



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

1

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**  
**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**

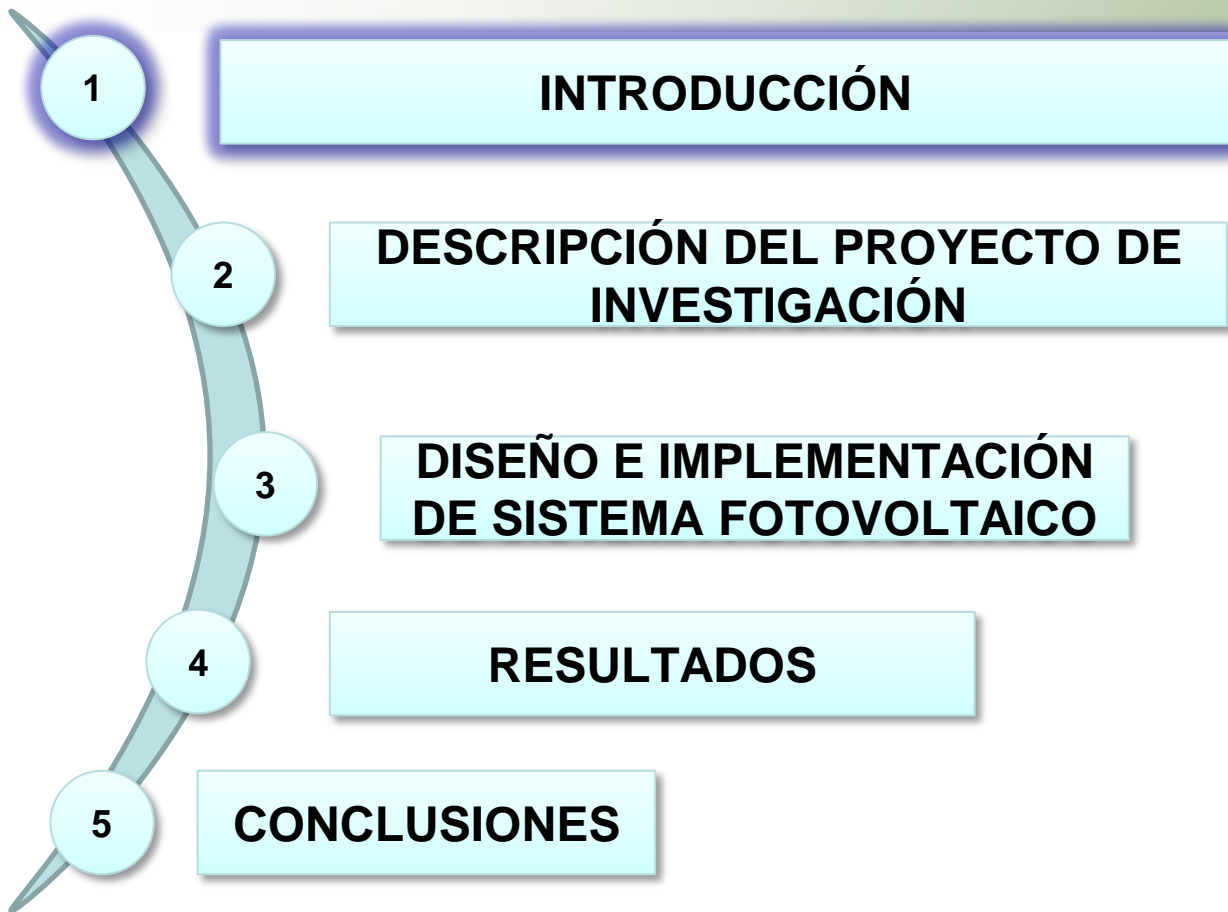
**Diseño, Simulación e Implementación de una Estrategia de Control para un Sistema Fotovoltaico Implementado en un Sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL).**

