



Diseño, simulación e implementación de una estrategia de control para un sistema fotovoltaico implementado en un sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL).

Bucheli Campaña, José Aníbal

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Trabajo de Integración Curricular, Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Automatización.

Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario, PhD.

01 de marzo del 2023

Latacunga



Tesis_J_Bucheli



JACQUELINE DEL ROSARIO LLANOS PROAÑO

4%
Similitudes

< 1% Texto entre comillas
0% similitudes entre comillas
4% Idioma no reconocido

Nombre del documento: Tesis_J_Bucheli.pdf
ID del documento: 00f4e9fecd8b16ff25c1ef4560b83216e1cd84ad
Tamaño del documento original: 4,66 Mo

Depositante: WASHINGTON RODRIGO FREIRE LLERENA
Fecha de depósito: 2/3/2023
Tipo de carga: Interface
fecha de fin de análisis: 2/3/2023

Número de palabras: 6785
Número de caracteres: 46.750

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.espe.edu.ec implementación de un inversor de potencia monofásico co... http://repositorio.espe.edu.ec/8080/bitstream/21000/21680/5/T-ESPE-043387.pdf.txt	1%		Palabras idénticas : 1% (96 palabras)
2	www.iesgn.ris http://www.iesgn.ris/publicaciones/ieeyi/Documentos/V6/art3vf_estudio_del_algoritmo_de_segurment... 2 fuentes similares	1%		Palabras idénticas : 1% (90 palabras)
3	www.mendoza-conicet.gov.ar http://www.mendoza-conicet.gov.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2012/2012-d04-e015.pdf 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (60 palabras)
4	www.clubensayos.com Convertidor elevador boost - Apuntes - RAUL PARAMO LOPEZ http://www.clubensayos.com/Tecnologia/Convertidor-elevador-boost/5491200.html#:~:text=El+conver...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (27 palabras)
5	www.energiaestrategica.com Dos nuevas regulaciones despiertan expectativas pa... http://www.energiaestrategica.com/dos-nuevas-regulaciones-despiertan-expectativas-para-la-gener...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (22 palabras)

Firma:

Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario, Phd.

Director



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Electrónica y Automatización

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "Diseño, simulación e implementación de una estrategia de control para un sistema fotovoltaico implementado en un sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL)." fue realizado por el señor **Bucheli Campaña, José Aníbal**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 23 de febrero del 2023

Firma:

Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario

C. C. 0502527039



**Departamento de Eléctrica y Electrónica
Carrera de Electrónica y Automatización**

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Bucheli Campaña, José Anibal**, con cédula de ciudadanía n° 0503381675, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Diseño, simulación e implementación de una estrategia de control para un sistema fotovoltaico implementado en un sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL)** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 23 de febrero del 2023

Firma

Bucheli Campaña, José Anibal

C.C.: 0503381675



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Electrónica y Automatización

Autorización de Publicación

Yo **Bucheli Campaña, José Anibal**, con cédula de ciudadanía n° 0503381675, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Diseño, simulación e implementación de una estrategia de control para un sistema fotovoltaico implementado en un sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL)** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 23 de febrero del 2023

Firma

Bucheli Campaña, José Anibal

C.C.: 0503381675

Dedicatoria

A mis padres, quienes deseo que sean las personas más orgullosas con cada paso que dé.

A mi hermana, que es mi guía y ejemplo a seguir, a quien espero no decepcionar, además de ser su ayuda y apoyo en todo momento.

A mis abuelos ausentes físicamente, pero quienes, con su ejemplo de esfuerzo, lealtad y perseverancia en la vida, me enseñaron lo lejos que se puede llegar siendo felices al mismo tiempo.

A mi abuelito Aníbal, quien a pesar de no estar físicamente conmigo es mi ejemplo como persona y profesional, mi motivación día a día y espero que en donde se encuentre este orgulloso de mi.

A mis hermanos perrunos que estuvieron conmigo y los que están aún conmigo por ayudarme liberando de toda la angustia, entregándome paz y tranquilidad, siendo también cada uno de ellos mis maestros de vida, además de acompañarme siempre en los días malos.

Agradecimientos

Agradezco a mi padre José, por ser el mejor ejemplo de ingeniero electrónico que conozco, su dedicación, esfuerzo y responsabilidad para salir adelante frente a cualquier situación difícil y además ser un guía de lo que algún día espero ser como profesional en electrónica. A mi madre Ana, quien me aconsejó, guio, cuidó, abrazó y cuando necesitaba conversar estaba ella conmigo.

A mi hermana Ana María, por alentarme y apoyarme en todo momento.

A mi enamorada Dagmar, con quien compartí risas y buenos momentos en mis días universitarios, además de brindarme su ayuda y apoyo cada día.

El presente trabajo no habría sido posible sin el gran apoyo de la Ingeniería Jacqueline Llanos. Gracias por su amabilidad, apoyo y conocimiento brindado durante todo este tiempo como docente, tutora y persona.

Por último, estoy muy agradecido con todos mis profesores en este ciclo universitario en especial a los docentes de mi carrera, quienes me han aconsejado y brindado su conocimiento en distintas áreas, sé que lo aprendido gracias a ustedes perdurará siempre y me servirá para mi vida personal y profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de verificación	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos	7
Índice de contenido	8
Índice de figuras	11
índice de tablas	13
Resumen	14
Abstrac.....	15
Capítulo I: Introducción	16
Antecedentes.....	16
Planteamiento del problema	17
Justificación e importancia.....	18
Objetivos	19
<i>Objetivo general</i>	19
<i>Objetivos específicos.....</i>	19
Hipótesis	19
Variables.....	19

<i>Variables independientes</i>	19
<i>Variable dependiente</i>	20
Capítulo II: Fundamentación teórica	21
Paneles Solares	21
Convertidores DC – DC	22
Algoritmos MPPT	24
<i>Perturba y Observa (P&O)</i>	24
Modulación de ancho de pulso (PWM)	26
Typhoon HIL 402	26
DSP TMDSCNCD28335	29
Comunicación sistema Typhoon HIL	30
Capítulo III: Metodología	32
Configuración del panel solar.	32
Diseño convertidor Boost	33
Diseño de una estrategia de control MPPT para un convertidor Boost.	36
Diseño de Simulador	37
<i>Diseño del Simulador en Simulink.</i>	37
<i>Diseño del Simulador en Typhoon HIL</i>	38
Implementación en Typhoon.	40
Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados	46
Resultados Simulados en Simulink.	46

Resultados Simulados en Typhoon HIL.....	49
Resultados Implementados en Typhoon HIL.....	53
<i>Comparación de Potencia Ideal y Real con cada método de simulación</i>	56
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	57
Conclusiones.....	57
Recomendaciones	59
Bibliografía	60
Anexos	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Circuito equivalente de un panel solar</i>	21
Figura 2 <i>Circuito del conversor Boost</i>	23
Figura 3 <i>Diagrama de flujo P&O</i>	25
Figura 4 <i>Señal PWM</i>	26
Figura 5 <i>Equipo Typhoon HIL</i>	27
Figura 6 <i>Tarjeta DSP TMDSCNCD28335</i>	30
Figura 7 <i>Conexión Typhoon HIL y PC</i>	31
Figura 8 <i>Librería para comunicar con la DSP</i>	31
Figura 9 <i>Conexión de celdas fotovoltaicas</i>	32
Figura 10 <i>Curva de respuesta del panel solar</i>	33
Figura 11 <i>Esquema del algoritmo P&O</i>	36
Figura 12 <i>Elección de panel solar</i>	37
Figura 13 <i>Panel principal, diagrama de bloques</i>	38
Figura 14 <i>Implementación Schematic Editor</i>	38
Figura 15 <i>SCADA HIL</i>	39
Figura 16 <i>Selección de Panel Solar</i>	40
Figura 17 <i>Conexión Simulink - Typhoon</i>	41
Figura 18 <i>Graficas de Potencia, Corriente y Voltaje</i>	42
Figura 19 <i>Esquema implementado en Typhoon</i>	43
Figura 20 <i>Propiedades Boost en Typhoon</i>	44
Figura 21 <i>a) Configuración del bloque ADC; b) Configuración de bloque de salida digita</i>	44
Figura 22 <i>Envío de datos desde Typhoon</i>	45
Figura 23 <i>SCADA Typhoon para implementar</i>	45
Figura 24 <i>Esquema elaborado en Simulink</i>	46
Figura 25 <i>Respuesta de Voltaje y Corriente</i>	47

Figura 26 <i>Respuesta de la potencia fotovoltaica vs potencia en la carga</i>	48
Figura 27 <i>SCADA HIL para implementar</i>	49
Figura 28 <i>Respuesta de corriente en simulador Typhoon HIL</i>	50
Figura 29 <i>Respuesta de Voltaje simulado en Typhoon</i>	51
Figura 30 <i>Respuesta de la potencia simulada en Typhoon</i>	52
Figura 31 <i>Respuesta de Voltaje de Entrada vs Salida</i>	53
Figura 32 <i>Respuesta de la Corriente de Entrada vs Salida</i>	54
Figura 33 <i>Respuesta de Potencia de Entrada vs Salida</i>	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Datos de placa del Jinko JKM-300M-72 (300[W])</i> -----	22
Tabla 2 <i>Datos del equipo Typhoon HIL 402</i> -----	27
Tabla 3 <i>Pines Analógicos</i> -----	28
Tabla 4 <i>Pines Digitales/ePMWs</i> -----	28
Tabla 5 <i>Respuesta de potencia por irradiación (Ideal)</i> -----	33
Tabla 6 <i>Parámetros de diseño</i> -----	34
Tabla 7 <i>Comparación potencia real e ideal</i> -----	48
Tabla 8 <i>Comparación de Potencias con el simulador Typhoon</i> -----	52
Tabla 9 <i>Comparación potencia Ideal vs Real</i> -----	56
Tabla 10 <i>Comparación entre potencia ideal y real, con cada simulación e implementación</i> ----	56

Resumen

La energía solar es una fuente renovable inagotable que permite abastecer la demanda eléctrica de forma amigable con el medio ambiente, actualmente es usada para suministrar la energía a cargas en localidades aisladas sin conexión con las redes eléctricas convencionales, mejorando la calidad de vida de personas que se encuentran en zonas alejadas a una subestación eléctrica. Con el objetivo de convertir la energía solar en energía eléctrica, se necesita de interfaces de electrónica de potencia que requieren de controladores eficientes para alcanzar el máximo aprovechamiento del recurso solar. Con el objetivo de contribuir con el aprovechamiento del recurso solar, en este proyecto de investigación se diseña, simula e implementar estrategias de control con el Maximum Power Point Tracking (MPPT) para un convertidor DC-DC Boost de un panel fotovoltaico. El algoritmo de control MPPT, está basado en la técnica de perturba y observa. Para la validación primero se crea un simulador del sistema fotovoltaico en el software Simulink, posteriormente se verifica su funcionamiento en la plataforma de simulación SCADA Typhoon HIL. Finalmente se implementa en el sistema Hardware in the Loop (HIL), primero los paneles fotovoltaicos, convertidor, filtros y cargas locales en el hardware Typhoon HIL 402 con operación en tiempo real, mientras que el algoritmo de control es programado en un Digital Signal Processor DSP, que permite verificar en tiempo real las acciones del controlador al convertidor. Se evalúan escenarios con distintos cambios de irradiación, así como también cambios en la carga local equivalente a variaciones de demanda eléctrica. El algoritmo MPPT en tiempo real ha demostrado un buen diseño, ya que ha permitido aprovechar al máximo el recurso solar, obteniendo a su salida una tensión continua mayor que a su entrada, reflejándose en mayor potencia generada.

Palabras clave: Typhoon HIL, MPPT, Boost, Potencia, Panel Fotovoltaico

Abstrac

Solar energy is an inexhaustible renewable source that allows supplying the electricity demand in an environmentally friendly way, it is currently used to supply energy to loads in isolated locations without connection to conventional power grids, improving the quality of life of people who are in areas far from an electrical substation. In order to convert solar energy into electrical energy, power electronics interfaces are needed that require efficient controllers to achieve maximum utilization of the solar resource. In order to contribute to the utilization of the solar resource, this research project designs, simulates and implements control strategies with Maximum Power Point Tracking (MPPT) for a DC-DC Boost converter of a photovoltaic panel. The MPPT control algorithm is based on the perturb and observe technique. For validation, first a simulator of the PV system is created in Simulink software, then its operation is verified in the SCADA simulation platform Typhoon HIL. Finally, it is implemented in the Hardware in the Loop (HIL) system, first the PV panels, converter, filters and local loads in the Typhoon HIL 402 hardware with real time operation, while the control algorithm is programmed in a Digital Signal Processor DSP, which allows to verify in real time the actions of the controller to the converter. Scenarios with different irradiation changes are evaluated, as well as changes in the local load equivalent to power demand variations. The real-time MPPT algorithm has demonstrated a good design, since it has allowed to take full advantage of the solar resource, obtaining a higher DC voltage at its output than at its input, which is reflected in higher generated power.

Keyword: Typhoon HIL, MPPT, Boost, Power, Photovoltaic Panel

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

La implementación de energías renovables tales como eólicas, hidráulicas, marinas, y solares que se están aplicando masivamente actualmente en el mundo con el fin de poder solventar las demandas de consumo amigable con el medio ambiente, esto requiere un aumento de la escala, complejidad e interdependencia de las conversiones de energía con la flexibilidad en gestionar o controlar cada una de ellas (National Grid, 2020). Se toma como referencia principal al sol, un recurso inagotable, pero que presenta una intermitencia que afecta directamente al funcionamiento del panel fotovoltaico, estas características representadas por la temperatura y la irradiancia, con estos detalles el panel fotovoltaico necesita un control regulador de carga llamado seguimiento de punto de máxima potencia MPPT, el cual en los últimos años ha presentado una gran cantidad de estudios que intentan controlar que el panel entregue su máxima potencia (Esrám & Chapman, 2007).

