000 W/m² el panel solar está operando en su MPPT. Pero al cambiar a 800 W/m² y mantener constante la referencia el panel solar deja de trabajar en el MPPT.

Para solucionar esto, la referencia de voltaje del condensador no se deja fija, sino que se controla mediante un algoritmo de MPPT de observar y perturbar. De este modo el sistema puede trabajar en el MPPT independiente de la irradiancia, y de la temperatura que se tenga como entrada. El algoritmo MPPT se puede observar en el [Anexo H]. A continuación, se pueden observar los resultados de realizar la simulación con el MPPT y ambos lazos de control retroalimentados. El sistema Completo se puede apreciar en [Anexo I].

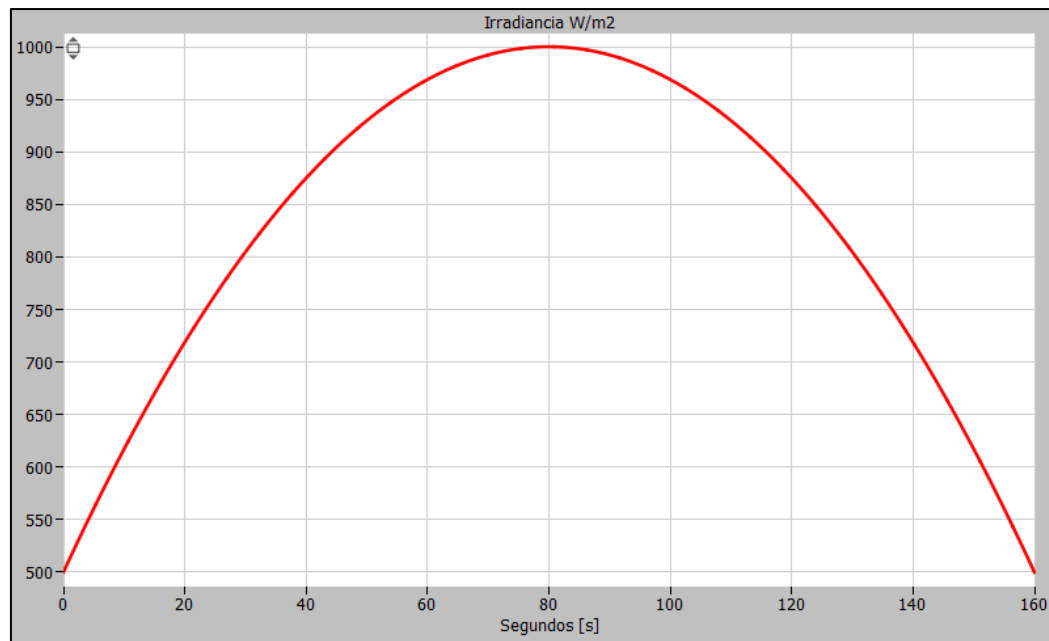


Figura 6-9 Cambio de irradiancia sistema con control completo

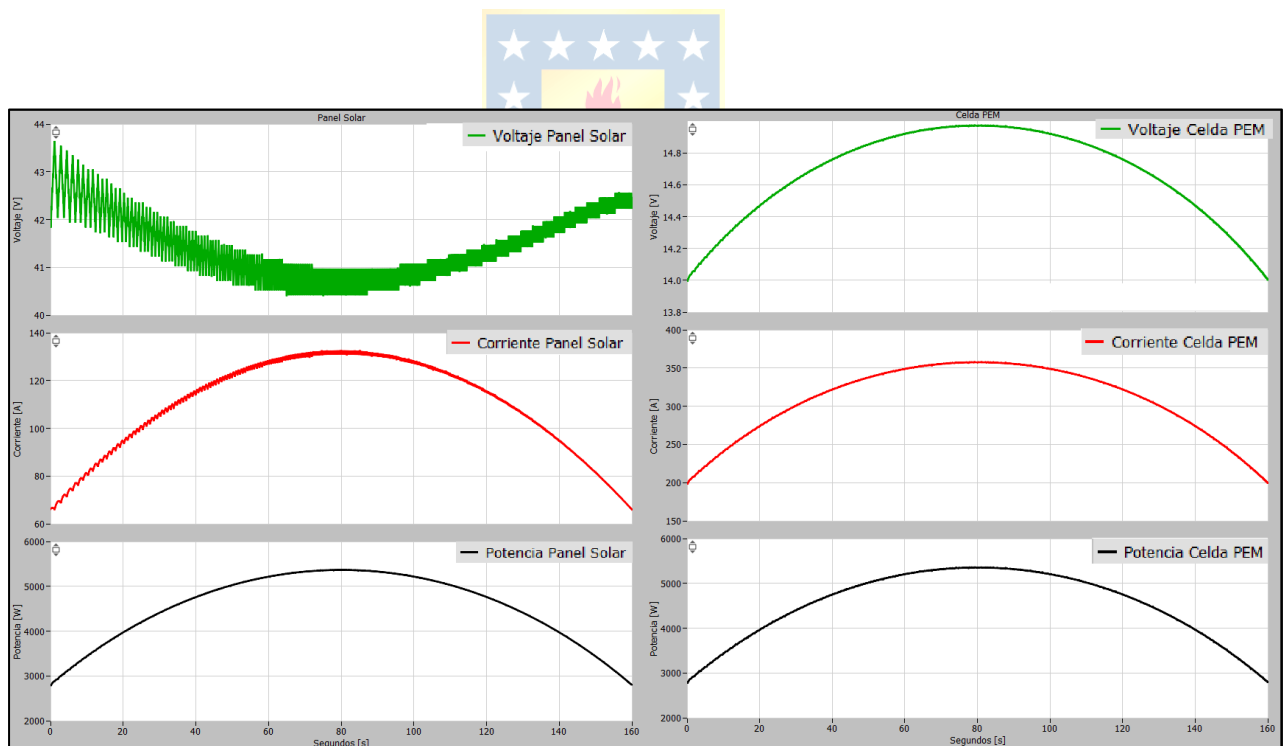


Figura 6-10 Voltaje, corriente y potencia sistema con control completo

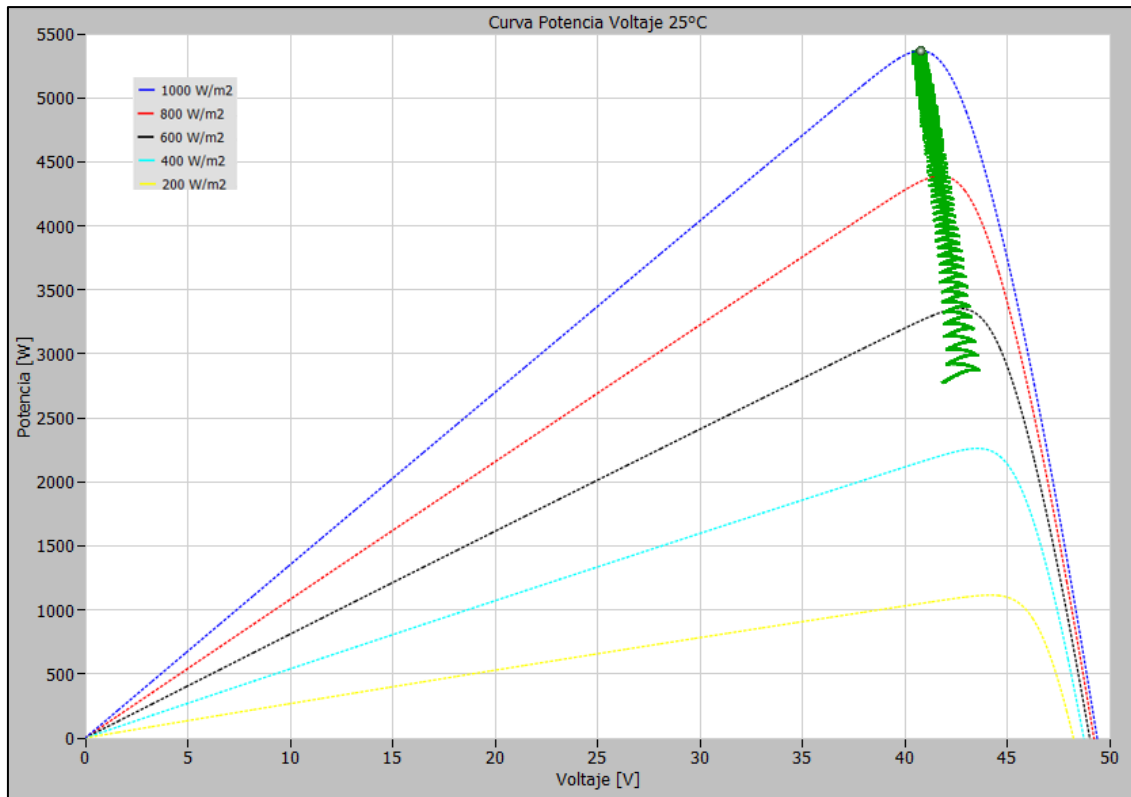


Figura 6-11 MPP de sistema con control completo