**Autor:**

Bucheli Campaña, José Aníbal

**Tutora:** Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario, Phd.

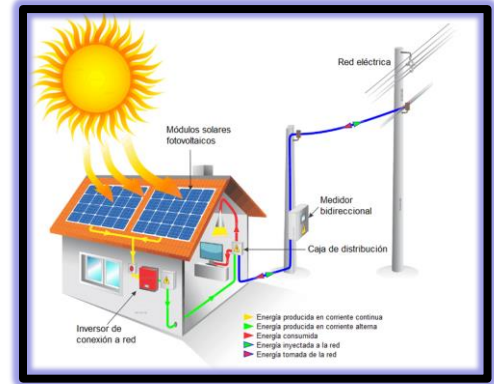




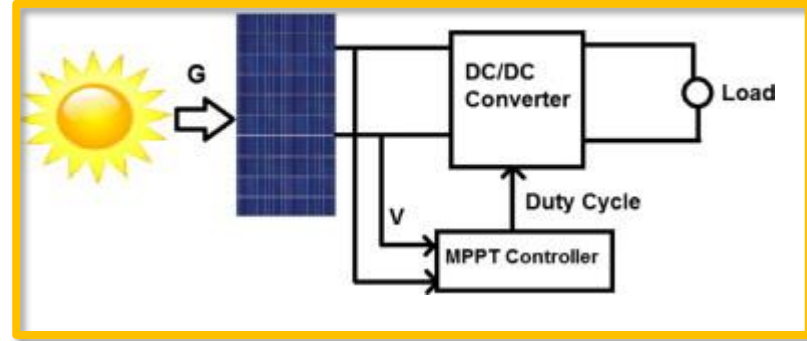
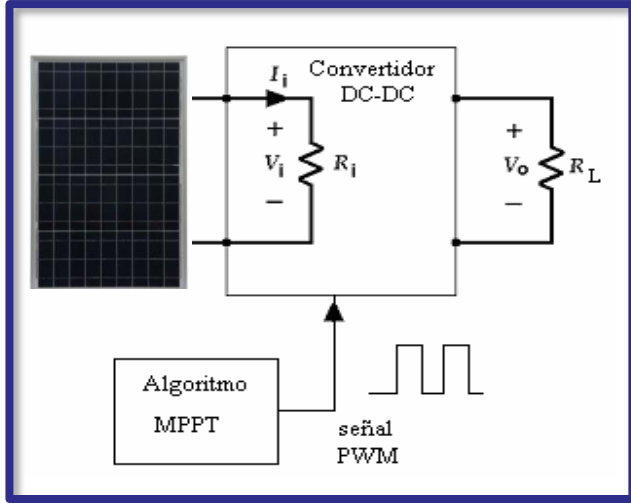
## Problemática



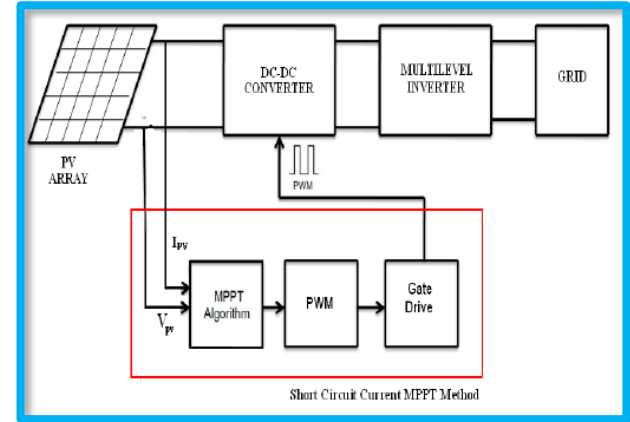
Energía Solar



## Problemática



CONTROLADORES



## Problemática



## Objetivo general

Diseñar una estrategia de control para un Panel Fotovoltaico en el sistema Typhoon HIL.

## Objetivos específicos

Modelar y simular un sistema fotovoltaico.