Por lo que se ha puesto en marcha aplicaciones modernas sobre el tema con un gran impacto internacional en países como: Canadá, China, Chile, Dinamarca, Brasil entre otros; que presentan plantas fotovoltaicas donde entregan energías distribuidas primordialmente con el objetivo de llegar al plan de alcanzar cero emisiones netas de carbono para el año 2050 (National Grid, 2020).

En Ecuador actualmente, se está generando cambios es así que se ha regularizado la inyección de energía distribuida a nivel nacional; gracias a las normativas establecidas en ARCERNNR001/2021 y ARCERNNR-002/2021, se clarifican los requisitos para instalar y operar generadores renovables de hasta 1 MW, como así también condiciones técnicas y comerciales adicionales para que personas jurídicas puedan contar con centrales distribuidas con una capacidad de hasta 10 MW.

Teniendo estos antecedentes la academia a nivel mundial han presentado estudios factibles para realizar el control del MPPT aplicado a convertidores de sistemas fotovoltaicos. Las técnicas más de control más usuales son: perturba y observa, conductancia incremental; que presentan un seguimiento del MPP, pero con ciertas oscilaciones en su estado estable, lo que imposibilita conectarse a la red, o alimentar cargas locales y además provocando desperdicio de potencia y del recurso mismo.

Planteamiento del problema

Existen varios factores como cambio climático, mala instalación, mal diseño, controles poco eficientes entre otros; que hacen que afecte a la curva característica de potencia vs voltaje del panel solar; ya que se genera distintos puntos de máxima potencia (MPP); aunque se ha intentado solucionar el problema con diferentes algoritmos, algunos más sofisticados que otros. Los controladores actuales más utilizados son bastante funcionales, pero presentan errores que no permiten aprovechar al máximo el recurso natural. A esto se le suma el bajo factor de potencia que presentan los paneles fotovoltaicos.

El principal problema que se presenta es la variabilidad del recurso energético lo que provoca oscilaciones en la potencia generada por el sistema fotovoltaico impidiendo alimentar una carga local o conectarse a la red de forma segura por lo que se requiere de interfaces de electrónica de potencia que sean controlados adecuadamente para garantizar energía estable a pesar de tener cambios en su entorno. Además, un objetivo importante es aprovechar al máximo el recurso solar frente a esto los controles tradicionales presentan dificultades respecto a variaciones rápidas de irradiancia o temperatura o que a su vez tenga oscilaciones cuando llegue a un estado estable, ya que esto impide alimentar cargas y aprovechar el recurso disponible.

Justificación e importancia

El campo de las energías renovables evoluciona cada año siendo una forma limpia de obtener energía para que en algún momento se suspenda el uso de energía no renovable siendo está muy contaminante para el planeta. En un futuro cercano cada vivienda podrá tener energía limpia y a largo plazo a nivel industrial, es por ello que se realizan sistemas mucho más eficaces para obtener energía y su estudio es amplio a nivel mundial.

Cada país cuenta con sus propias normas sobre energía renovables, en el caso de Ecuador, ARCERNNR se encarga de regular al sector eléctrico, en la que especifica los beneficios que se obtiene de trabajar con energía renovable, además esta entidad promueve el uso de energías renovables, por lo que estudiar las técnicas de control avanzado aplicando a este campo es de suma importancia para tener una sociedad más conectada con la energía limpia y de esta forma cuidar de una mejor manera al planeta. Para que un sistema fotovoltaico sea integrado a la red se presenta el reto de cumplir con normativas técnicas para su instalación, esto se puede lograr con técnicas de control adecuadas.

El controlar dispositivos de electrónica de potencia que son necesarios para unidades de generación distribuida basadas en recursos renovables requieren tiempo de respuesta rápida por lo que el diseño de controladores que actúen rápidamente es una necesidad, convirtiéndose en un reto incluir las dos tareas alto desempeño y tiempos rápidos. En el presente trabajo el diseño e implementación de técnicas de control avanzado para mejorar el aprovechamiento de la energía solar se lo implementa mediante la técnica hardware in the loop (HIL), en donde se implementa la planta en el sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL) y los controladores en dispositivos DSP.

De todo el proyecto en este trabajo de investigación se concentrará en modelar el sistema fotovoltaico, diseñar una estrategia de control tradicional y una avanzada de un controlador MPPT aplicado al conversor BOOST, primero se realizará por simulación para

determinar cuál es el mejor controlador. Después se procederá a implementar los controladores MPPT en el DSP. Las materias que en gran parte influyen al proyecto son: electrónica de potencia, circuitos eléctricos, sistemas de control y control inteligente. Todas las materias aprendidas a lo largo de la carrera universitaria contribuyen en la resolución de este proyecto, pero se destaca las materias antes mencionadas.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar una estrategia de control para un panel fotovoltaico en el sistema Typhoon HIL.

Objetivos específicos

Modelar y Simular un sistema fotovoltaico.

Diseñar y validar por simulación una estrategia de control MPPT para paneles fotovoltaicos.

Implementar un controlador MPPT aplicado al convertidor BOOST en el sistema Typhoon HIL.

Hipótesis

¿El diseño de la estrategia de control propuesta para el convertidor BOOST permite una operación eficiente aprovechando al máximo el recurso solar para un panel fotovoltaico implementado en un HIL?

Variables

Variables independientes

Potencia DC extraída del convertidor BOOST.

Variable dependiente

El desempeño de nuestro sistema fotovoltaico para la máxima obtención de potencia aplicando los conocimientos previos de electrónica de potencia.

Capítulo II

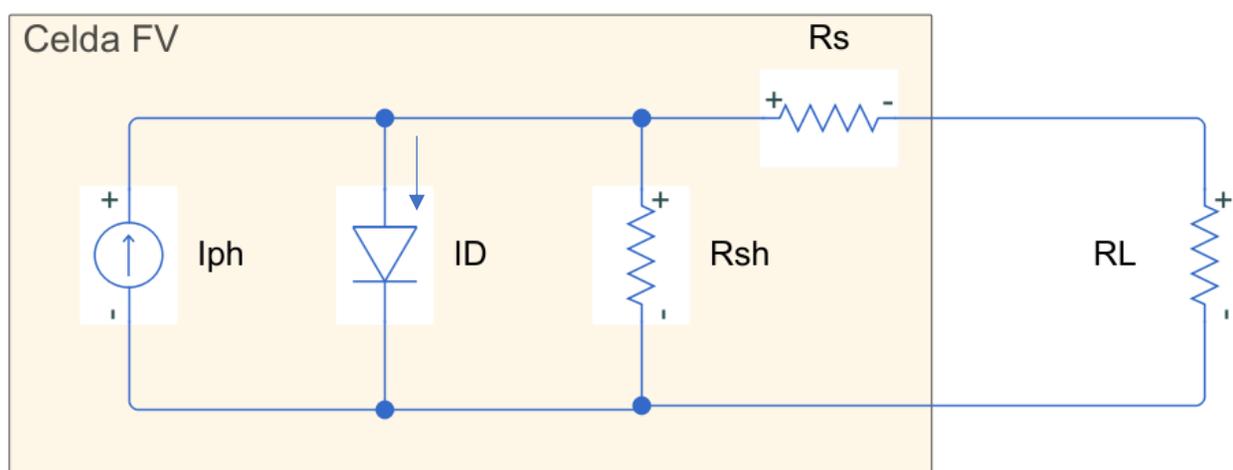
Fundamentación teórica

Paneles Solares

La Figura 1 describe un esquema de conexión equivalente a un panel fotovoltaico en donde la fuente (I_{PH}) es la corriente foto generadora a un valor fijo de radiación solar, la resistencia Shunt (R_{SH}) representa la pérdida por corriente de fuga, la resistencia serie (R_S) se utiliza para representar la caída de voltaje a la salida y la resistencia de carga (R_L) representa la carga usada para la medición (Vera Dávila, Delgado Ariza, & Sepúlveda Mora, 2018).

Figura 1

Circuito equivalente de un panel solar.



El panel solar que se va a utilizar es el Jinko Solar serie JKM-300M-72(300W). Este panel solar lo podemos encontrar en la selección de paneles solares del simulador Typhoon HIL. En la figura 2 se mostrará las curvas de “Intensidad vs Tensión” y “Potencia vs Tensión” del módulo fotovoltaico, además se identificará los parámetros más representativos del panel solar. (Jinko, 2014)

Tabla 1

Datos de placa del Jinko JKM-300M-72 (300[W])

Potencia nominal STC	300 [W]
Numero de celdas	72
Corriente en corto circuito (I_{sc})	8.67 [A]
Corriente al máximo punto de potencia	7.9 [A]
Voltaje circuito abierto	46.4 [V]
Voltaje máximo punto de potencia (V_{mp})	38 [V]
Máxima eficiencia	15.46%

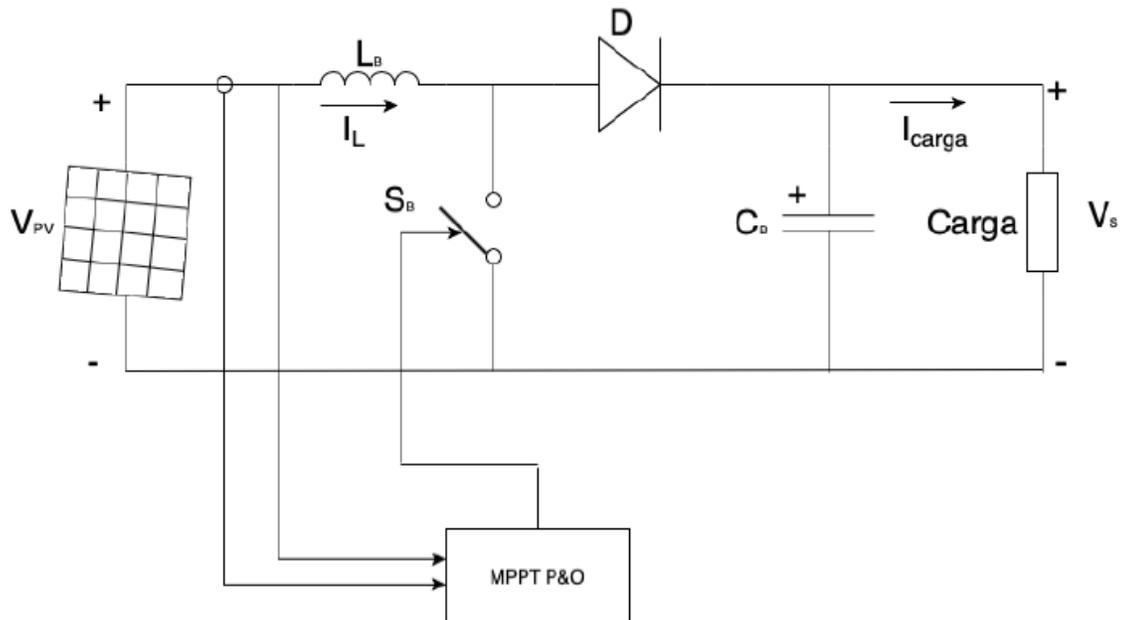
Conversores DC – DC

El convertidor tipo Boost es un circuito elevador de tensión, que usa las características del inductor y el capacitor como elementos almacenadores de energía para elevar la corriente proveniente de la fuente de alimentación y usarla para inyectarla al condensador, produciendo así niveles de voltaje mayores en la carga que los de la fuente. (Valderrama, Moreno C., & Vega, 2011)

Los convertidores DC/DC permiten controlar el flujo de energía eléctrica continua entre dos niveles de tensión. El convertidor elevador (Boost) es utilizado para aumentar la tensión que es generada por el panel fotovoltaico, donde la tensión de salida es mayor a la entrada. (Erazo Huera, 2020)

Figura 2

Circuito del convertor Boost



En la Figura 2 se indica el circuito del convertor Boost, conectado al panel solar y con su señal de control donde se encuentra el algoritmo MPPPT para proseguir a la conexión con el interruptor que dará la señal de habilitación.

Para diseñar el convertor Boost podemos utilizar las siguientes ecuaciones (Erazo Huera, 2020):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$

$$L_B = \frac{V_{in} D}{\Delta I_{L_b} f_s} \quad (2)$$

$$C_B = \frac{I_{max} D}{f_s \Delta V_{out}} \quad (3)$$

$$\Delta I_{L_B} = 5\% \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad (4)$$

Dónde:

D : (duty) es el ciclo de trabajo del convertor, adimensional;

L_B : Inductor [H];

C_B : Capacitor [F];

f_s : frecuencia de conmutación [Hz];

ΔI_{L_B} : Ondulación de corriente del inductor [A];

V_{in} es igual a V_{PV} : Tensión de entrada del convertor [V];

V_{out} es igual a V_S : Tensión de salida del convertor [V];

I_{max} : Corriente máxima [A];

ΔV_{out} : Ondulación de tensión del capacitor [V].

Algoritmos MPPT

La variación de temperatura y de irradiación, ocasionan que varíe, a cada instante, la potencia eléctrica, de los módulos fotovoltaicos. Así, la variación que presentan los módulos fotovoltaicos en la potencia eléctrica, hace que sea oportuno el uso de seguidores de punto de máxima potencia (MPPT) para elevar la eficiencia del sistema fotovoltaico (Erazo Huera, 2020).