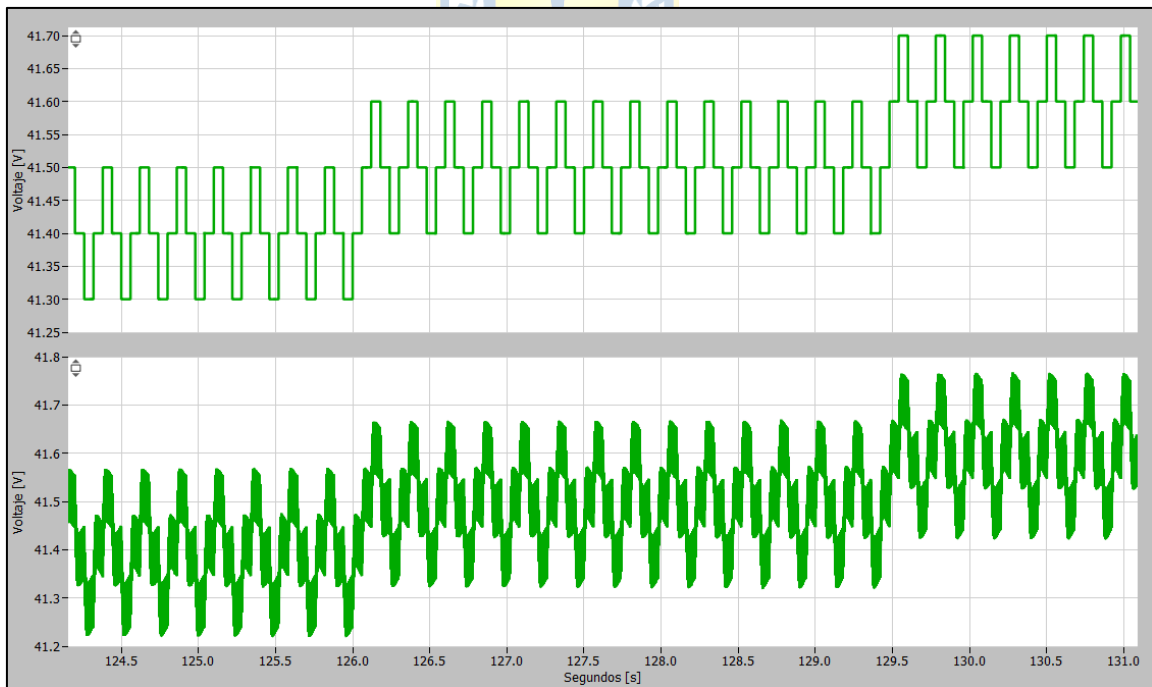


Figura 6-12 Voltaje de referencia y voltaje del condensador con control completo

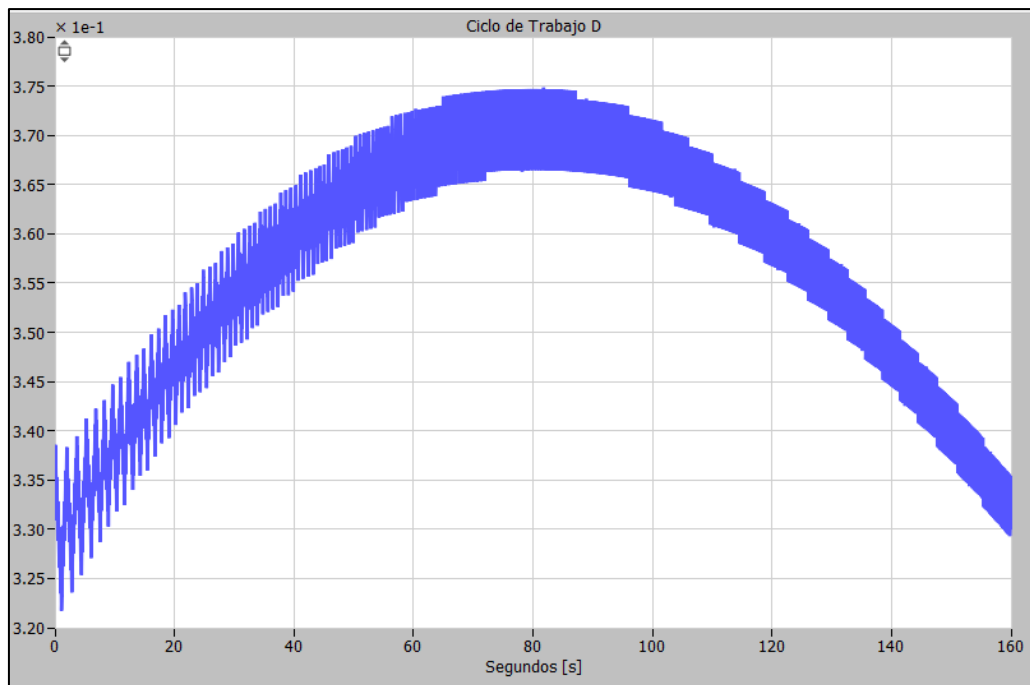


Figura 6-13 Ciclo de trabajo sistema con control completo



Capítulo 7. Conclusiones

7.1 Sumario

En la presente memoria de título se realiza un estudio para demostrar si es posible alimentar un arreglo de celdas de electrólisis de tipo PEM con paneles solares sin el uso de baterías.

Para poder realizar las respectivas simulaciones, primero se estudiaron los modelos de celdas fotovoltaicas presentes en la literatura y posteriormente se desarrollaron con el objetivo de obtener un modelo capaz de tener la irradiancia y temperatura como entrada. Esto con el objetivo de simular el efecto de tendría que pasase una nube o el cambio natural de irradiancia a lo largo de un día. Igual se explicaron los tipos de MPPT con el objetivo de que siempre se esté obteniendo la máxima potencia posible de los paneles solares.