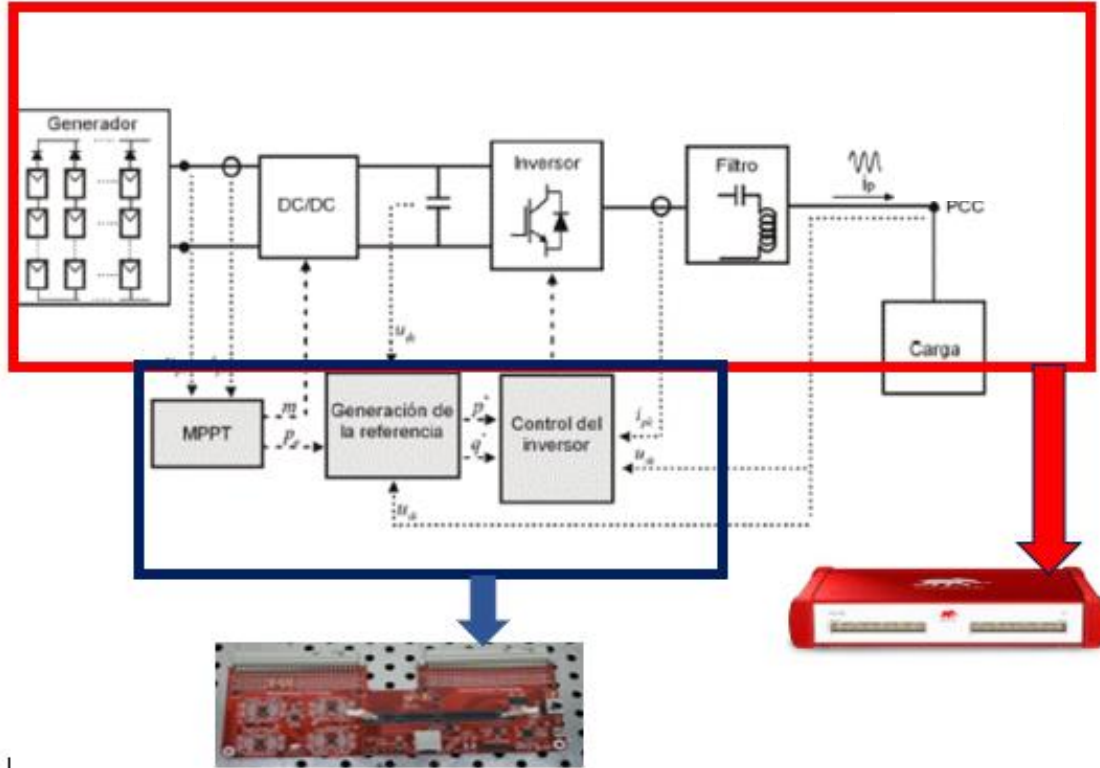
Diseñar y validar por simulación una estrategia de control MPPT para paneles fotovoltaicos.

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





## Sistema de control del sistema fotovoltaico

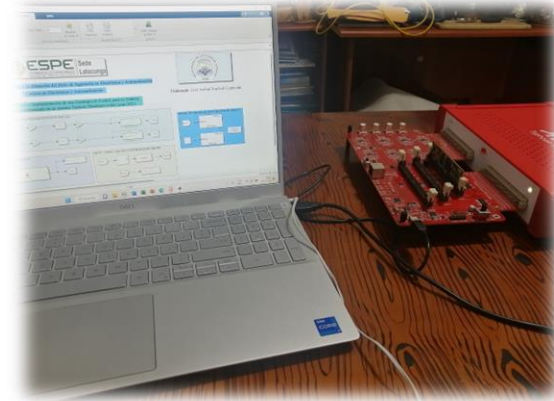
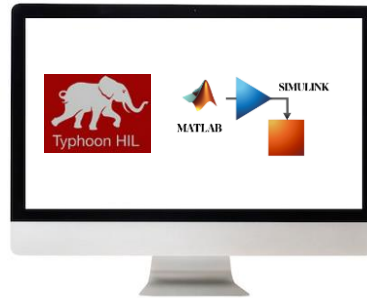
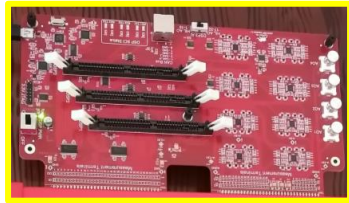
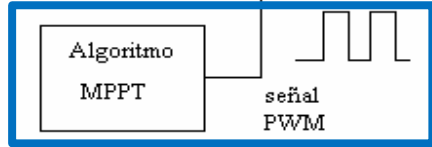
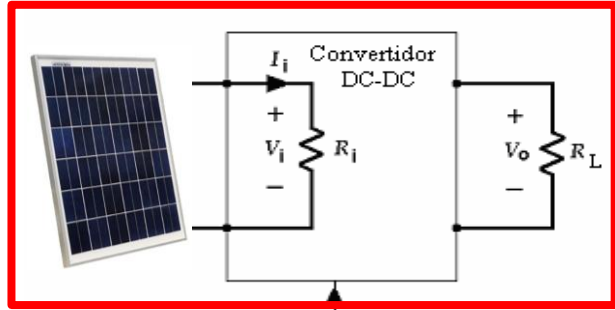