Los tipos de técnicas para MPPT más utilizadas son:

- Conductancia Incremental.
- Perturba y Observa.

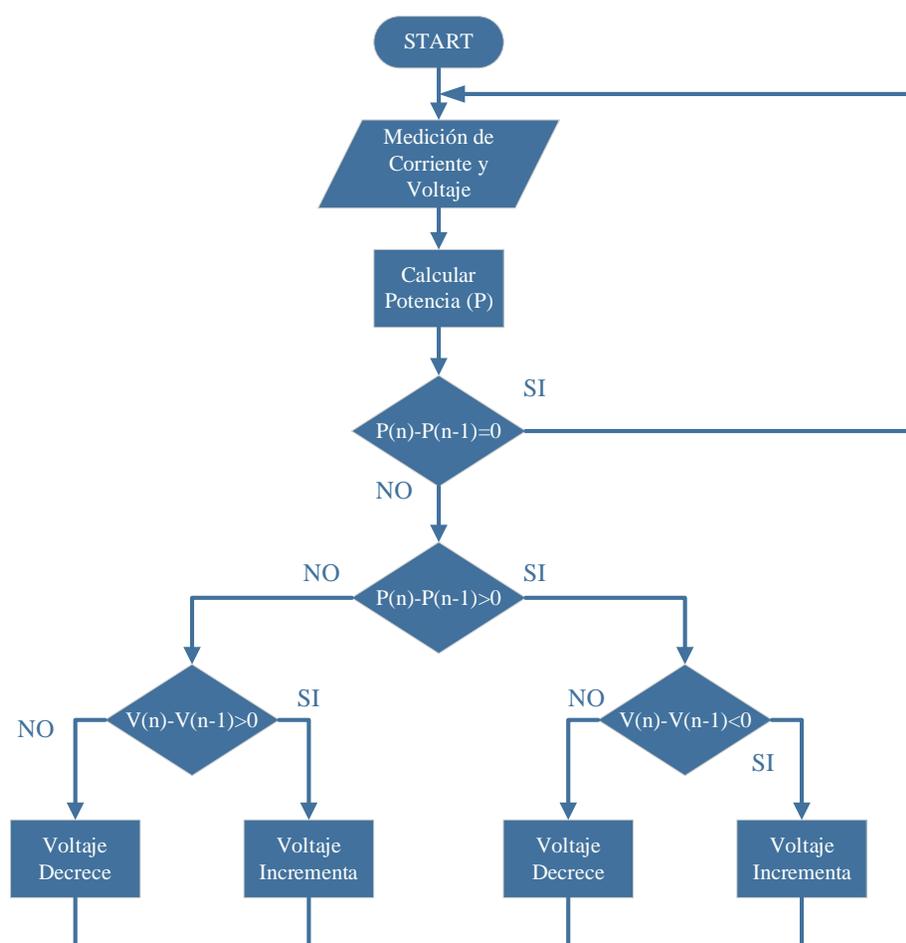
Perturba y Observa (P&O)

El algoritmo perturbar y observar se basa en el siguiente criterio: si el voltaje de operación del arreglo fotovoltaico se perturba en cierta dirección y la potencia extraída del

mismo se incrementa significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección, de otra forma si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá ser perturbado en dirección contraria a la que se tenía (Ruiz C., Beristáin J., Sosa T., & Hernández L., 2010). El diagrama de flujo que se va a implementar para la técnica P&O, se muestra en la figura 3.

Figura 3

Diagrama de flujo P&O



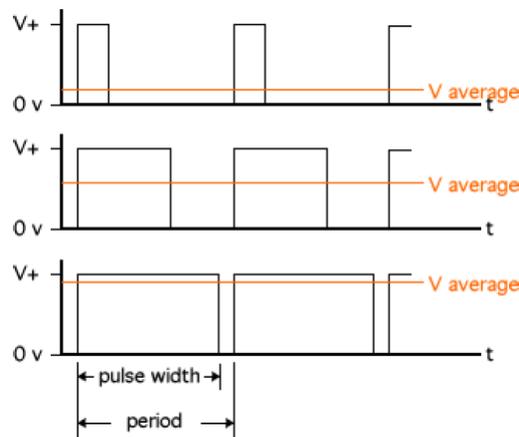
Para realizar un “Perturba y Observa” debemos de seguir el esquema de la figura 2, donde nos dice que: Primero debemos de realizar una medición del voltaje y corriente de nuestro panel solar, además calculamos la potencia de entrada. El algoritmo compara la potencia actual con la anterior y dependiendo del resultado de dichas comparaciones se incrementará o decrementará el voltaje.

Modulación de ancho de pulso (PWM)

La modulación PWM se basa en modificar el tiempo en alto de una onda cuadrada de periodo constante. Con ello se modifica el valor medio de la señal. Esta técnica suele utilizarse, por ejemplo, en el control de velocidad de motores eléctricos de corriente continua. (Cuestas & Lebus, 2011) En la figura 4 se observa el comportamiento de la modulación de ancho de pulso.

Figura 4

Señal PWM



Typhoon HIL 402

Este HIL compacto que se puede observar en la figura 5, extremadamente potente y de 4 núcleos le brindará todas las herramientas que necesita para probar sus controladores de electrónica de potencia en una amplia gama de aplicaciones: generación de energía solar y eólica, almacenamiento de batería, calidad de potencia y accionamientos de motor. Ejecute sus

controladores en un circuito cerrado con la etapa de potencia de alta fidelidad en tiempo real, con una velocidad de actualización de 1 MHz y una resolución PWM ultra alta de 6ns. (Typhoon HIL, 2015)

Figura 5

Equipo Typhoon HIL



El equipo Typhoon que se muestra en la figura 5, tiene las siguientes características (ver tabla 2).

Tabla 2

Datos del equipo Typhoon HIL 402

Procesador	4 cores
Canales	16 x Analog inputs (AI) 16 x Analog outputs (AO) 32 x Digital inputs (DI) 32 x Digital outputs (DO)
Resolución	16 bit
Rango de Voltaje Analógico IO	$\pm 10 [V]$
Soporte de modelos de máquina	Básico Avanzado
Conectividad	USB Ethernet
Compatibilidad	HIL DSP Interface HIL Breakout board HIL dSpace Interface HIL uGrid DSP Interface
Software	HIL Control Center

Tabla 3

Pines Analógicos

Typhoon HIL Analog Output	DSP 1 Analog Input	DSP 2 Analog Input	DSP 3 Analog Input
A01	ADCIN – A0	ADCIN – A0	ADCIN – A0
A02	ADCIN – A1	ADCIN – A1	ADCIN – A1
A03	ADCIN – A2	ADCIN – A2	ADCIN – A2
A04	ADCIN – A3	ADCIN – A3	ADCIN – A3
A05	ADCIN – A4	ADCIN – A4	ADCIN – A4
A06	ADCIN – A5	ADCIN – A5	ADCIN – A5
A07	ADCIN – A6	ADCIN – A6	ADCIN – A6
A08	ADCIN – A7	ADCIN – A7	ADCIN – A7
A09	ADCIN – B0	ADCIN – B0	ADCIN – B0
A010	ADCIN – B1	ADCIN – B1	ADCIN – B1
A011	ADCIN – B2	ADCIN – B2	ADCIN – B2
A012	ADCIN – B3	ADCIN – B3	ADCIN – B3
A013	ADCIN – B4	ADCIN – B4	ADCIN – B4
A014	ADCIN – B5	ADCIN – B5	ADCIN – B5
A015	ADCIN – B6	ADCIN – B6	ADCIN – B6
A016	ADCIN – B7	ADCIN – B7	ADCIN – B7

Tabla 4

Pines Digitales/ePMWs

Typhoon HIL Digital Output	DSP Digital Input	Typhoon HIL Digital Input	DSP Digital Output	DSP1 and DSP3 Digital Output
DO32	GPIO-24 / EQEPA-2	DI32	GPIO- 00/EPWM-1A	GPIO- 00/EPWM-1A
DO31	GPIO-25 / EQEPB-2	DI31	GPIO- 02/EPWM-2A	GPIO- 02/EPWM-2A
DO30	GPIO-26 / EQEPI-2	DI30	GPIO- 04/EPWM-3A	GPIO- 04/EPWM-3A
DO29	GPIO-14	DI29	GPIO- 00/EPWM-4A	GPIO- 06/EPWM-4A
DO28	GPIO-15	DI28	GPIO- 08/EPWM-5A	GPIO- 08/EPWM-5A
DO27	GPIO-16	DI27	GPIO- 10/EPWM-6A	GPIO- 10/EPWM-6A
DO26	GPIO-17	DI26	GPIO- 01/EPWM-1B	GPIO- 01/EPWM-1B

Typhoon HIL Digital Output	DSP Digital Input	Typhoon HIL Digital Input	DSP Digital Output	DSP1 and DSP3 Digital Output
DO25	GPIO-19	DI25	GPIO-03/EPWM-2B	GPIO-03/EPWM-2B
DO24	GPIO-20	DI24	GPIO-05/EPWM-3B	GPIO-05/EPWM-3B
DO23	GPIO-21	DI23	GPIO-07/EPWM-4B	GPIO-07/EPWM-4B
DO22	GPIO-22	DI22	GPIO-09/EPWM-5B	GPIO-09/EPWM-5B
DO21	GPIO-23	DI21	GPIO-11/EPWM-6B	GPIO-11/EPWM-6B
DO20	GPIO-24 / EQEPA-2	DI20	GPIO-12/EPWM-7A	GPIO-12/EPWM-7A
DO19	GPIO-25 / EQEPB-2	DI19	GPIO-13/EPWM-7B	GPIO-13/EPWM-7B
DO18	GPIO-26 / EQEPI-2	DI18	GPIO-00/EPWM-1A	GPIO-00/EPWM-1A
DO17	GPIO-14	DI17	GPIO-02/EPWM-2A	GPIO-02/EPWM-2A
DO16	GPIO-15	DI16	GPIO-04/EPWM-3A	GPIO-04/EPWM-3A
DO15	GPIO-16	DI15	GPIO-06/EPWM-4A	GPIO-06/EPWM-4A
DO14	GPIO-17	DI14	GPIO-08/EPWM-5A	GPIO-08/EPWM-5A
DO13	GPIO-19	DI13	GPIO-01/EPWM-1B	GPIO-01/EPWM-1B

La información de la tabla 2 y 3, es importante para realizar la comunicación Typhoon – Simulink con ayuda de la tarjeta DSP y Typhoon HIL 402.

DSP TMDSCNCD28335

Es una herramienta de evaluación y desarrollo basada en DIMM100 controlCARD para la serie F2833x (figura 6). Las controlCARD son ideales para la evaluación inicial y la creación de prototipos del sistema. Las controlCARD son módulos completos a nivel de placa que utilizan uno de los dos factores de forma estándar (DIMM de 100 pines o HSEC de 180 pines) para proporcionar una solución de controlador de placa única de bajo perfil. Para una primera evaluación, las controlCARD generalmente se compran junto con una placa base, un kit de

exploración de periféricos o un kit de aplicación. La tarjeta de control TMDSCNCD28335 requiere una placa base para funcionar. (Texas Instruments, s.f.)

Figura 6

Tarjeta DSP TMDSCNCD28335



Comunicación sistema Typhoon HIL

Para realizar la comunicación entre el sistema Typhoon y el PC, se indica en la figura 7, tenemos que conectar vía ethernet y con la tarjeta DSP conectar mediante micro-usb al computador. Utilizamos el software Typhoon Control Center para programar al equipo Typhoon. Para programar en la DSP debemos de utilizar el lenguaje C, por lo que podemos utilizar simulink ya que este tiene un equivalente en lenguaje C y el lenguaje por bloques que se realiza en simulink es más intuitivo para poder programar correctamente. En simulink debemos de tomar en cuenta las librerías y complementos que debemos de tener descargados para poder conectar simulink con la DSP, para ello tenemos que descargar la librería de Embedded Coder como se observa en la figura 8. Los requerimientos mínimos de una computadora para conectar sin ningún problema son: 12Gb Ram, Intel core i7 y almacenamiento con disco sólido.

Figura 7

Conexión Typhoon HIL y PC.