Luego, se realiza el estudio de las celdas de electrólisis, viendo cuales son los tipos existentes hoy en día en el mercado, y cuáles son sus ventajas y desventajas entre sí. Se eligió el tipo de celda PEM y se desarrolló el modelo con el objetivo de tener la temperatura a la que opera la celda como una entrada. Cabe destacar que, a mayor temperatura, mayor es la eficiencia de la celda.

Posteriormente se presentaron los tipos de convertidores, en qué situación se utiliza cada uno y cuáles son sus técnicas de modulación.

En el capítulo cinco, se realizan las simulaciones de los respectivos modelos que se presentan en los apartados anteriores y se comparan con sus respectivos datasheets con el objetivo de corroborar que los modelos fueran fieles a la realidad. A continuación, se efectúa la modelación del sistema completo sin control; sistema conformado por el arreglo de celdas fotovoltaicas, un condensador, convertidor Buck y celda PEM. En la simulación se aprecia que el sistema sin control no funciona en su punto óptimo.

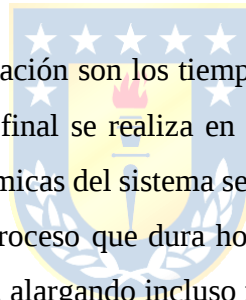
Finalmente se obtuvo la función de transferencia del sistema, y con estas se calcula las ganancias de los controladores; control que se encarga de comparar el voltaje en el condensador ubicado a la salida del arreglo de paneles fotovoltaicos con el objetivo de entregar una referencia de corriente que luego se compara con la corriente que entra en la celda PEM para entregar el ciclo de trabajo que debe tener el convertidor Buck. Se ejecuta una simulación con un cambio de irradiancia en forma de parábola inversa con el objetivo de simular el cambio de irradiancia a lo largo de un día.

7.2 Conclusiones

Al realizar la simulación con un cambio de irradiancia entre 500 W/m^2 , 1000 W/m^2 y posteriormente 500 W/m^2 se puede apreciar que el sistema es capaz de seguir este cambio de irradiancia sin ningún problema, pues en todo instante, el arreglo de paneles fotovoltaicos se encuentra trabajando en su punto de máxima potencia. Sumado a esto, la potencia que abastece el arreglo de paneles fotovoltaicos es suficiente para que la celda PEM este siempre trabajando, y el cambio en los niveles de potencia de la celda no son tan abruptos, por lo que se alarga la vida de esta.

Otra conclusión que se puede obtener es que se necesitan un nivel mínimo de potencia en el arreglo del panel fotovoltaico antes de empezar a abastecer a la celda PEM, esto debido a que en niveles de irradiancia muy bajos, la curva PV del arreglo de paneles solares no tiene la forma característica de campana asimétrica, por lo que al algoritmo de MPPT se le hace muy difícil encontrar el MPP sumado a que los niveles de tensión son muy distantes a los que se presentan en niveles mayores de irradiancia. Por este motivo no se pudo simular una irradiancia con forma de parábola inversa con valor inicial en 0 W/m^2 .

Otro factor para tener en consideración son los tiempos de simulación, pues debido a motivos de la memoria de título, la simulación final se realiza en un lapso de 160 [s], pero si se llegase a implementar un sistema similar las dinámicas del sistema serían mucho más lentas, pues el cambio de irradiancia a lo largo de un día es un proceso que dura horas, por lo que la celda PEM presentaría cambios mucho menores en su potencia, alargando incluso más su vida útil.



7.3 Trabajos Futuros

A raíz de esta memoria de título surgen nuevas interrogantes que pueden ser desarrolladas en futuros trabajos, las cuales son:

- **Estudio de un sistema de control externo que supervise el acople del sistema:** Como se mencionó en las conclusiones, en niveles de irradiancia muy bajos el arreglo de paneles fotovoltaicos no puede abastecer a la celda PEM por lo que el sistema colapsa. Una posible solución a esto es implementar un sistema de control que supervise todo y cuando se tengan los niveles de potencia necesarios, el sistema se acople. Otra solución a esto es tener una batería solo en el arranque, permitiendo que el sistema trabaje en niveles bajos de irradiancia, y una vez se pase el nivel de nivel de irradiancia crítico, se desacople la batería, y el sistema pueda funcionar solo con lazos de control.
- **Estudio de niveles y calidad del hidrógeno producido:** A lo largo de esta memoria de título solo se habla de abastecer a la celda de electrólisis PEM, pero nunca se menciona los niveles de hidrógeno que se producen ni la calidad de este, por lo que un área muy interesante que se abre es la comparación del sistema presentado en esta memoria de título y un sistema típico que emplea el uso de baterías.



Referencias Bibliográficas

- [1] Comisión Nacional de Energía. “Reporte energético SEN - octubre 2023”, <https://www.cne.cl> , 2023.
- [2] Ministerio de Energía de Chile, “Plan de acción de hidrógeno verde 2023–2030: Documento para el proceso de consulta pública”, Gobierno de Chile. 2023.
- [3] Ministerio de Energía, “Estrategia nacional de hidrógeno verde”. Gobierno de Chile, 2020.
- [4] Valencia Chavarriaga, J. A. “Transporte de hidrógeno usando infraestructura existente, una apuesta exitosa para la industria energética en Colombia”, Tesis de maestría, Universidad Externado de Colombia, Facultad de Derecho, Maestría en Regulación Energética, Bogotá, Colombia, 2023.
- [5] Romero Pavez, M. A. “Estudio de la contaminación por plomo en suelos de una planta de reciclaje de baterías cerrada en Freire, IX Región”, Seminario de título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Escuela de Pregrado, Santiago, Chile, 2017.
- [6] Cata Sánchez, J. E., & Rodríguez Sócola, F. M. “Análisis matemático de un panel solar fotovoltaico de silicio” Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [7] M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," en *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [8] Y. -C. Hsieh, L. -R. Yu, T. -C. Chang, W. -C. Liu, T. -H. Wu and C. -S. Moo, "Parameter Identification of One-Diode Dynamic Equivalent Circuit Model for Photovoltaic Panel," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 1, pp. 219-225, enero 2020.

[9] Urrutia Pieper, J. I. “Generación de potencia controlada orientada a servicios auxiliares en convertidores fotovoltaicos conectados a la red”, Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, Valparaíso, Chile, 2021.

[10] M. Matam, "PV Array IV Curves: Why We See Them The Way We Do?," *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Calgary, AB, Canada, pp. 1578-1580, 2020.

[11] M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays," *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, pp. 1244-1254, 2009.

[12] Abdelhalim Zekry, Ahmed Shaker, Marwa Salem, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Capítulo 1 - Solar Cells and Arrays: Principles, Analysis, and Design, Editor: Imene Yahyaoui, Elsevier, Páginas 3-56, 2018.

[13] Singh, O. P., Bhalla, D. K., & Yadav, U. “Modeling and analysis of MPPT control techniques for grid connected PV generation”. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, Volumen 3, Número 4, páginas 324-330, julio-septiembre 2016.

[14] D. Ghislain and X. Li, "Combination Result of Two MPPT Techniques (Fuzzy Logic and Perturb and Observe Method): Comparison with The Conventional Perturb and Observe Method," *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Taiyuan, China, pp. 4323-4327, Octubre 2021.