1





## Sistema de control del sistema fotovoltaico



## Datos de placa del sistema

### TYPHOON HIL 402



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

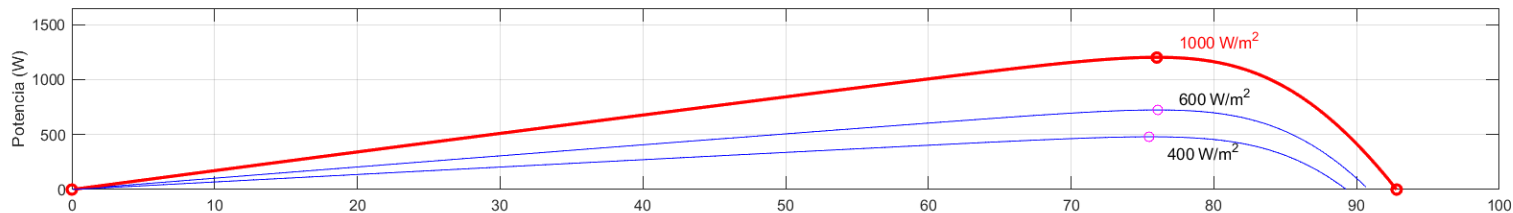
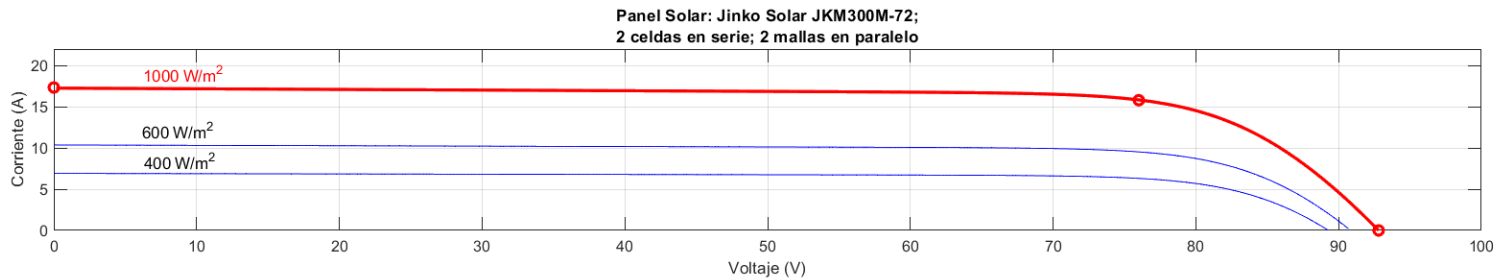


## Datos de placa del panel solar Jinko JKM-300M-72 (300[W])

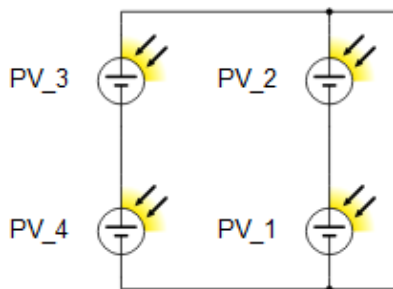
Potencia nominal STC	300 [W]
Numero de celdas	72
Corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ )	8.67 [A]
Corriente al máximo punto de potencia	7.9 [A]
Voltaje circuito abierto	46.4 [V]
Voltaje máximo punto de potencia ( $V_{mp}$ )	38 [V]
Máxima eficiencia	15.46%



Curva de Respuesta del Panel Solar



Configuración Panel Solar

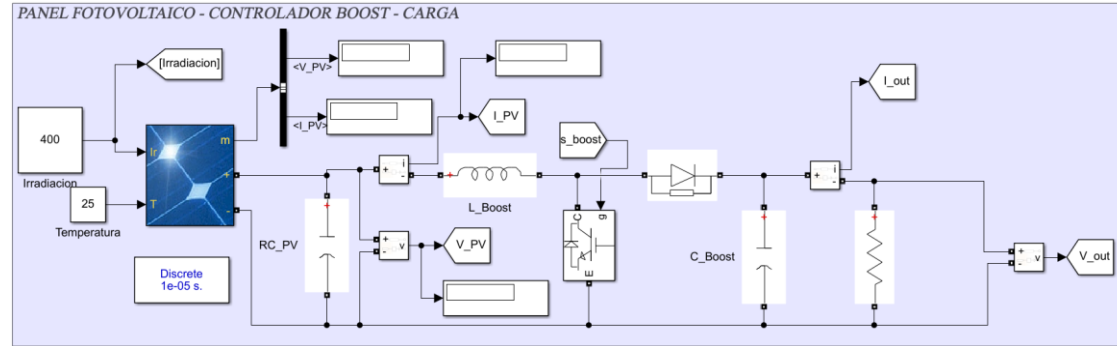


Respuesta Ideal de Potencia

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 del convertidor BOOST y Filtro