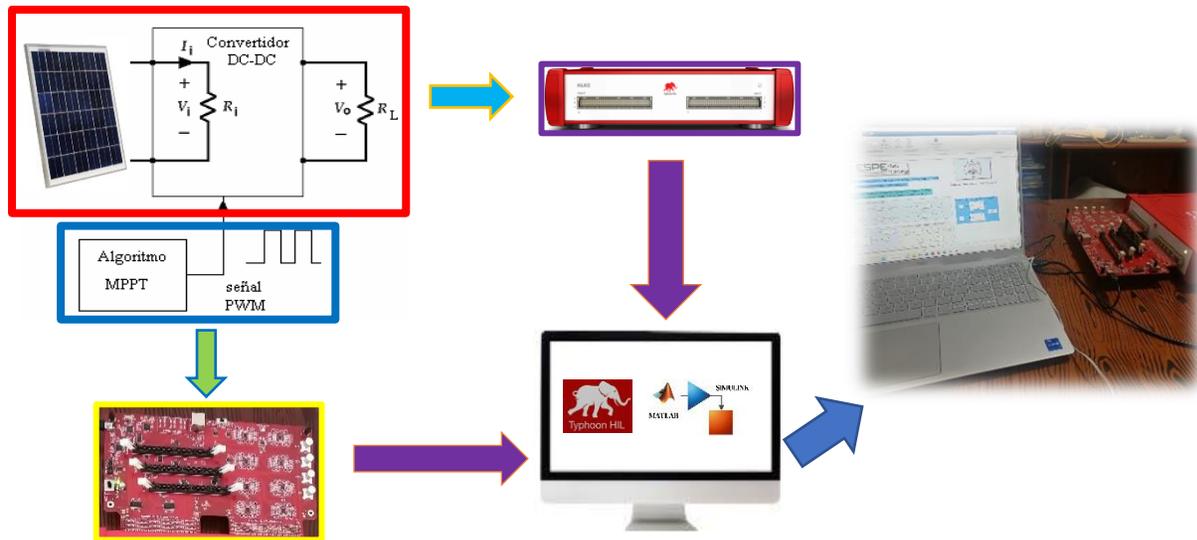
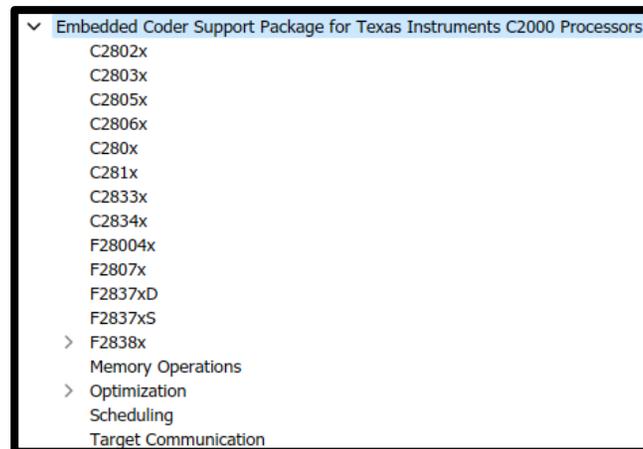


Figura 8

Librería para comunicar con la DSP.



Capítulo III

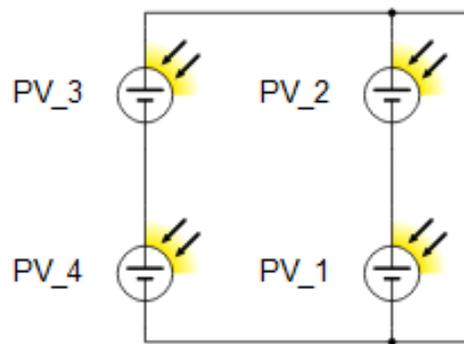
Metodología

Configuración del panel solar.

El panel solar Jinko JKM300M-72 consta de 72 celdas fotovoltaicas, para nuestro trabajo vamos a seleccionar cuatro celdas en donde su configuración va a ser de dos ramas en paralelo en donde estarán ubicadas dos celdas en serie por cada rama como se observa en la figura 9, teniendo una salida de 74 V.

Figura 9

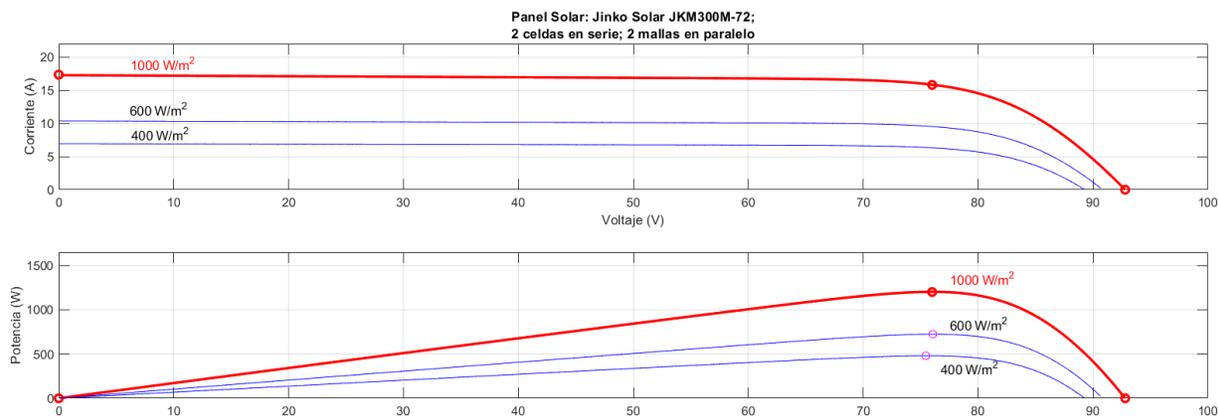
Conexión de celdas fotovoltaicas



En la figura 10, podemos observar la curva de respuesta a diferentes valores de irradiación.

Figura 10

Curva de respuesta del panel solar



Observando la figura 10, podemos obtener los siguientes valores, que los consideramos ideales, y los podemos detallar en la tabla 5.

Tabla 5

Respuesta de potencia por irradiación (Ideal)

IRRADIACIÓN	POTENCIA
1000 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	1100 [W]
600 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	700 [W]
400 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	480 [W]

Diseño convertidor Boost

Para el diseño del conversor Boost partimos de los siguientes parámetros especificado por nosotros que se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6*Parámetros de diseño*

Tensión de entrada DC (PV)	V_{pv}	74 V
Tensión de salida DC (Boost)	V_s	200 V
Potencia de entrada máxima	P_{max}	1100 W
Frecuencia de Conmutación	F_s	10 kHz

Lo primero que debemos calcular es el ciclo de trabajo para ello utilizamos la ecuación (1) y despejamos el trabajo (D).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D}$$

$$(1 - D) \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = 1$$

$$(1 - D)V_{out} = V_{in}$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

$$D = 1 - \frac{74 [V]}{200 [V]}$$

$$D = 0.63$$

El siguiente valor a calcular es la ondulación de corriente del inductor (ΔI_{LB}), utilizando la ecuación (2.4).

$$\Delta I_{LB} = (5\%) \left(\frac{P_{in}}{V_{in}} \right)$$

$$\Delta I_{LB} = (0.05) \left(\frac{1100 [W]}{74 [V]} \right)$$

$$\Delta I_{LB} = 0.7432 [A]$$

Llegado a este punto, debemos de obtener el valor del inductor (L_B), para ello utilizamos la ecuación (2.2), los valores calculados del ciclo de trabajo y la ondulación de corriente del inductor.

$$L_B = \frac{V_{in} D}{\Delta I_{LB} F_s}$$

$$L_B = \frac{(74 [V])(0.63)}{(0.7432 [A])(10[kHz])}$$

$$L_B = 6.27 [mH]$$

Para calcular el valor del capacitor (C_B) debemos de asumir un valor de ondulación (ΔV_{out}), la ayuda bibliográfica (Erazo Huera, 2020) nos recomienda usar un valor del 1.5% del voltaje de salida (V_{out}).

$$C_B = \frac{I_{max} D}{F_s \Delta V_{out}}$$

Cálculo I_{max} .

$$I_{max} = \frac{1100 [W]}{74 [V]}$$

$$I_{max} = 14.86 [A]$$

Cálculo ΔV_{out}

$$\Delta V_{out} = 0.015(200[V])$$

$$\Delta V_{out} = 3 [V]$$

Obtenidos los valores anteriores procedemos a obtener el valor del capacitor.

$$C_B = \frac{(14.86[A])(0.63)}{(10[kHz])(3[V])}$$

$$C_B = 312.06 [\mu F]$$

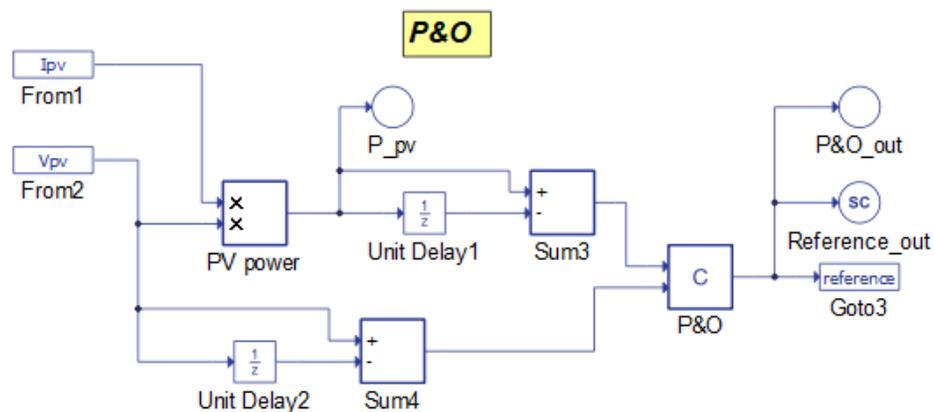
Dado que estamos simulando el convertidor Boost tenemos la opción de usar los valores calculados del capacitor (C_B) y del inductor (L_B), también podemos utilizar valores comerciales para que la simulación sea un poco más real.

Diseño de una estrategia de control MPPT para un conversor Boost.

El algoritmo MPPT a utilizar será el Perturba y Observa desarrollado en lenguaje C en el software de Typhoon HIL, además este algoritmo se está reutilizando de la sección de ejemplos que el mismo software implementa y se comprueba que esta programación esta funcionando correctamente. En la figura 11 podemos observar cómo es el esquema del algoritmo perturba y observa.

Figura 11

Esquema del algoritmo P&O



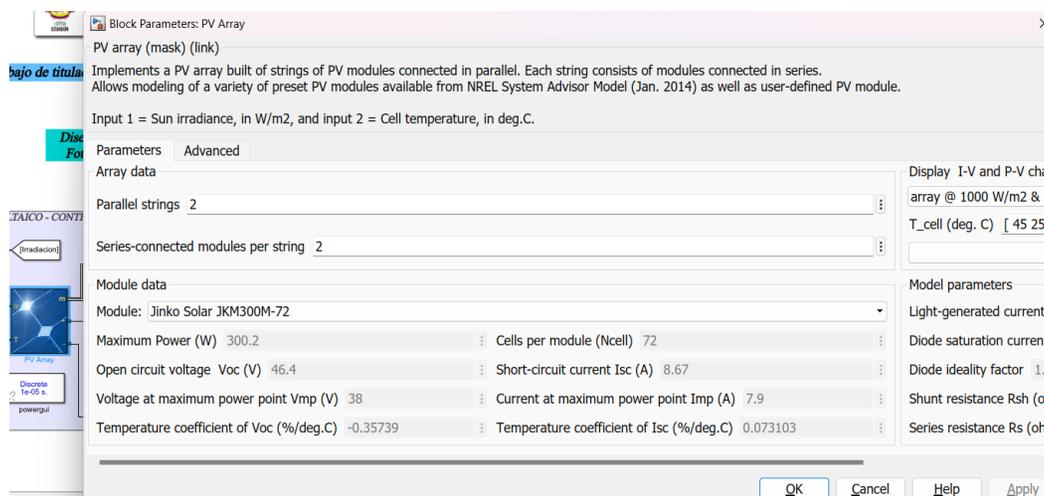
Diseño de Simulador

Diseño del Simulador en Simulink.

El simulador simulink nos permite elegir el panel fotovoltaico que nosotros queramos usar, por ello podemos decir que no es una simulación Ideal, sino, es una simulación con parámetros reales. Como se puede observar en la figura 12, los parámetros del panel fotovoltaico a elegir. Si queremos cambiar damos clic en “Module”.

Figura 12

Elección de panel solar



En el panel principal de la figura 13, podemos observar cada zona con y que hace en cada una de ellas, el algoritmo perturba y observa se desarrolla de la misma manera que el diagrama de flujo de la figura 3, solo que en este caso debemos de añadir un bloque de PWM para que envíe la señal a nuestro controlador Boost.

Figura 15

SCADA HIL



ESPE Sede
Latacunga
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

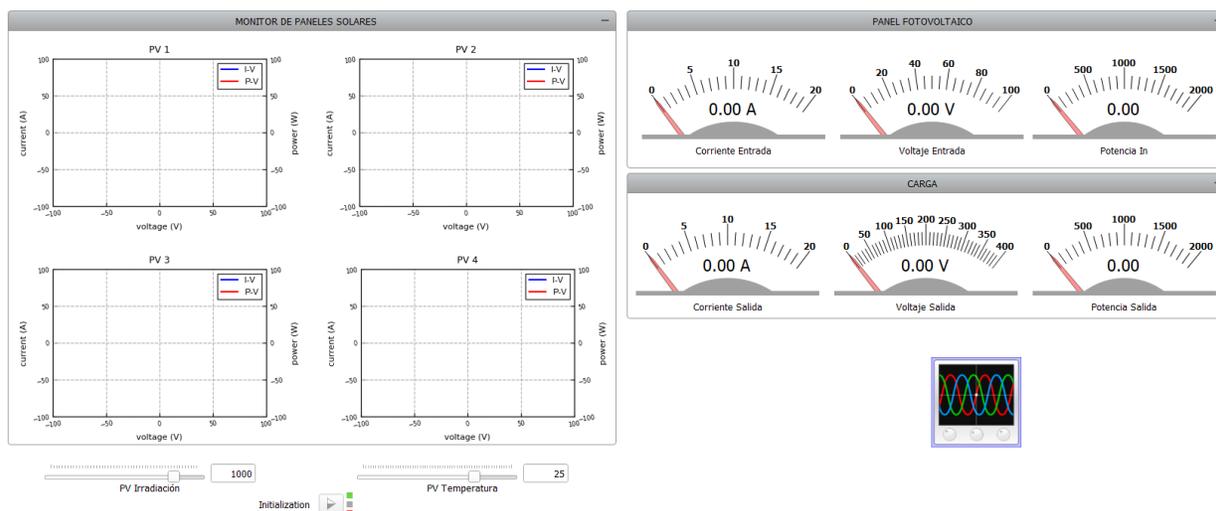


Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Diseño, Simulación e Implementación de una Estrategia de Control para un Sistema Fotovoltaico Implementado en un sistema