[15] Genia Global Energy. “Los diferentes tipos de hidrógeno según sus colores”. Recuperado de: <https://geniaglobal.com/tipos-de-hidrogeno-segun-colores/> (sin fecha).

[16] S. Shiva Kumar, V. Himabindu, “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review”, *Materials Science for Energy Technologies*, Volumen 2, Número 3, Páginas 442-454, mayo 2019.

- [17] Romero Polanco, J. “Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción”, Tesis de grado, Grado en ingeniería química, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, España, julio 2018.
- [18] García-Valverde, R., Miguel, C., Martínez-Bejar, R., & Urbina, A. “Optimized photovoltaic generator-water electrolyser coupling through a controlled DC-DC converter”. *International journal of hydrogen energy*, 33, 5352-5362. septiembre 2008.
- [19] A. H. A. Rahim, A. S. Tijani, F. H. Shukri, S. Hanapi and K. I. Sainan, "Mathematical modelling and simulation analysis of PEM electrolyzer system for hydrogen production," *3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT) 2014*, Kuching, pp. 1-7, 2014.
- [20] D.S. Falcão, A.M.F.R. Pinto, “A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners”, *Journal of Cleaner Production*, Volumen 261, abril 2020.
- [21] Dariusz Czarkowski, *Power Electronics Handbook* (Tercera edición), capítulo 13 - DC–DC Converters, Editor: Muhammad H. Rashid, Editorial: Butterworth-Heinemann, Páginas 249-263, enero 2011.
- [22] Marulanda Durango, J. J., Ordoñez, J. J., & Mosquera Machado, L. F. “Diseño y construcción de un convertidor dc/dc tipo Boost con PWM ajustable”. *Scientia Et Technica*, 22(1), 9-14, marzo 2017.
- [23] Pyoungho Choi, Dmitri G. Bessarabov, Ravindra Datta, “A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis”, *Solid State Ionics*, Volumen 175, Número 1–4, Páginas 535-539, noviembre 2004.
- [24] Tony Thampan, Sanjiv Malhotra, Jingxin Zhang, Ravindra Datta, “PEM fuel cell as a membrane reactor”, en *Catalysis Today*, Volumen 67, Número 1–3, Páginas 15-32, junio 2001.
- [25] José Espinoza Castro, “Convertidores Estáticos Multinivel, apuntes de clases de 543811 – CEM”, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, 2022.

Anexo A: Modelo Plecs celda PEM

El modelo que se utilizó en PLECS para simular una celda de electrolisis del tipo PEM se presenta a continuación:

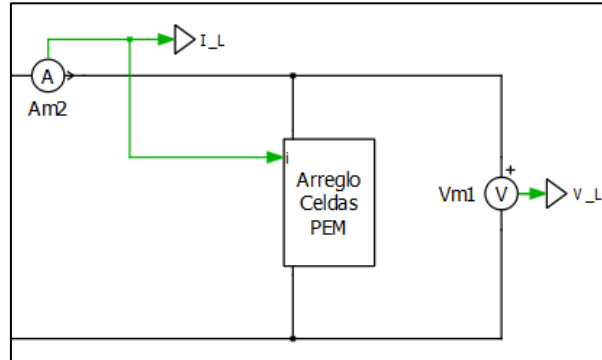


Figura A-1 Arreglo celda PEM PLECS

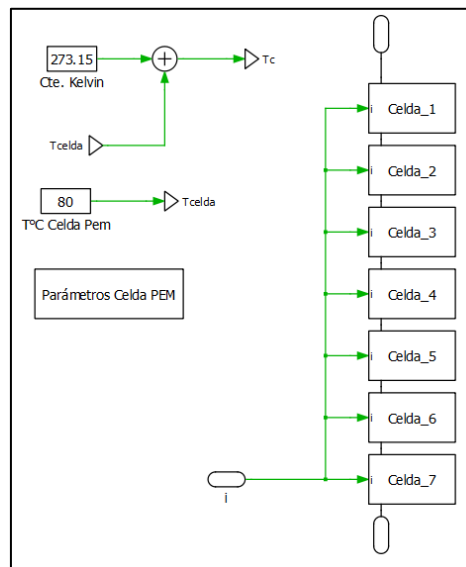


Figura A-2 Celdas PEM conectadas serie PLECS

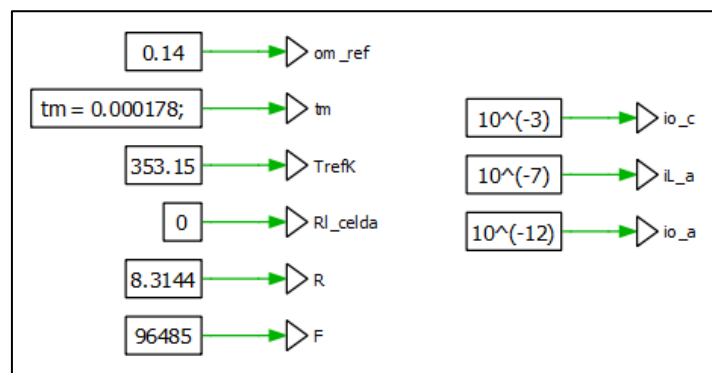


Figura A-3 Parámetros Celda PEM PLECS

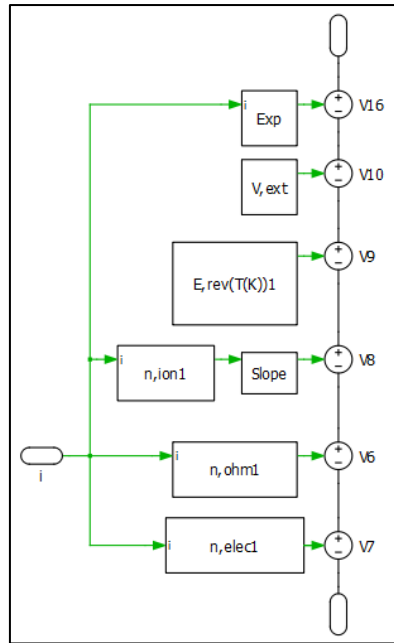


Figura A-4 Interior Celda PEM PLECS

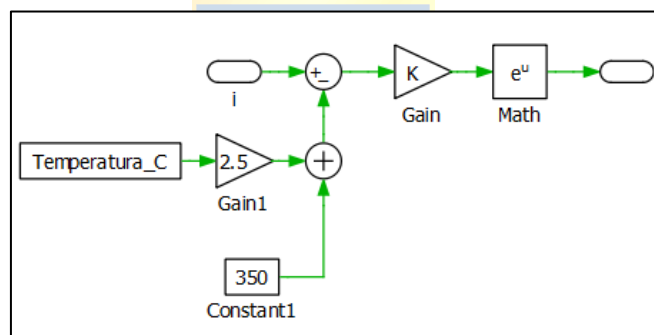


Figura A-5 Exponencial externa celda PEM PLECS

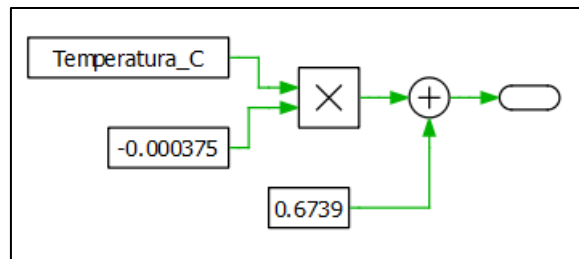


Figura A-6 Voltaje extra celda PEM PLECS

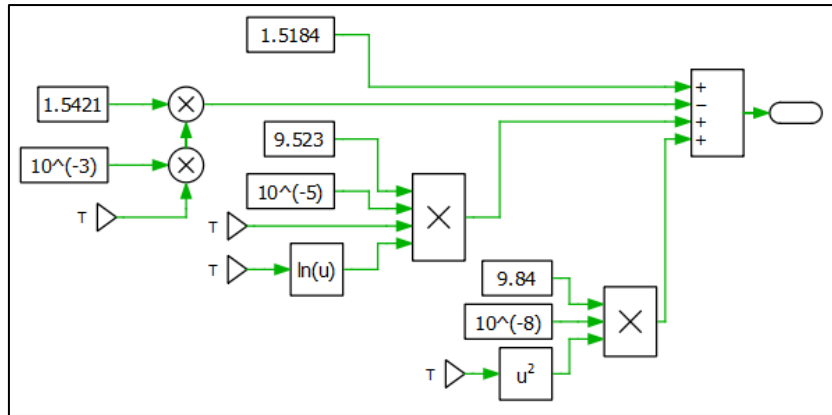


Figura A-7 Voltaje circuito abierto celda PEM PLECS

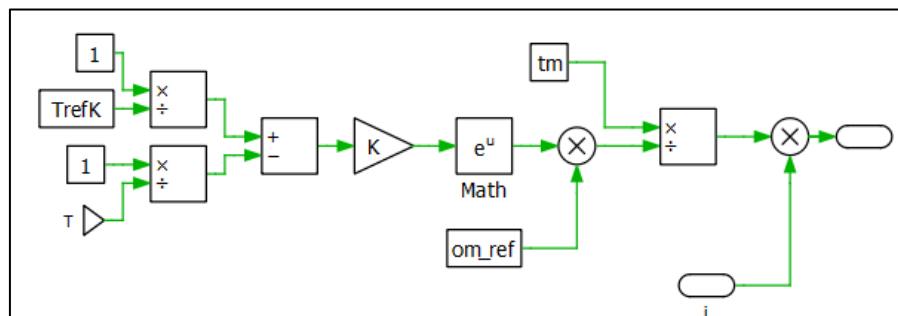


Figura A-8 sobretensión iónica PLECS

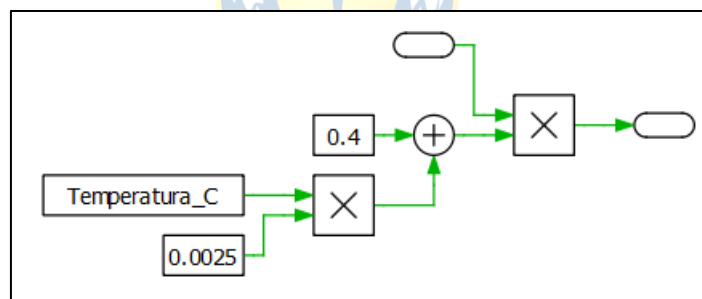


Figura A-9 Ganancia sobretensión iónica PLECS

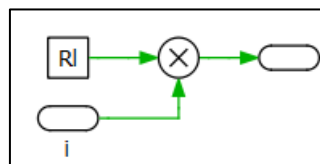


Figura A-10 sobretensión óhmica PLECS

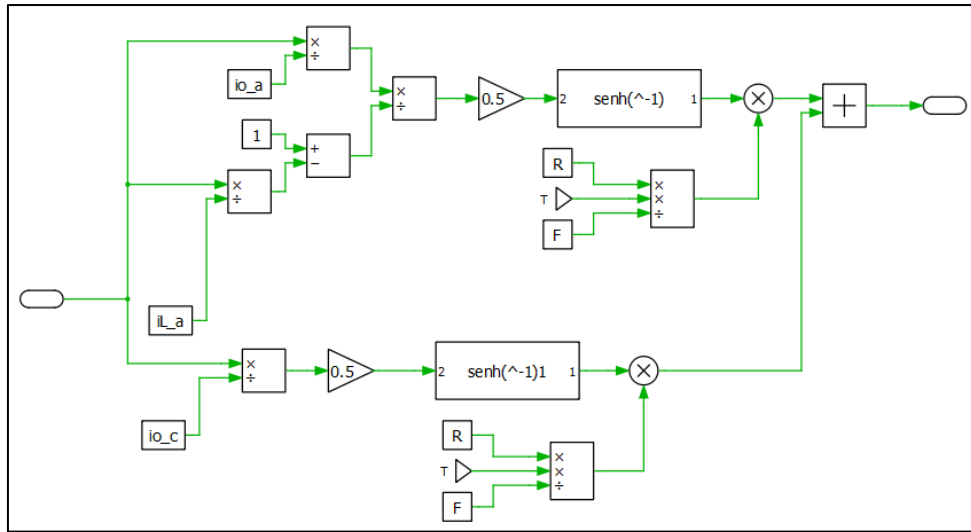


Figura A-11 sobretensión en los electrodos PLECS



Anexo B: Datasheet panel fotovoltaico

Mono

Multi

Solutions

THE

TALLMAX^M

FRAMED 144 LAYOUT MODULE

144 LAYOUT

MONOCRYSTALLINE MODULE

435-460W

POWER OUTPUT RANGE

21.0%

MAXIMUM EFFICIENCY

0~+5W

POSITIVE POWER TOLERANCE

Founded in 1997, Trina Solar is the world's leading total solution provider for solar energy. With local presence around the globe, Trina Solar is able to provide exceptional service to each customer in each market and deliver our innovative, reliable products with the backing of Trina as a strong, bankable brand. Trina Solar now distributes its PV products to over 100 countries all over the world. We are committed to building strategic, mutually beneficial collaborations with installers, developers, distributors and other partners in driving smart energy together.

Comprehensive Products and System Certificates

IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716

ISO 9001: Quality Management System

ISO 14001: Environmental Management System

ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification

ISO45001: Occupational Health and Safety Management System









PRODUCTS

TSM-DE17M(J)

POWER RANGE

435-460W



High power

- Up to 460W front power and 21.0% module efficiency with half-cut and MBB (Multi Busbar) technology bringing more BOS savings
- Lower resistance of half-cut and good reflection effect of MBB ensure high power

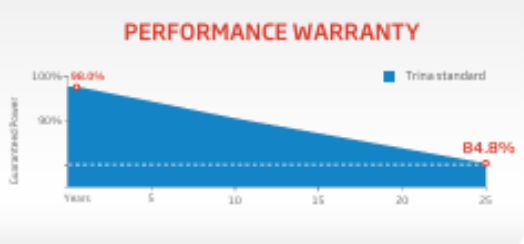
High reliability

- Ensured PID resistance through cell process and module material control
- Resistant to salt, acid and ammonia
- Mechanical performance: Up to 5400 Pa positive load and 2400 Pa negative load

High energy generation

- Excellent IAM and low light performance validated by 3rd party with cell process and module material optimization
- Better anti-shading performance and lower operating temperature