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



ECUACIONES

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

$$L_{Boost} = \frac{V_{pv} D}{\Delta I_{L_{boost}} f_s}$$

$$C_{Boost} = \frac{I_{max} D}{f_s \Delta V_{out}}$$

$$\Delta I_{L_{Boost}} = 5\% \frac{P_{pv}}{V_{pv}}$$

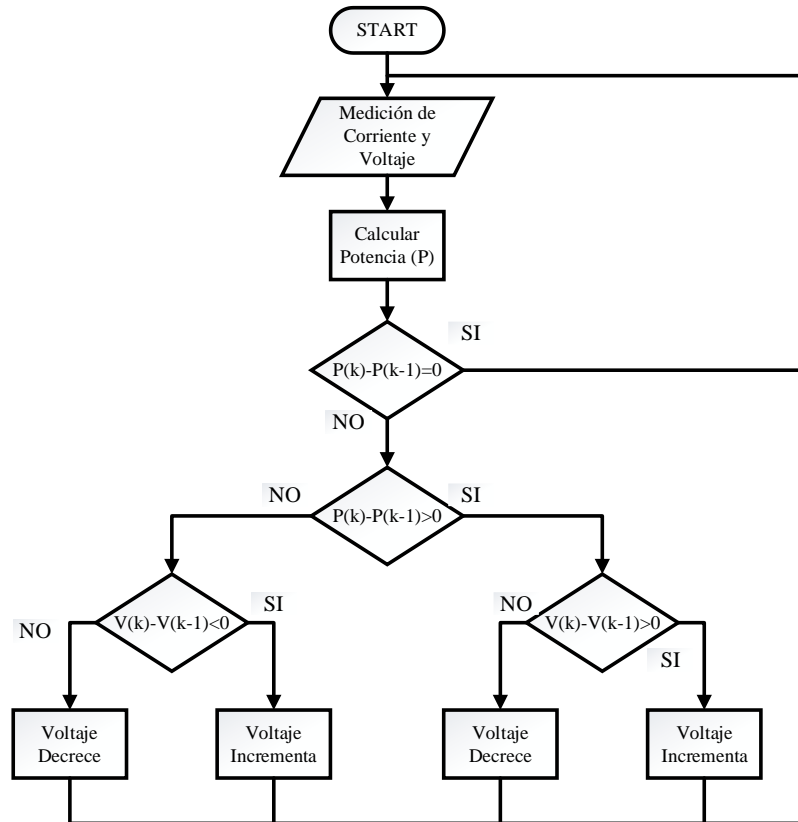
Valores  
Calculados

$$L_{Boost} = 6.27 [mH]$$

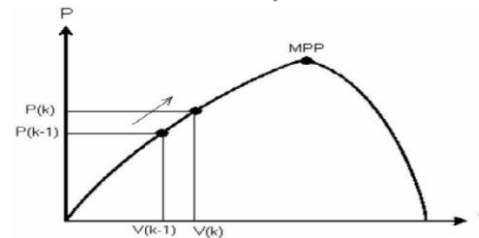
$$C_{Boost} = 312.06 [\mu F]$$

$$RC_{PV} = 100 [\mu F]$$

## Diseño del algoritmo de control MPPT

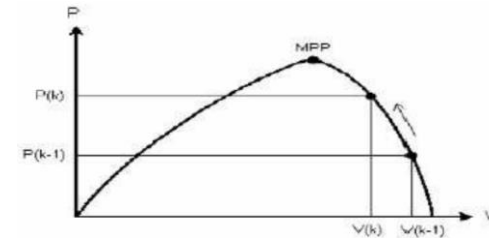


$$\Delta P > 0 \text{ y } \Delta V > 0.$$



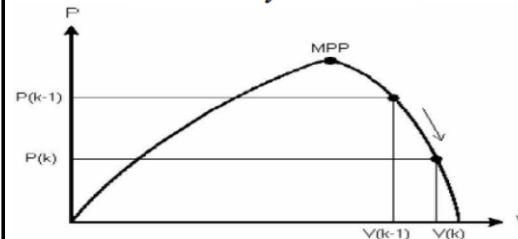
Aumenta Tensión