Carrera en Electrónica y Automatización

Autor: José Anibal Bucheli Campaña

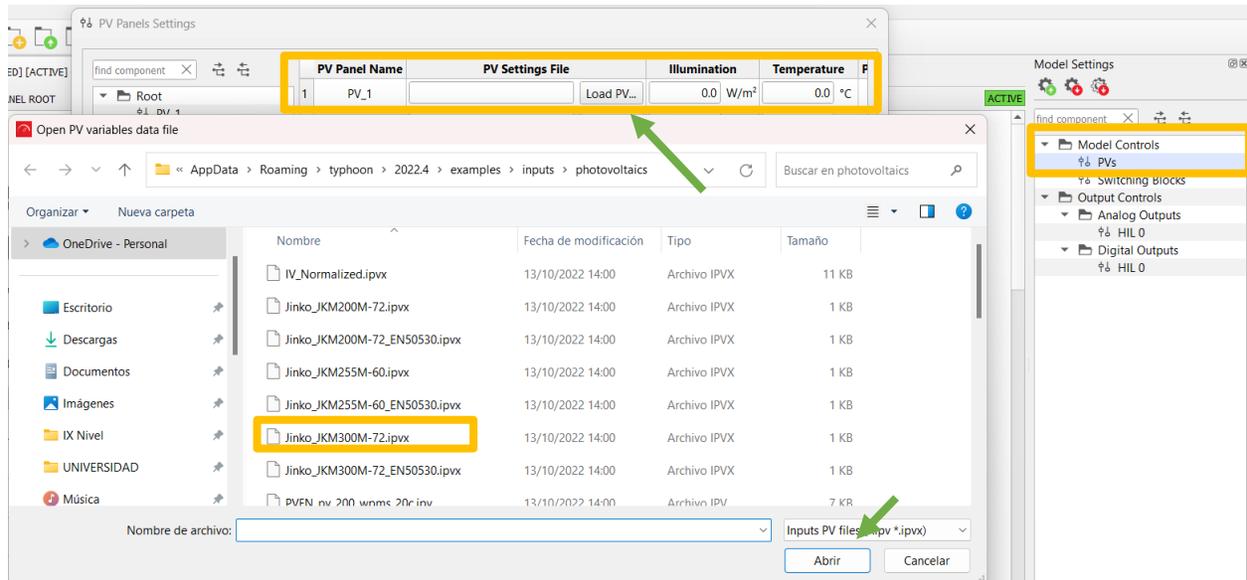


En la figura 15, se observa el monitor de cada celda fotovoltaica en donde también se observa el comportamiento del MPPT, los valores de entrada al convertor Boost y de los valores de salida en la carga.

Para utilizar las celdas fotovoltaicas en Typhoon, pasa algo parecido a simulink, debemos escoger que tipo de panel solar queremos simular, Typhoon tiene un catálogo menor para seleccionar las celdas fotovoltaicas. Antes de simular el proyecto debemos de elegir nuestro panel solar sino nos saldrá un mensaje de que es imposible simular. Para elegir las celdas fotovoltaicas debemos de dirigirnos al entorno SCADA → Model Controls → Pvs y damos clic en la selección del panel solar, como se puede ver en la figura 16.

Figura 16

Selección de Panel Solar



Implementación en Typhoon.

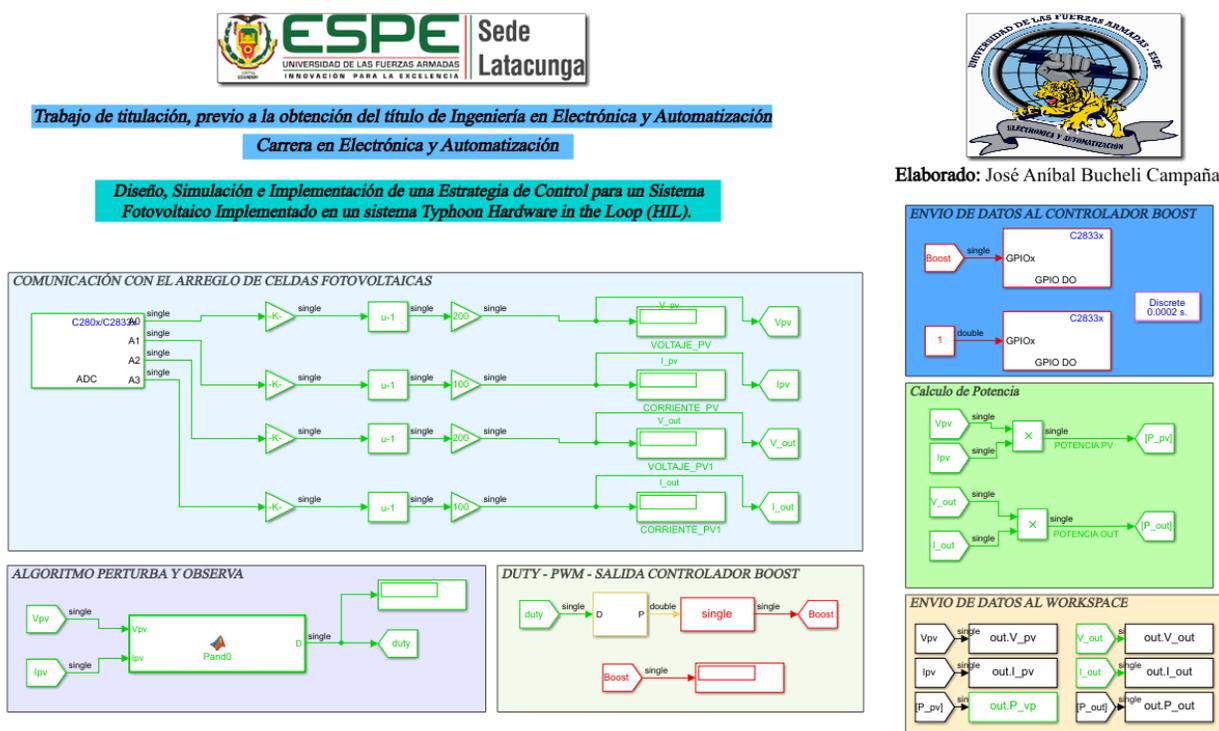
Se implementó correctamente en el HIL, en donde el controlador se realizó en simulink y se conecta por medio de la tarjeta DSP con el Typhoon HIL. Desde Typhoon HIL se envían los datos de voltaje y corriente del arreglo de celdas fotovoltaicas a simulink por medio de la tarjeta DSP, que sirve de entrada y salida para el programa. Una vez enviados los datos desde Typhoon, se realiza el mismo algoritmo de control P&O que se utilizó para la simulación en simulink, a la salida de este bloque se envía a la tarjeta DSP y luego podemos observar el control en el SCADA del Typhoon.

En la figura 17 vemos el entorno del simulink, el cual indica la comunicación Typhoon – Simulink, siendo de vital importancia el cuadro ADC con sus respectivas salidas, y en este punto podemos obtener las señales del arreglo fotovoltaico que se encuentra en typhoon (ver figura 16), el algoritmo perturba y observa que es el mismo que se utilizó para la simulación

netamente en simulink al igual que la salida PWM, la salida del PWM tiene que regresar al entorno Typhoon por lo que se utiliza los cuadros de GPIO DO, siendo salidas digitales. Además, en este entorno calculamos las potencias de entrada y salida, y todos nuestros datos los guardamos en el workspace para luego graficarlos.

Figura 17

Conexión Simulink - Typhoon



Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Carrera en Electrónica y Automatización

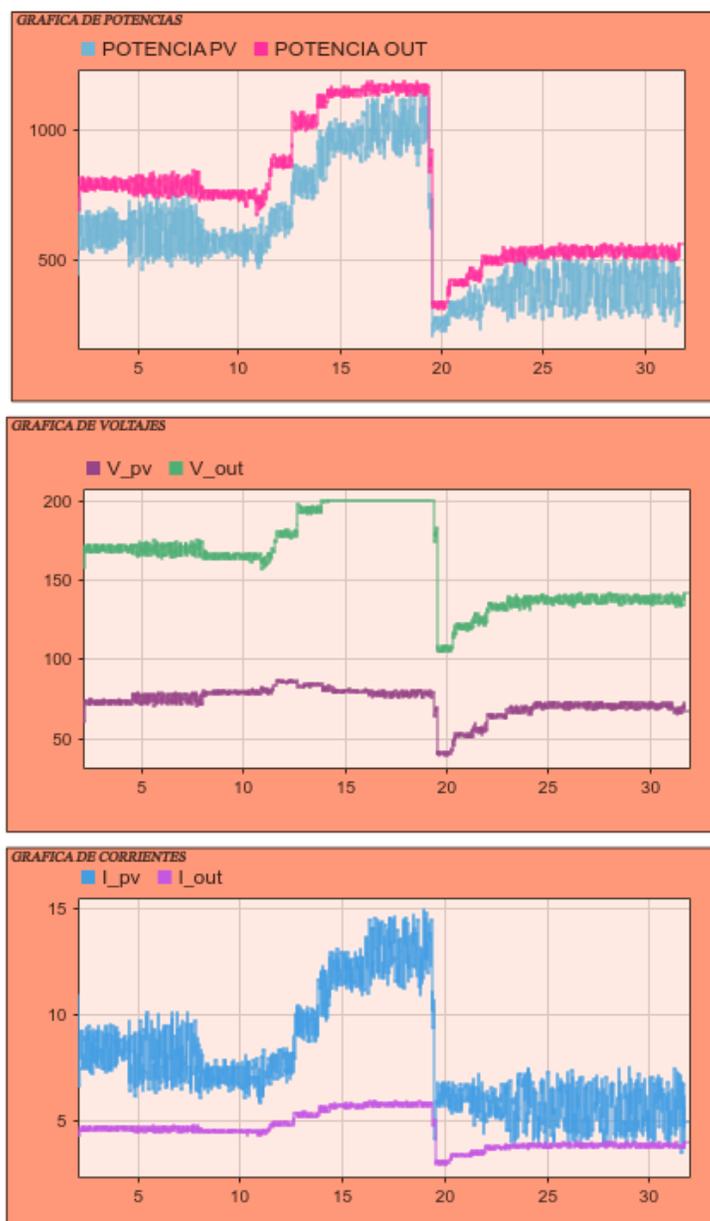
Diseño, Simulación e Implementación de una Estrategia de Control para un Sistema Fotovoltaico Implementado en un sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL).



Elaborado: José Anibal Bucheli Campaña

Figura 18

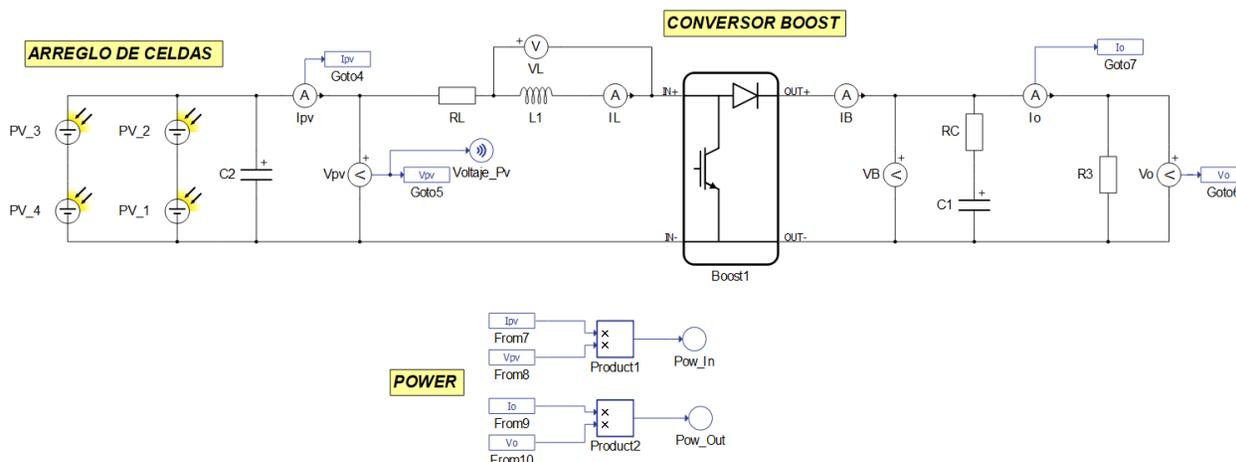
Graficas de Potencia, Corriente y Voltaje



En la figura 18 podemos observar brevemente como está funcionando nuestro programa en tiempo real desde el simulink, sin necesidad de mandar al workspace.

Figura 19

Esquema implementado en Typhoon



En la figura 19 podemos observar la similitud con la simulación en Typhoon (ver figura 12) con la diferencia que en este entorno no existe el algoritmo P&O, solo está el esquema, pero la configuración es la misma.

Para la comunicación Simulink – Typhoon debemos de tomar en cuenta los parámetros/pines que se muestran en la tabla 2 y 3, para nosotros configurar el convertidor Boost (Figura 20) y la transmisión y recepción de datos (figura 21).

Figura 20

Propiedades Boost en Typhoon.