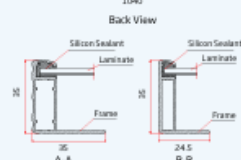
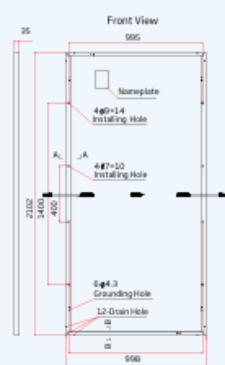
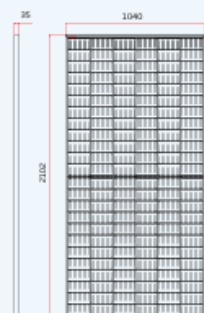
PERFORMANCE WARRANTY



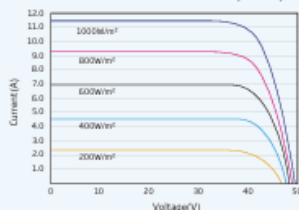
Years	Power Output (%)
0	100% (58.0%)
25	84.8%



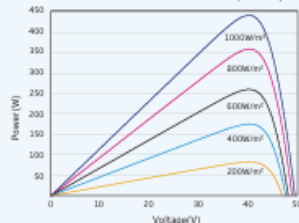
DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



I-V CURVES OF PV MODULE(445W)



P-V CURVES OF PV MODULE(445W)



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- P_{MAX} (Wp)*	435	440	445	450	455	460
Power Tolerance- P_{MAX} (W)	0 ~ +5					
Maximum Power Voltage- V_{MP} (V)	40.5	40.7	40.8	41.0	41.2	41.3
Maximum Power Current- I_{MP} (A)	10.74	10.82	10.90	10.98	11.06	11.13
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	49.0	49.2	49.4	49.6	49.8	50.0
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	11.31	11.39	11.46	11.53	11.61	11.68
Module Efficiency η (%)	19.9	20.1	20.4	20.6	20.8	21.0

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.

*Measuring tolerance: $\pm 3\%$.

ELECTRICAL DATA (NOCT)

Maximum Power- P_{MAX} (Wp)	328	332	336	340	344	347
Maximum Power Voltage- V_{MP} (V)	38.2	38.4	38.5	38.7	38.9	39.1
Maximum Power Current- I_{MP} (A)	8.60	8.66	8.71	8.77	8.84	8.89
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	46.1	46.3	46.5	46.6	46.8	47.0
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	9.11	9.18	9.24	9.29	9.36	9.41

NOCT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
Cell Orientation	144 cells (6 × 24)
Module Dimensions	2102 × 1040 × 35 mm (82.76 × 40.94 × 1.38 inches)
Weight	24.0 kg (52.9lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant Material	EVA/POE
Backsheet	White
Frame	35 mm (1.38 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm ² (0.006 inches ²), Portrait: N 280mm/P 280mm(11.02/11.02inches) Landscape: N 1400 mm /P 1400 mm (55.12/55.12 inches)
Connector	MC4 EV02 / TS4*

*Please refer to regional datasheet for specified connector.

TEMPERATURE RATINGS

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	43°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)
Temperature Coefficient of P_{MAX}	-0.34%/°C
Temperature Coefficient of V_{OC}	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of I_{SC}	0.04%/°C

(Do not connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40 ~ +85 °C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Max Series Fuse Rating	20A

WARRANTY

12 year Product Workmanship Warranty
25 year Power Warranty
2% first year degradation
0.55% Annual Power Attenuation

(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 31 pieces
Modules per 40' container: 582 pieces

Anexo C: Código Matlab un panel fotovoltaico

El código que se utilizó para simular un solo panel fotovoltaico es el siguiente:

```
clc
clear all
close all

C=25;% Cualquier irradiancia
G=600;% Cualquier temperatura

% Definir constantes
T=273.15+C;
Tn=298.15;
dT = T-Tn;
Gn=1000;
q=1.6*10^(-19);
kb=1.3806503*10^(-23);
n = 1.25*24;
Vt=kb*T/q;
ns=1;

Vmp=40.8;
Imp=10.90;
Isc=11.46;
Voc=49.4;

kv=-0.0025;
ki=0.0004;
Np=1;

Rs=0.53555031356971984377568269210615;
Rsh=116.22026970449160462455484444733;

%% Para Cualquier Temperatura e Irradiancia
Is = (Isc+ki*dT)/(exp((Voc+(kv*dT))/(Vt*n))-1);
Iph_n=(Rsh+Rs)*Isc/Rsh;
Iph = (Iph_n+ki*dT)*(G/Gn);

% Rango de vdc
vpv = linspace(0, Voc, 1000); % puedes ajustar la cantidad de puntos

% Función anónima para la ecuación de corriente voltaje en panel
equation = @(x, vdc) x -(Iph - Is.*(exp((vdc + x.*Rs)./(n*Vt))-1) - (vdc + x.*Rs)./Rsh);

% Iterar sobre el rango de vdc
for i = 1:length(vpv)
```



```

vdc = vpv(i);
% Resolver la ecuación para el valor actual de vdc
x0 = Isc; % valor inicial de x para fsolve
ipv(i) = fsolve(@(x) equation(x, vdc), x0, optimoptions('fsolve', 'Display', 'off'));
end

%% Para 25C y 1000 W/m2
Is1=((Rsh+Rs)*Isc-Voc)/(Rsh*exp(Voc/(ns*n*0.0257)));
Iph1=(Rsh+Rs)*Isc/Rsh;

vpv1 = linspace(0, Voc, 1000);
equation1 = @(x1, vdc1) x1 -(Iph1 - Is1.*(exp((vdc1 + x1.*Rs)./(n*0.0257))-1) - (vdc1 + x1.*Rs)./Rsh);

for j = 1:length(vpv1)
    vdc1 = vpv1(j);
    % Resolver la ecuación para el valor actual de vdc
    x00 = Isc; % valor inicial de x para fsolve
    ipv1(j) = fsolve(@(x1) equation1(x1, vdc1), x00, optimoptions('fsolve', 'Display', 'off'));
end

```

%% Graficar los resultados

```

max1= findpeaks(vpv1.*(ipv1))
max= findpeaks(vpv.*(ipv))

figure(1)
plot(vpv, ipv, 'r');
hold on
plot(vpv1, ipv1, 'b');
xlabel('Voltaje [V]');
ylabel('Corriente [A]');
ylim([0,13])
grid on
title('Curva Corriente vs Voltaje');
legend('600 W/m2','1000 W/m2')

```

```

figure (2)
plot(vpv, vpv.*(ipv), 'r');
hold on
plot(vpv1, vpv1.*(ipv1), 'b');
xlabel('Voltaje [V]');
ylabel('Potencia [W]');
ylim([0,500])
grid on
title('Curva Potencia vs Voltaje');
legend('600 W/m2','1000 W/m2')

```



Anexo D: Modelo Plecs panel fotovoltaico

El modelo que se utilizó para el arreglo fotovoltaico se presenta a continuación:

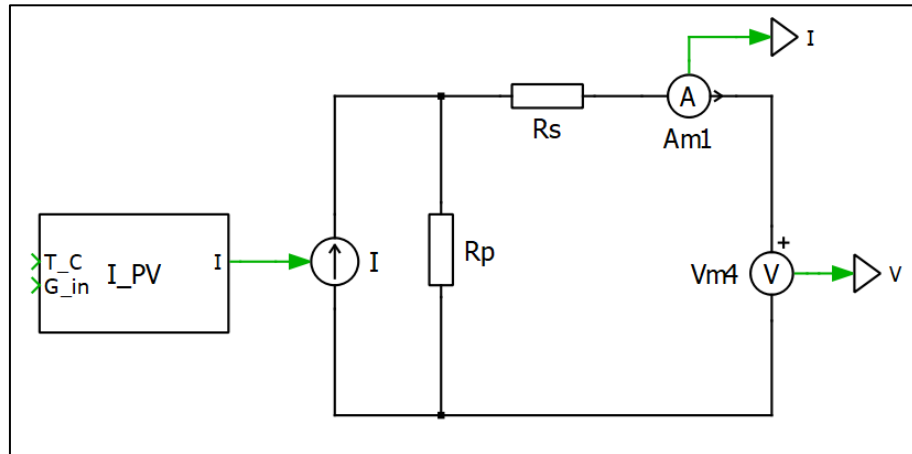


Figura D-1 Arreglo celdas fotovoltaicas PLECS

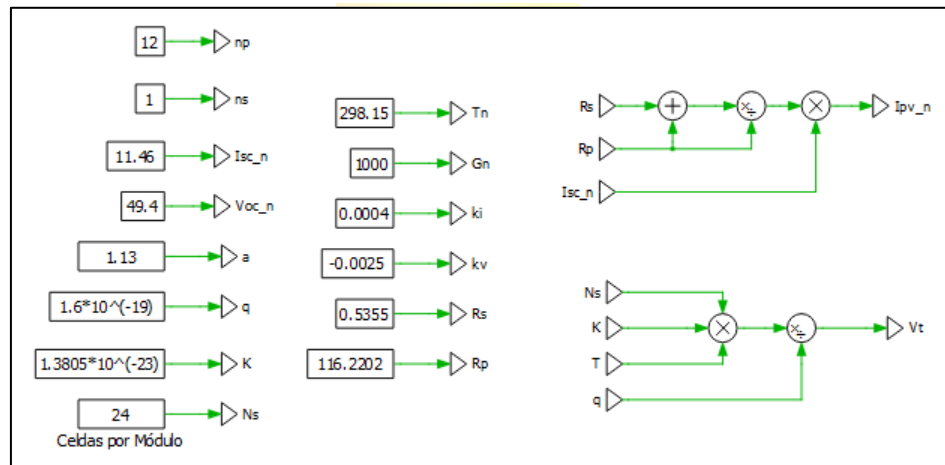


Figura D-2 Parámetros arreglo celdas fotovoltaicas PLECS

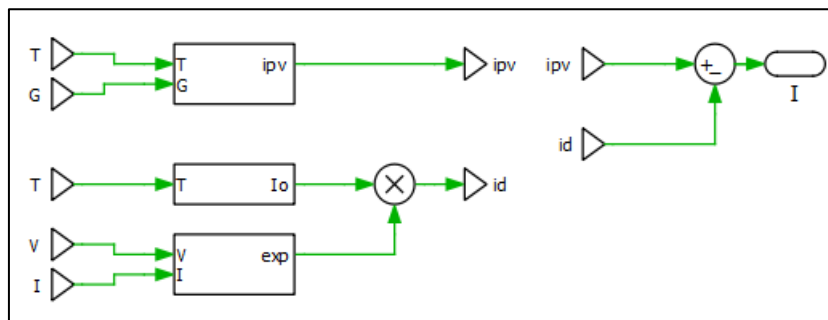


Figura D-3 Funciones arreglo fotovoltaico PLECS

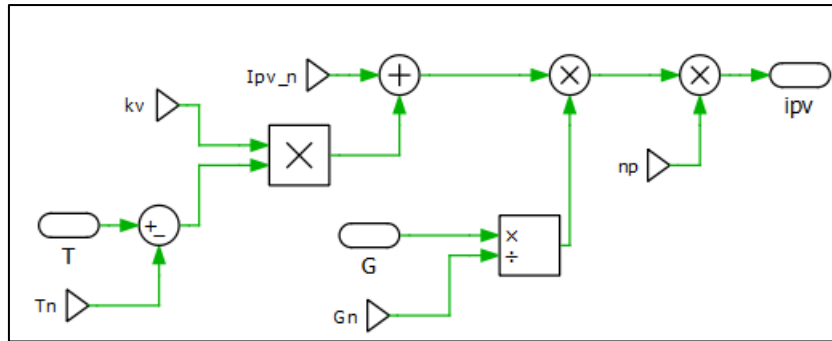


Figura D-4 Corriente fotovoltaica PLECS

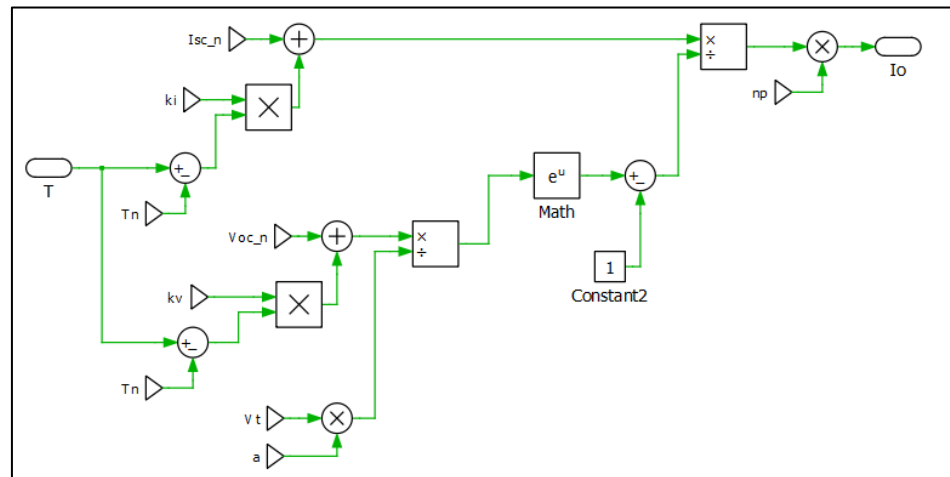


Figura D-5 Corriente de saturación inversa del diodo PLECS

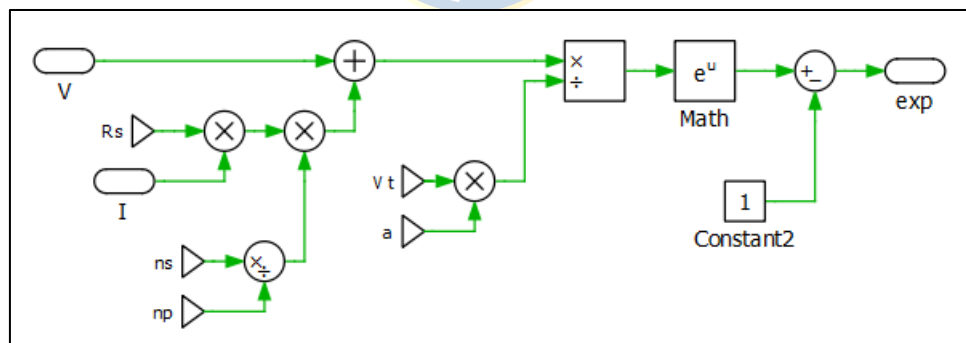


Figura D-6 Exponencial corriente en el diodo PLECS

Anexo E: Sistema completo sin control

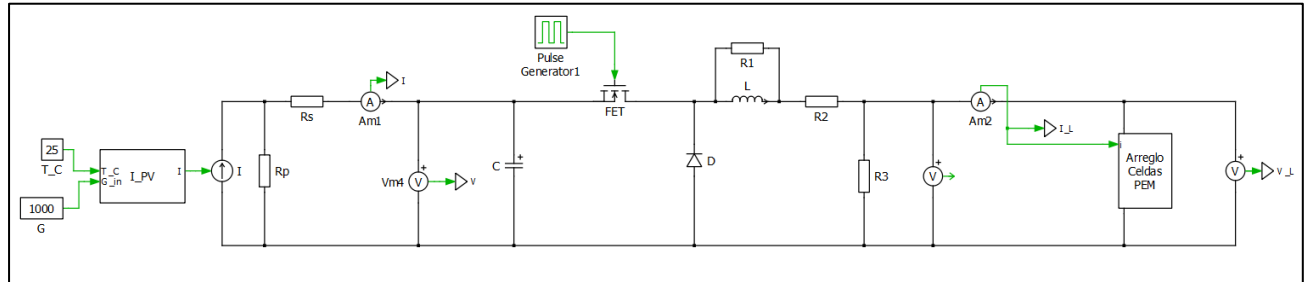


Figura E-1 Sistema completo sin control PLECS

Anexo F: Matlab punto de equilibrio

El código que se utilizó para obtener el punto de equilibrio del sistema se presenta a continuación:

```
clc
clear all
close

%Entrada
d=0.363;
%Parámetros
L=0.001;
C=33e-3;
R=0.0001;
Rc=0.0075;
Voce=12.5;
Ipvmax=12*11.46;
Vpvmax=49.4;
k=50;

syms il Vc
ec1= (-il*d + Ipvmax*(1-exp((Vc-Vpvmax)/k)))/C==0;
ec2= (Vc*d - il*R - Voce - Rc*il) / L == 0;

[a1 a2]=vpasolve(ec1,ec2)
```



Anexo G: Matlab FdeT y Ganancia de los controladores

El código que se utilizó para obtener las funciones de transferencia del sistema y sus respectivas ganancias de controladores se puede apreciar a continuación:

```
clc
clear all
close all

%Entrada
D_t = 0.363;
%Parámetros
L = 0.001;
C = 33e-3;
R = 0.0001;
Rc = 7.46e-3;
Voce = 12.5;
Ipvmax = 11.46;
Vpvmax = 49.4;
K = 50;
np = 12;

%Punto de Equilibrio
Vc_ss = 36.267408035133915287991027576787;
il_ss = 87.509094309685690729045132943925;

%Entrada d salida il
Am = [-(np*Ipvmax*exp((Vc_ss - Vpvmax)/k))/(C*k) -D_t/C ; D_t/L (-R-Rc)/L];
Bm = [-il_ss/C ; Vc_ss/L];
Cm = [0 1];
Dm = [0];

Sys = ss(Am,Bm,Cm,Dm);

G= tf(Sys);
Gc= pidtune(G,'PI');

num = [0.0053 1.07];
dem = [1 0];
Con = tf(num,dem);

Gol = G*Con;
Gcl = Gol/(Gol+1);
Gclm = minreal(Gcl);

Gclz= pidtune(Gcl,'PI');
Gclzm = pidtune(Gclm, 'PI')
```



Anexo H: MPPT

El código utilizado en el MPPT se subdivide en 4 apartados, siendo estos:

Code Declaration:

```
#include <math.h>

#define V_k InputSignal(0, 0) // Tensión medida del panel
#define I_k InputSignal(0, 1) // Corriente medida del panel

// Límites del sistema
#define V_min 10.0 // Tensión mínima permitida
#define V_max 50.0 // Tensión máxima permitida

static double deltaV; // Incremento de tensión
static double fs; // Frecuencia de muestreo

double V_ref = 42; // Tensión de referencia 500 W/m2
double V_prev = 42;
double P_prev = 42*55;
```

Start Function Code

```
// Inicializar parámetros desde la configuración del bloque
deltaV = ParamRealData(0, 0); // Incremento de tensión (\Delta V)
fs = ParamRealData(1, 0); // Frecuencia de muestreo (f_s)
```

Output Function Code

```
// Emitir la tensión de referencia
OutputSignal(0, 0) = V_ref;
```

Update Function Code

```
// Calcular la potencia actual
double P_k = V_k * I_k;
// Verificar que las entradas sean válidas (evitar cálculos erróneos)
if (V_k <= 0 || I_k <= 0) {
    return;
}

// Calcular las diferencias
float deltaP = P_k - P_prev; // Cambio en potencia
float deltaVolt = V_k - V_prev; // Cambio en voltaje

// Evaluar las condiciones del diagrama
```



```

if (deltaP == 0) {
// Si el cambio en potencia es cero
return; // No se hace nada, retorna
} else if (deltaP > 0) {
// Si el cambio en potencia es positivo
if (deltaVolt > 0) {
// Si el cambio en voltaje es positivo
V_ref += deltaV; // Incrementar referencia de voltaje
} else {
// Si el cambio en voltaje es negativo o cero
V_ref -= deltaV; // Disminuir referencia de voltaje
}
} else { // deltaP < 0
// Si el cambio en potencia es negativo
if (deltaVolt > 0) {
// Si el cambio en voltaje es positivo
V_ref -= deltaV; // Disminuir referencia de voltaje
} else {
// Si el cambio en voltaje es negativo o cero
V_ref += deltaV; // Incrementar referencia de voltaje
}
}
// Actualizar valores anteriores
V_prev = V_k;
P_prev = P_k;

```



Anexo I: Sistema completo con control

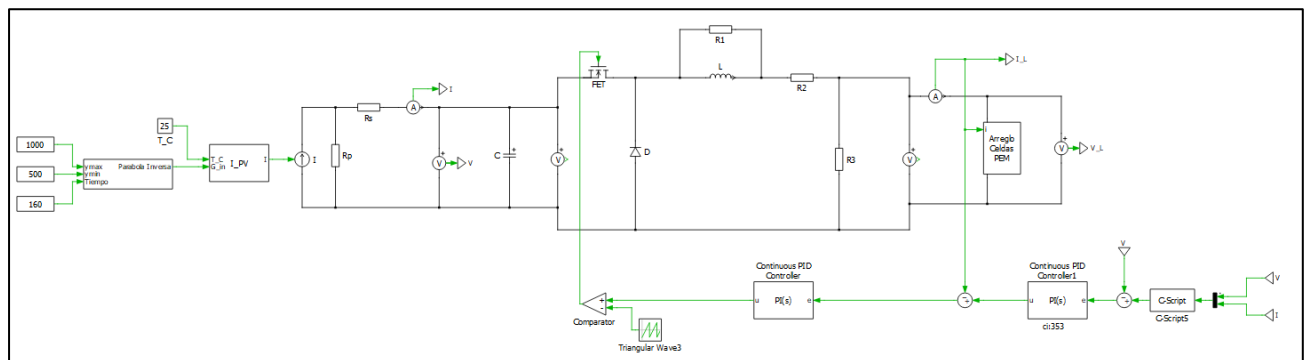


Figura I-1 Sistema completo con control PLECS