$$\Delta P > 0 \text{ y } \Delta V < 0$$



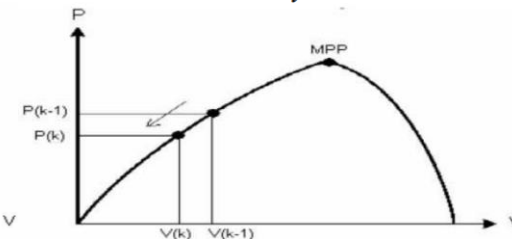
Disminuye Tensión

$$\Delta P < 0 \text{ y } \Delta V > 0$$



Disminuye Tensión

$$\Delta P < 0 \text{ y } \Delta V < 0$$



Aumenta Tensión



## Diseño del simulador del sistema fotovoltaico controlado

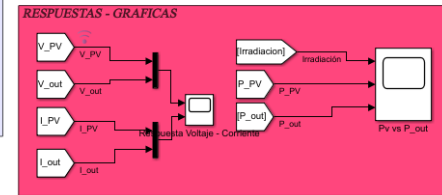
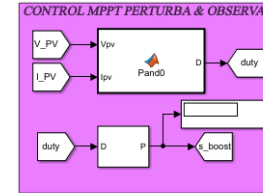
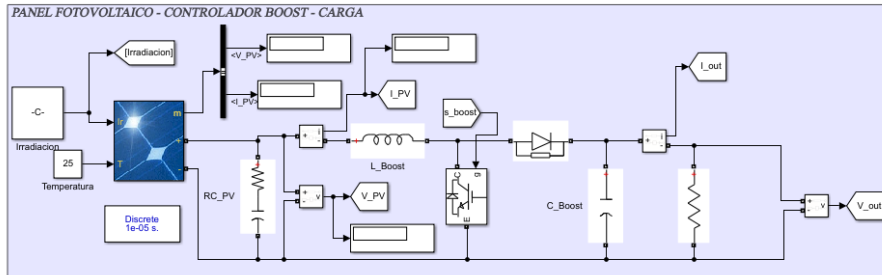


Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Automatización

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).

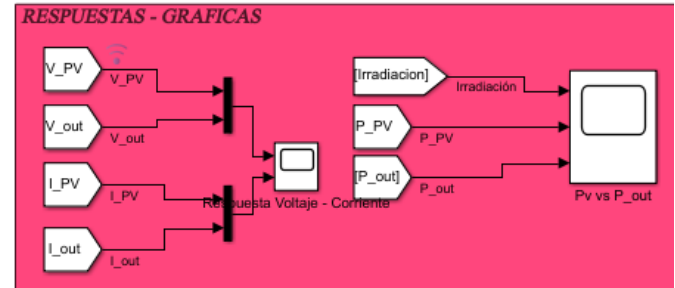
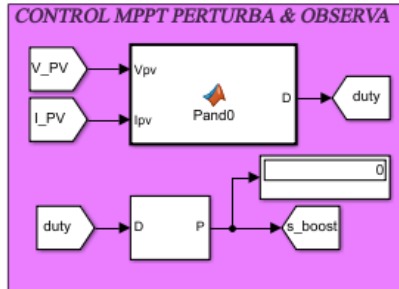
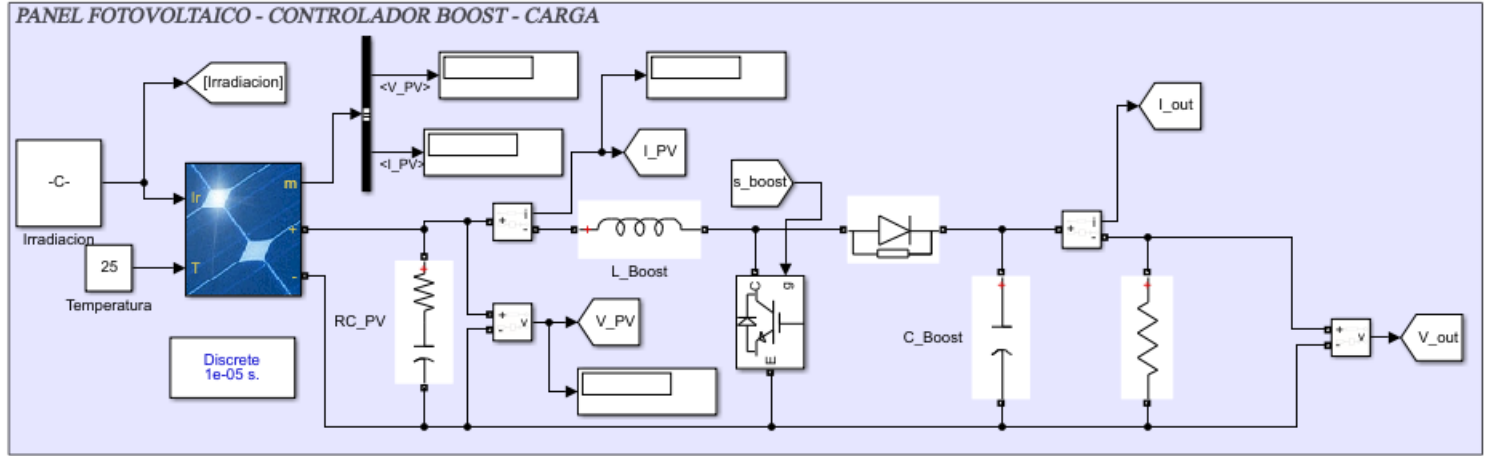
Elaborado: José Anibal Bucheli Campana