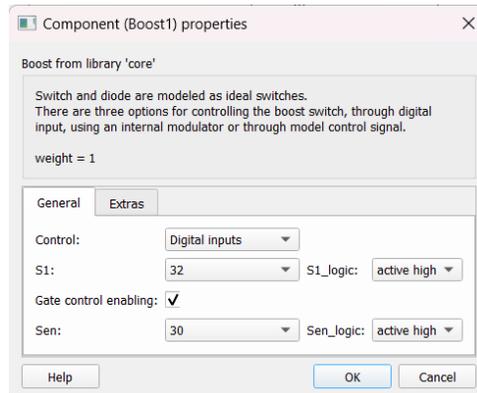
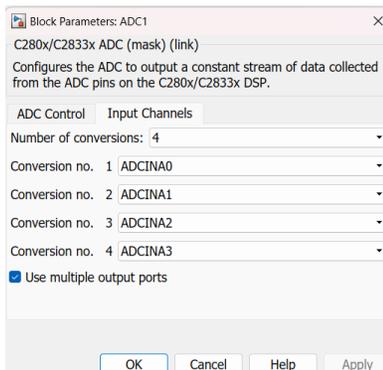
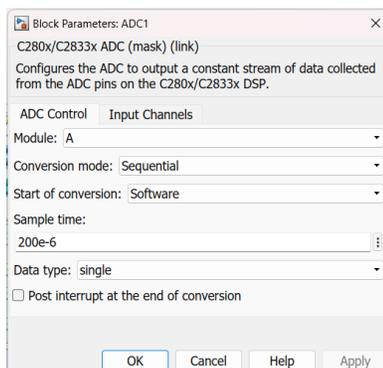
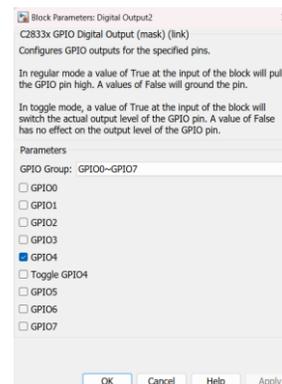
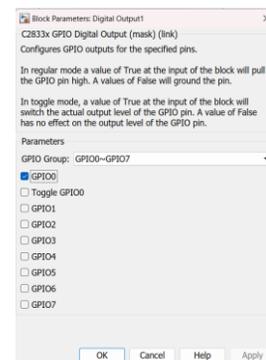


Figura 21

a) Configuración bloque ADC; b) Configuración bloque de salida digital



a)



b)

Además, debemos de seleccionar los valores que queremos enviar desde el Typhoon, para eso nos dirigimos al entorno SCADA → Analog Outputs → HIL 0, como se indica en la figura 22.

Figura 22

Envío de datos desde Typhoon.

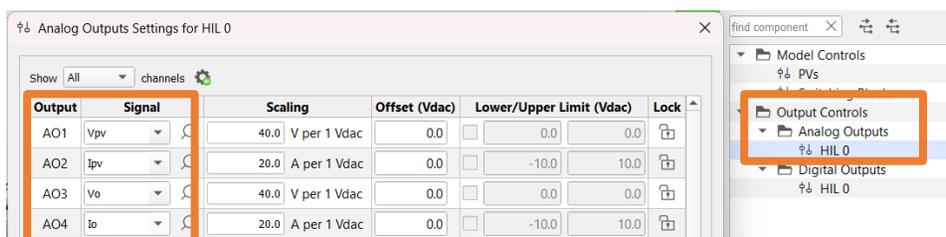


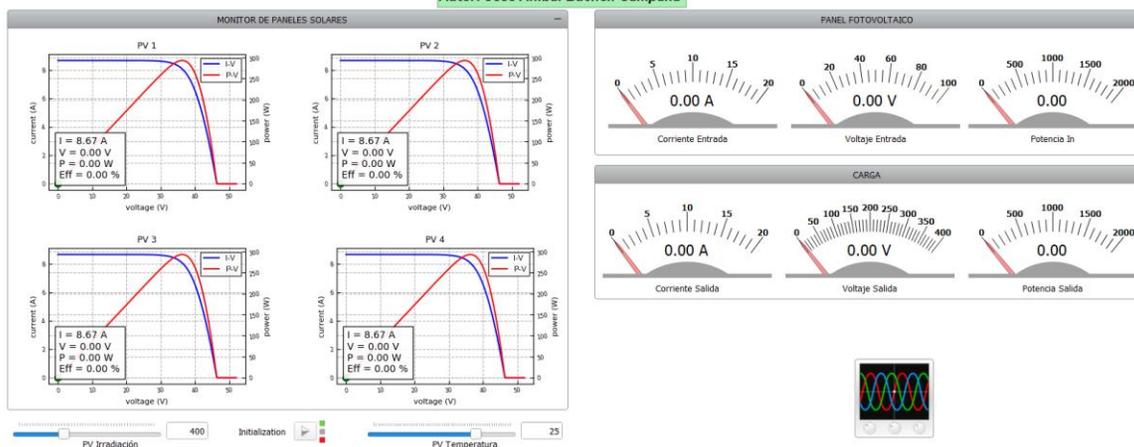
Figura 23

SCADA Typhoon para implementar



*Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Automatización
Diseño, Simulación e Implementación de una Estrategia de Control para un Sistema Fotovoltaico Implementado en un sistema
Carrera en Electrónica y Automatización*

Autor: José Anibal Bucheli Campaña



En la figura 23 podemos ver como resultado final nuestro SCADA ya listo para funcionar.

Capítulo IV

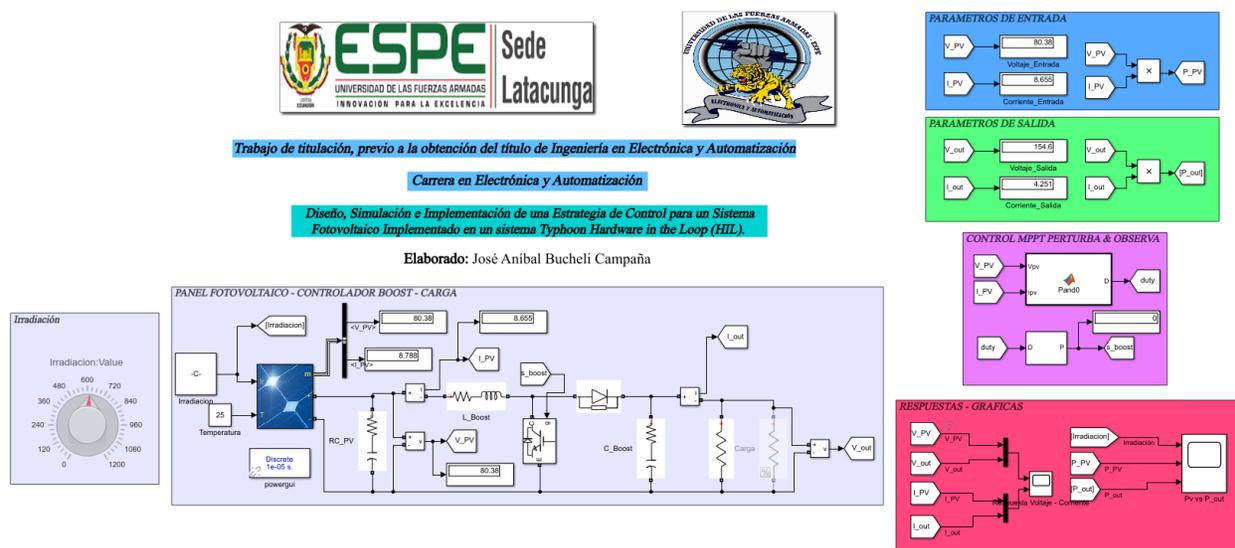
Análisis y discusión de resultados

Resultados Simulados en Simulink.

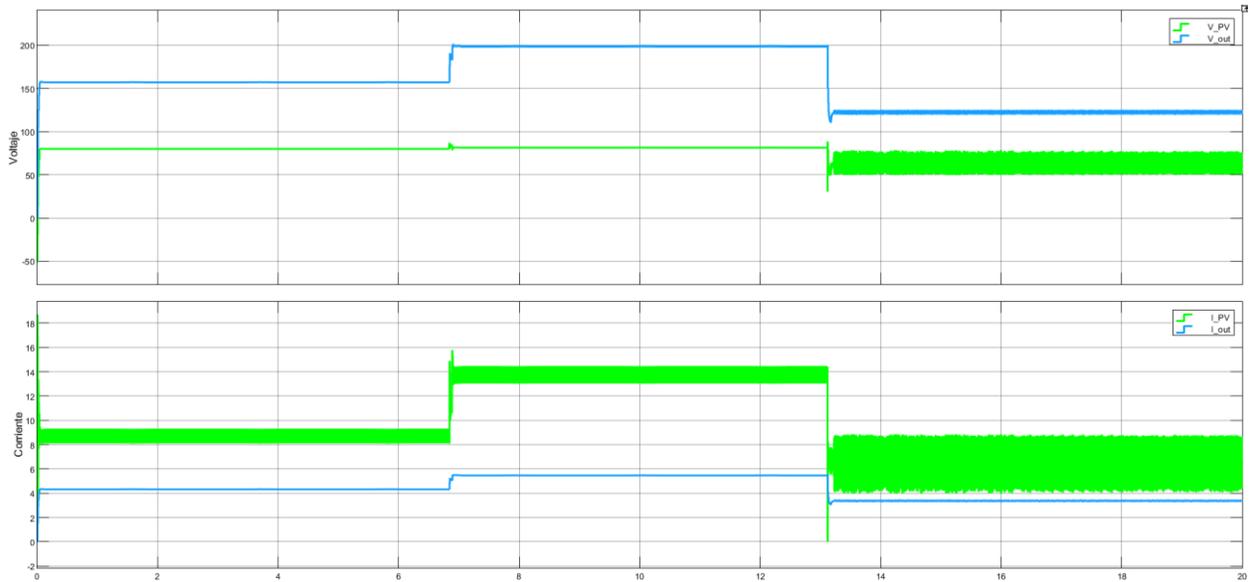
El esquema realizado en Simulink se presenta en la figura 24.

Figura 24

Esquema elaborado en Simulink



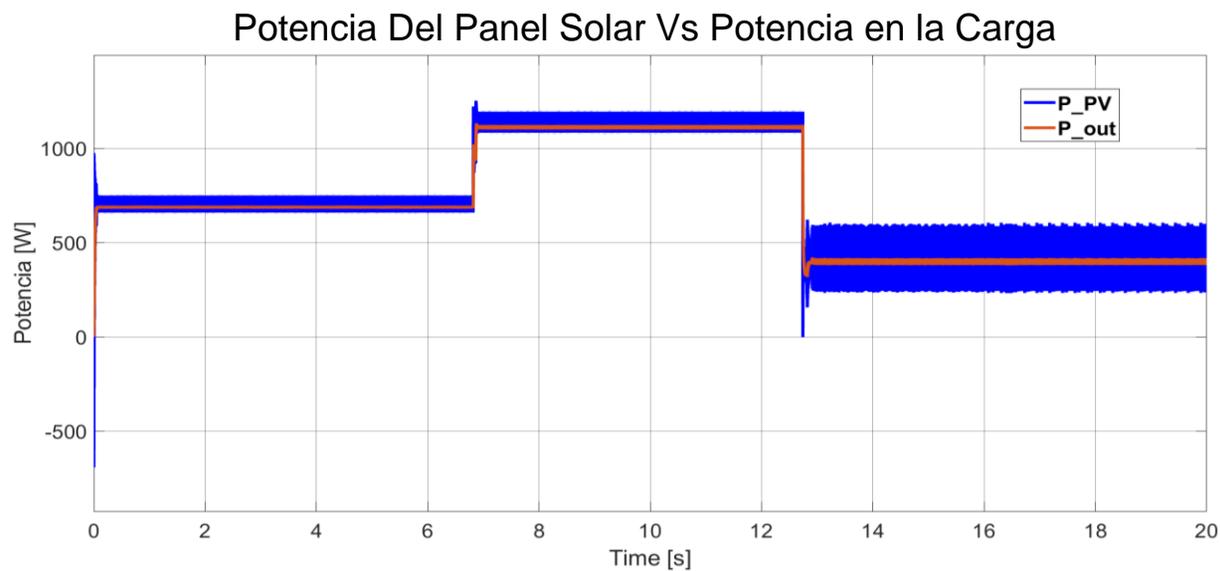
Para la simulación utilizamos una carga de 40Ω , irradiación variable, y una temperatura de 25°C . Para observar cómo está funcionando nuestra simulación variamos la irradiación en tres puntos: $400 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$, $1000 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$ y $600 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$. Obtenemos los valores reales con ayuda de nuestra simulación y lo comparamos con los valores ideales en esos puntos de irradiación.

Figura 25*Respuesta de Voltaje y Corriente*

Gracias a la figura 25 podemos ver el funcionamiento correcto del controlador Boost ya que está elevando nuestro voltaje dependiendo de la irradiación que le estamos enviando. El cambio de irradiación se puede observar como un escalón y se nota el cambio de cada uno de ellos. Observamos que en la respuesta de voltaje y corriente que nos entrega el arreglo fotovoltaico

Figura 26

Respuesta de la potencia fotovoltaica vs potencia en la carga



En la figura 26 podemos ver la comparación de las potencias de entrada y salida, y como afecta cada cambio de irradiación, este resultado lo comparamos con los valores ideales de potencia que nos muestra en la tabla 4, por lo que tenemos la siguiente tabla en comparación de la potencia real y la ideal.