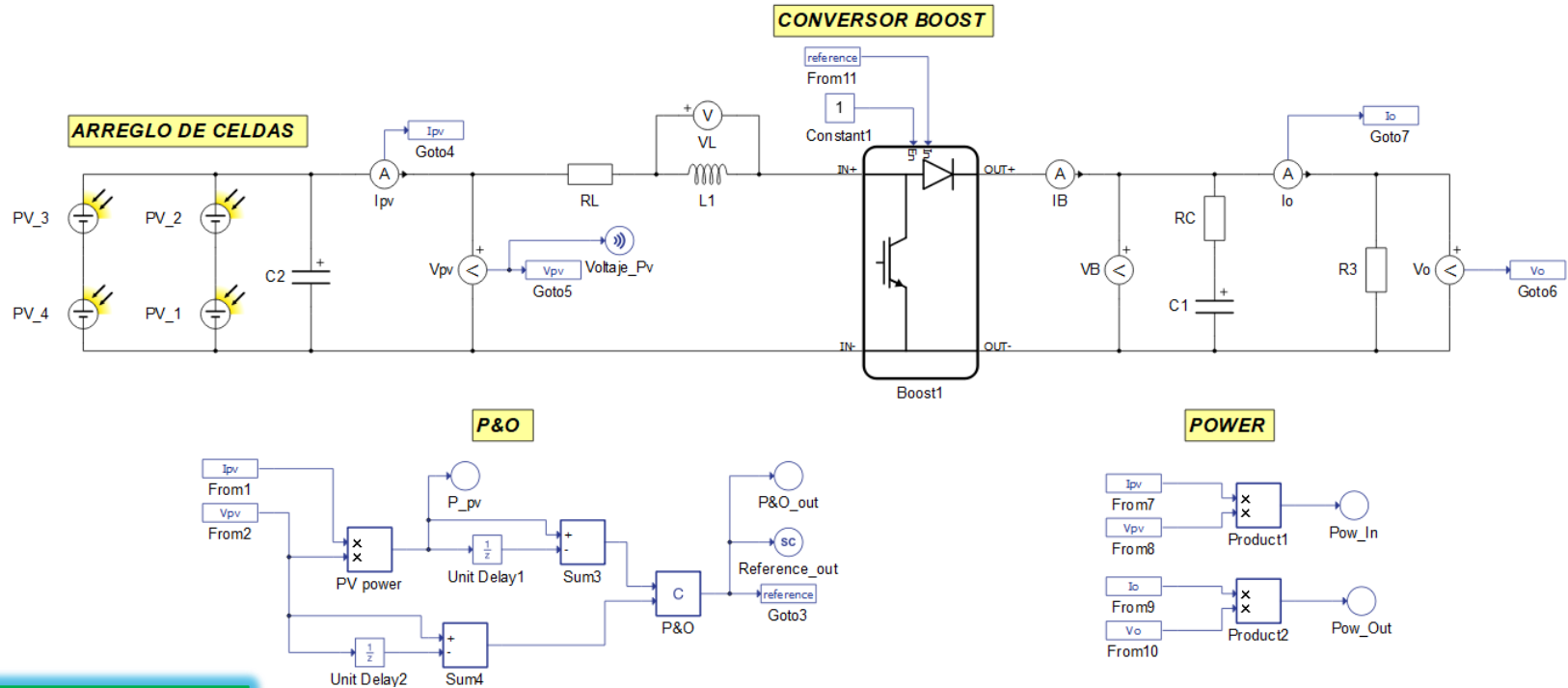
Simulado en Simulink



## Diseño del simulador del sistema fotovoltaico controlado



## Diseño del simulador del sistema fotovoltaico controlado en Typhoon



Simulado en Typhoon



## Diseño del simulador del sistema fotovoltaico controlado en Typhoon

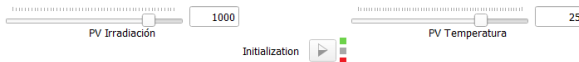
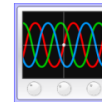