Tabla 7

Comparación potencia real e ideal

IRRADIACIÓN	POTENCIA IDEAL	POTENCIA REAL
1000 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	1100 [W]	1170 [W]
600 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	700 [W]	750 [W]
400 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	480 [W]	410 [W]

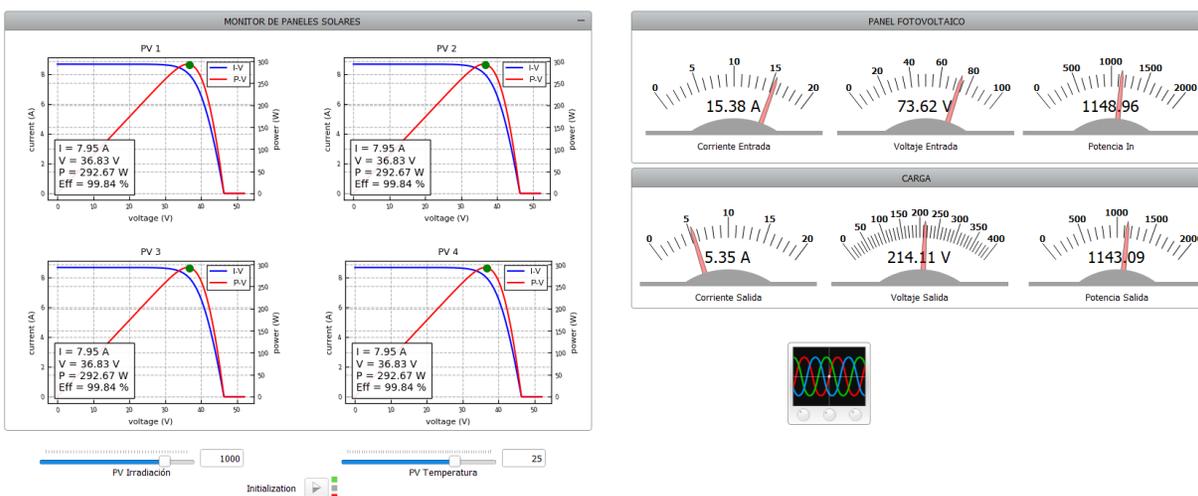
Al comparar las potencias podemos decir que para una irradiación de 1000 [W] la potencia que obtenemos en la carga es superior a la ideal, lo que determina que esta funcionando correctamente para ese valor de irradiación, lo mismo pasa la 600 [W], pero cuando tenemos una irradiación baja como lo es 400 [W], vemos que existe una pérdida de potencia, la cual no deseamos en nuestro equipo.

Resultados Simulados en Typhoon HIL.

En la figura 27 podemos observar de forma general el funcionamiento del SCADA. Para la simulación estamos comenzando a utilizar una carga de 40 Ω , irradiación de 1000 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ y una temperatura de 25°C.

Figura 27

SCADA HIL para implementar

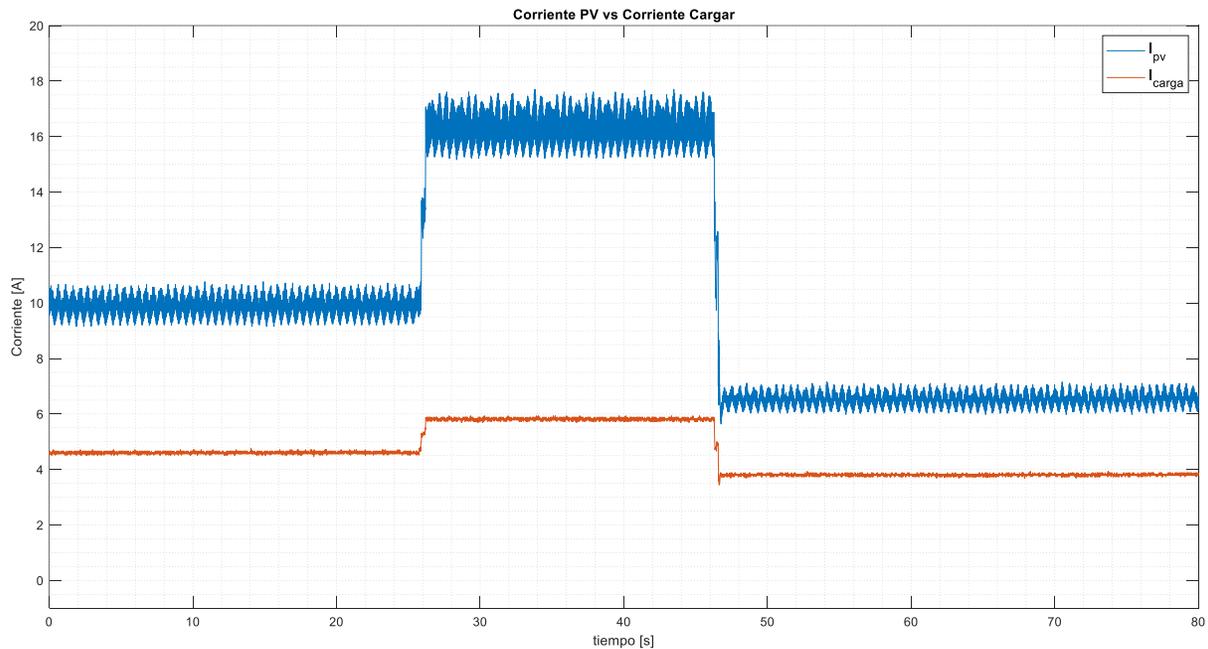


En el apartado del monitor de paneles solares podemos observar las características de cada celda, podemos observar las curvas características de Corriente vs Tensión y Potencia vs Tensión, además se observa con un círculo verde el funcionamiento del MPPT, y también se observa con que eficiencia trabajan las celdas fotoeléctricas.

Para probar otras variaciones de irradiaciones, se debe de hacer la toma de datos de forma individual, no como se realiza en simulink.

Figura 28

Respuesta de corriente en simulador Typhoon HIL.

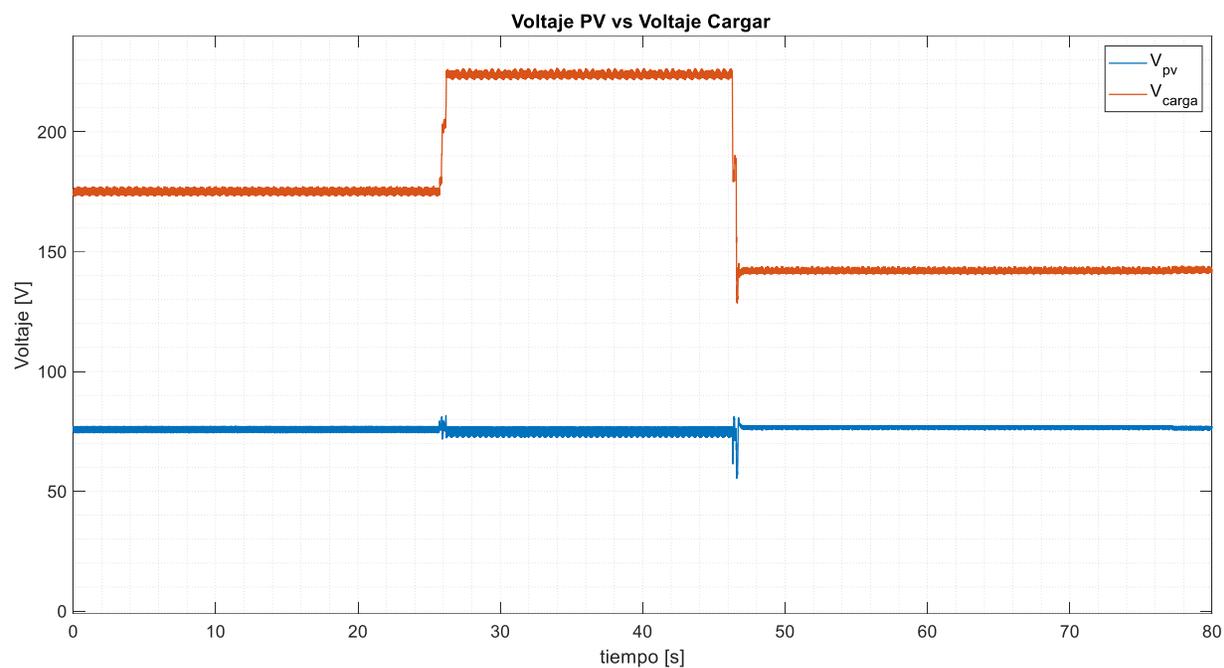


En la figura 28 podemos observar el cambio de corriente en cada valor de irradiancia, vemos que a la salida del panel fotovoltaico cuenta con bastantes oscilaciones, en cambio, cuando vemos el resultado de la corriente en la carga, vemos que existe una disminución de oscilaciones en la respuesta, este cambio también se puede visualizar en las figuras 29 y 30.

En la figura 29, además de analizar las oscilaciones antes mencionadas, vemos que está realizando una elevación de voltaje la cual está prevista, cumpliendo con el objetivo del conversor Boost. Tomando en cuenta que el voltaje en la carga va a variar con respecto a la irradiación que va cambiando.

Figura 29

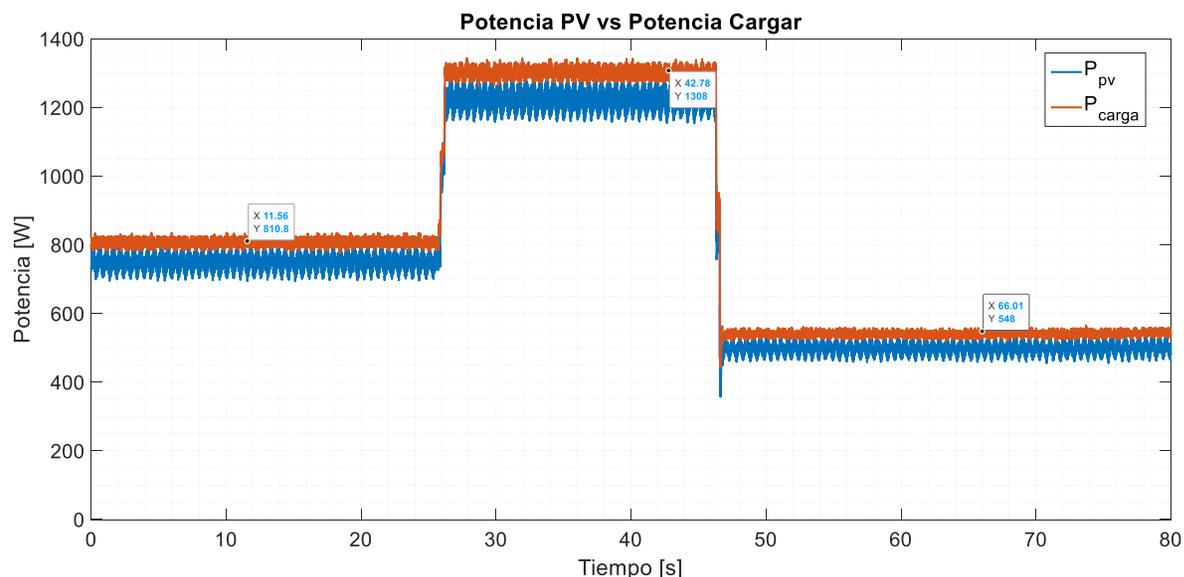
Respuesta de Voltaje simulado en Typhoon.



Observando la respuesta de potencia de la figura 30, la potencia en la carga disminuye las oscilaciones y la potencia aumenta en cada cambio de irradiación. El control y el convertor nos entregan valores altos de potencia donde aprovechamos al máximo el recurso solar y teniendo un aprovechamiento máximo de la potencia en la carga.

Figura 30

Respuesta de la potencia simulada en Typhoon.



Los valores de voltaje de la figura 30 lo encontramos en la tabla 8.

Para realizar una correcta comparación de potencias tenemos la tabla 7. En este caso la mayoría de irradiación nos entrega un voltaje superior o casi igual al ideal, por lo que podemos decir que esta simulación se ha realizado correctamente y su funcionamiento es muy bien entregándonos el máximo punto de potencia para cada caso.

Tabla 8

Comparación de Potencias con el simulador Typhoon

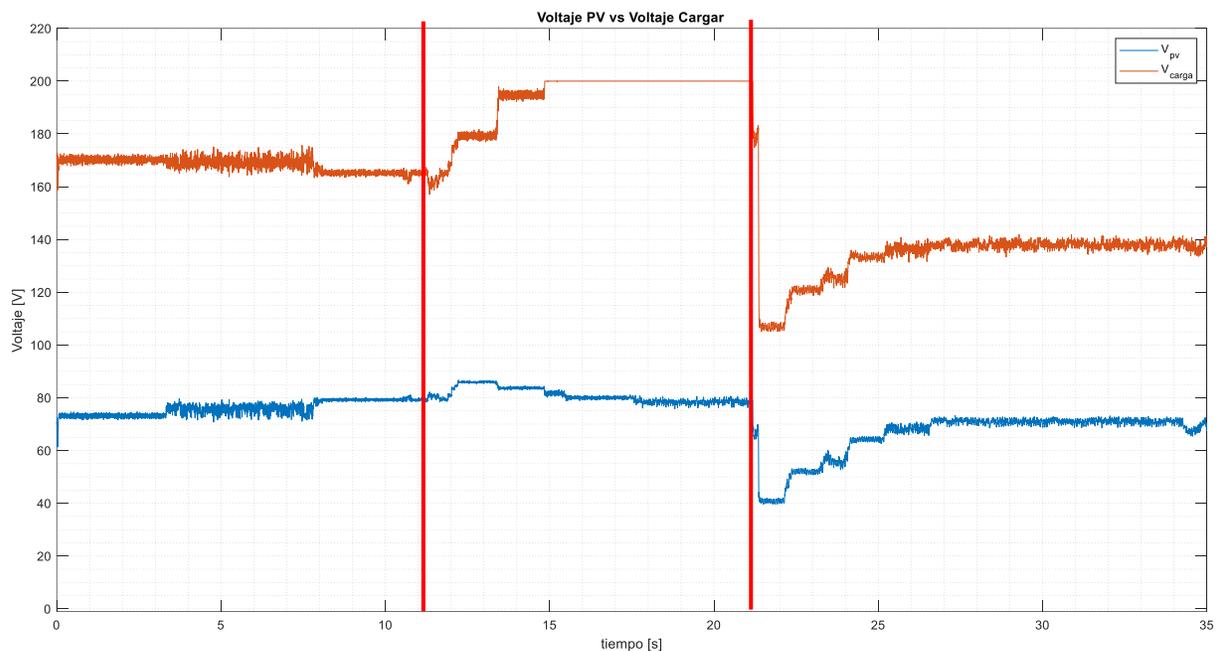
IRRADIACIÓN	POTENCIA IDEAL	POTENCIA REAL
1000 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	1100 [W]	1300 [W]
600 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	700 [W]	810 [W]
400 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	480 [W]	539 [W]

Resultados Implementados en Typhoon HIL

Para la simulación estamos comenzando a utilizar una carga de 40Ω , irradiación de $600 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $400 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una temperatura de 25°C . Para poder determinar los valores de potencia de cada uno y comparar con los valores ideales.

Figura 31

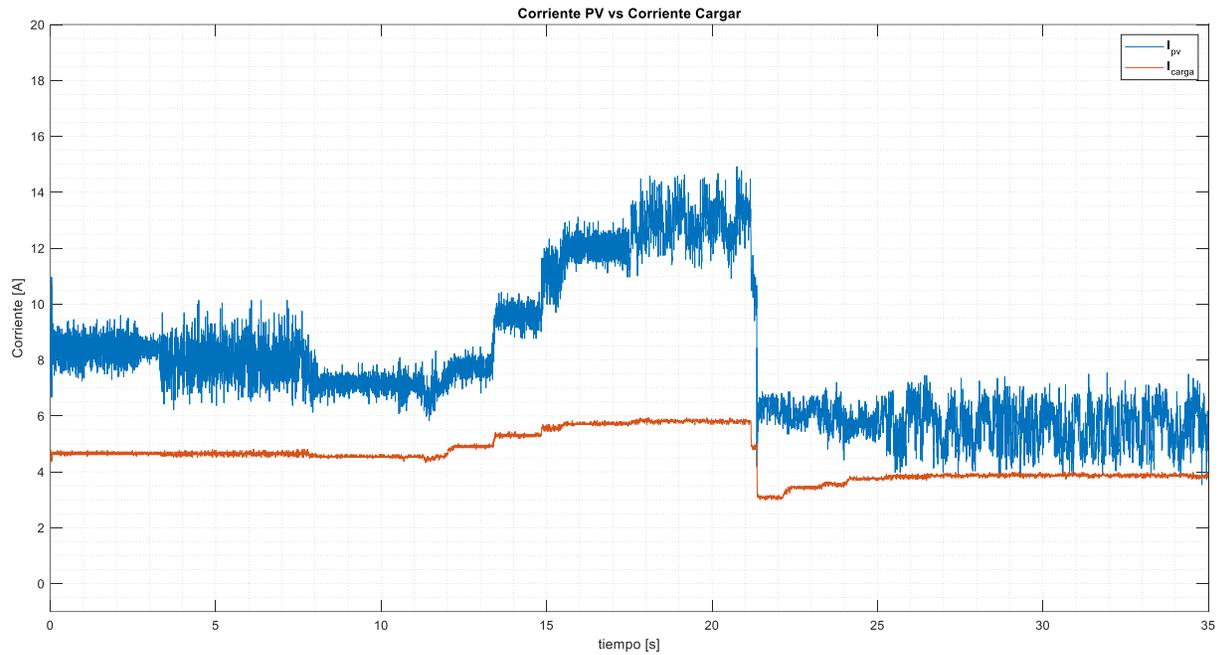
Respuesta de Voltaje de Entrada vs Salida



Gracias a la figura 31, podemos observar el funcionamiento del convertidor Boost, ya que está elevando el voltaje de entrada al que nosotros diseñamos en un inicio. Además, podemos ver cómo afecta el cambio de irradiación, en cada cambio de irradiación, el voltaje de salida después de un tiempo se estabiliza en el valor que necesitamos. Este cambio también se puede observar en la figura 32 y 33.

Figura 32

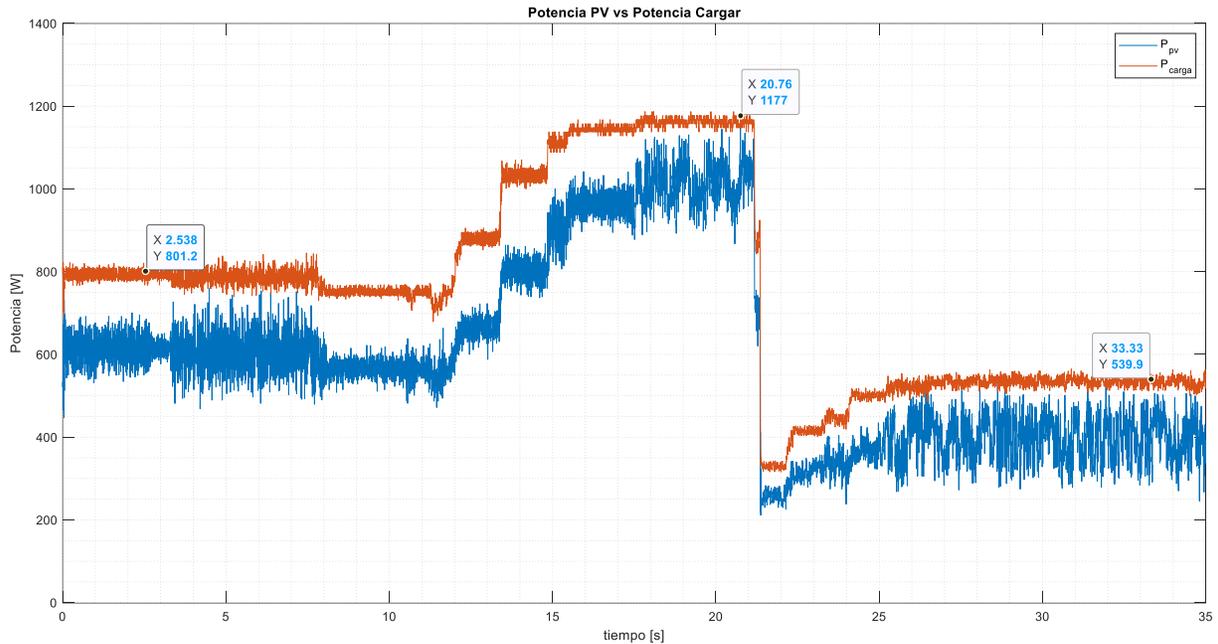
Respuesta de la Corriente de Entrada vs Salida.



En la figura 32, vemos que la corriente en la carga varía, cuando tenemos una irradiación de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, podemos determinar la corriente máxima a ese valor y cuando disminuimos la irradiación la corriente disminuye, por lo que podemos decir que la corriente depende de la irradiación.

Figura 33

Respuesta de Potencia de Entrada vs Salida.



La figura 33, es la más importante para este caso, ya que determinamos si está funcionando correctamente y si está haciendo lo que la teoría nos dicta. Solo con los datos que nos arroja la gráfica, podemos decir, que la implementación fue mucho mejor que las simulaciones anteriores y con la tabla 8, lo aseguramos. La tabla 7 nos muestra la comparación entre las potencias ideales y reales que obtuvimos por la implementación Typhoon -Simulink, es mejor que la potencia que nos entrega en cualquier punto sea superior a la ideal, por lo que, si nuestra carga nos pide un valor de potencia semejante a la ideal, podremos satisfacer sin ningún tipo de problema para una carga aislada.

Tabla 9*Comparación potencia Ideal vs Real*

IRRADIACIÓN	POTENCIA IDEAL	POTENCIA REAL
1000 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	1100 [W]	1177 [W]
600 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	700 [W]	801 [W]
400 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	480 [W]	539.9 [W]

Comparación de Potencia Ideal y Real con cada método de simulación

En la tabla 9 comparamos las potencias reales con la ideal, de los anteriores métodos de simulación en cada entorno y el implementado en el sistema HIL. Por lo que el mejor método de comprobación del funcionamiento de panel solar y del controlador Boost con su control MPPT, el implementado en el sistema Typhoon HIL comunicado con Simulink es el que mejor funciona en todo momento.

Tabla 10*Comparación entre potencia ideal y real, con cada método de simulación e implementación*

IRRADIACIÓN	POTENCIA IDEAL	POTENCIA REAL SIMULINK	POTENCIA REAL TYPHOON	POTENCIA REAL IMPLEMENTADO TYPHOON
1000 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	1100 [W]	1170 [W]	1300 [W]	1165 [W]
600 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	700 [W]	750 [W]	810 [W]	801 [W]
400 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	480 [W]	410 [W]	539 [W]	539.9 [W]

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El algoritmo MPPT aplicado al convertidor Boost DC/DC por simulación y en aplicación experimental en Typhoon HIL es el perturba y observa, el cual presenta un buen desempeño para diferentes valores de irradiación y temperatura aplicadas al panel solar, teniendo una eficiencia del 98% en implementación al comparar la curva de potencia ideal del panel fotovoltaico establecida por el fabricante y la potencia obtenida a la salida del convertidor.

Para evaluar el control MPPT se somete al sistema a cambios en la radiación solar, así como también a cambios en la carga local resistiva, en cada escenario se pudo validar que frente a incrementos de radiación se produce incrementos de potencia. Se evidencia que cuando se obtiene alta radiación se obtiene la máxima potencia, y en el escenario en el que la demanda consume menos de la potencia generada se produce energía desperdiciada, por lo tanto, en trabajos futuros se agregara unidades de almacenamiento.

El usar herramientas de HIL, como el caso Typhoon permite que los controles diseñados al ser implementados en dispositivo reales en este caso, una DSP, actúan en tiempo real, así como también el contar con la planta en este caso el conversor en Typhoon permite que sea flexible para realizar distintas pruebas en dispositivos de electrónica de potencia debido a que está diseñado para este tipo de aplicaciones.

Se definen como trabajos futuros adicionar la etapa de inversión de DC/AC para conexión con cargas trifásicas operando de modo aislado, sus controles serán implementadas en el sistema Typhoon HIL. Además, este sistema servirá de base para integrar después combinarlos con sistemas de almacenamiento y seguir escalando hasta una micro-red.

Este trabajo de investigación presentó muchos retos de implementación, al diseñar las interfaces de electrónica de potencia en el Typhoon real time y los controles en los dispositivos DSP, para poder evaluar la eficiencia y la aplicabilidad del controlador.

Recomendaciones

Dependiendo el valor de nuestra carga también va a variar nuestra potencia de salida, por lo que podemos variar nuestra carga hasta encontrar la que este más acuerdo a nuestras necesidades.

Como es una simulación podemos utilizar valores de irradiación desproporcionados o no reales, solo de manera didáctica, ya que en la vida real estos parámetros nunca van a llegar a cifras exageradas.

Comprobar los requerimientos mínimos que debe de tener la PC para poder funcionar correctamente con los distintos softwares abiertos.

Al momento de descargar la librería para la DSP, debemos de descargar los complementos que nos pide Matlab, ya que estos pueden ir cambiando por versiones, y debemos de descargar la que nos pide en ese momento, ya que si se descarga versiones diferentes a las que pide, va a poder instalar la librería sin problema, pero el funcionamiento no va a ser el correcto.

Bibliografía

- Cuestas, S., & Lebus, L. (2011). Diseño de un Seguidor de Punto Máximo de Potencia. *Averna*, 37-42.
- Erazo Huera, P. C. (2020). *Implementación de un Inversor de Potencia Monofásico Controlado Mediante Control por Matriz Dinámica (DMC)*. Sangolquí: ESPE.
- Esrasm, T., & Chapman, P. L. (21 de Mayo de 2007). Comparación de las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia de los conjuntos fotovoltaicos. *IEEE Xplore*, págs. 439-449.
- Jinko. (29 de Junio de 2014). *SolarDesignTool*. Obtenido de <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Jinko/2194/JKM-300M-72/specification-data-sheet.html>
- National Grid. (2020). Future Energy Scenarios Navigation. 1-124.
- Ruiz C., L. J., Beristáin J., J. A., Sosa T., I. M., & Hernández L., J. H. (2010). Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. *RIEE&C*, 17-23.
- Texas Instruments. (s.f.). Obtenido de <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28335?DCMP=mcu-c2x-tmdsrslv-en&HQS=ep-mcu-c2x-tmdsrslv-toolsinsider-2014-0410-tmdscncd28335-tf-en#description>
- Typhoon HIL. (18 de Marzo de 2015). Obtenido de <https://www.typhoon-hil.com/products/hil402/>
- Valderrama, F. F., Moreno C., H., & Vega, H. M. (2011). Análisis, Simulación y Control de un convertidor de Potencia DC-DC tipo Boost. *INGENIUM*, 44-55.

Vera Dávila, A. G., Delgado Ariza, J. C., & Sepúlveda Mora, S. B. (2018). Validación del Modelo Matemático de un Panel Solar Empleando la Herramienta Simulink de Matlab. *Revista Investigación Desarrollo Innovación*, 343-356.

Anexos