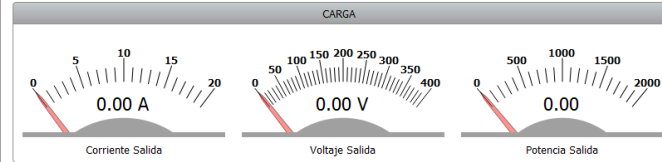
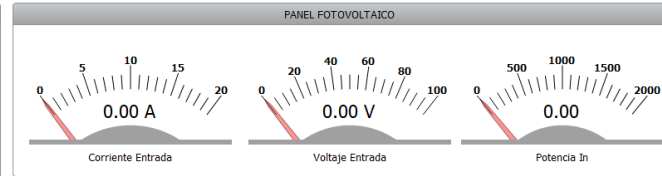
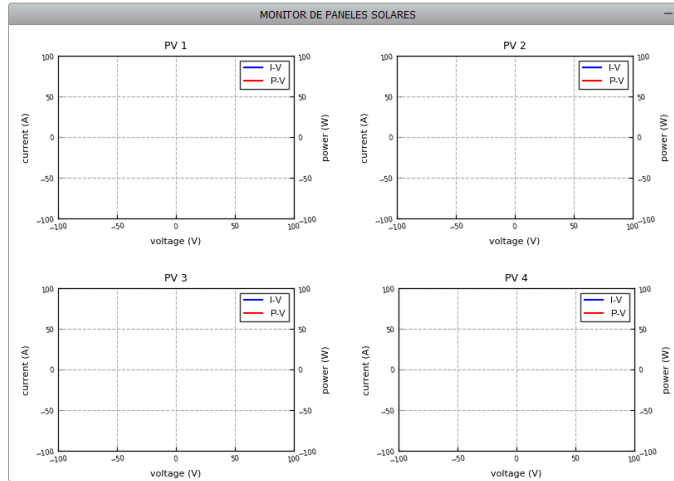


Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Automatización

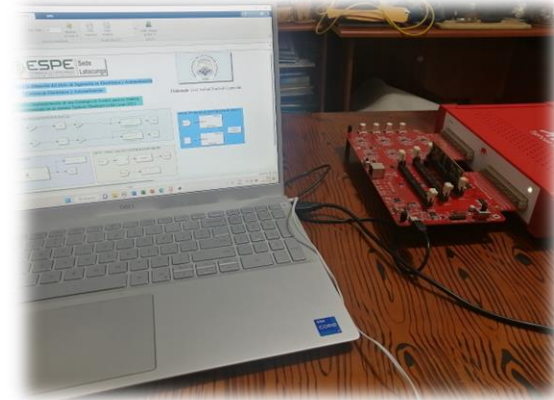
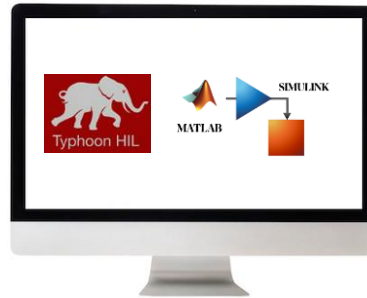
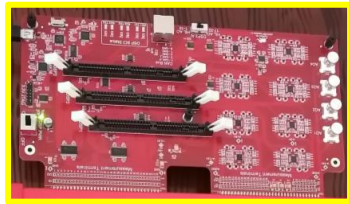
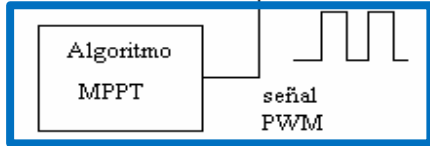
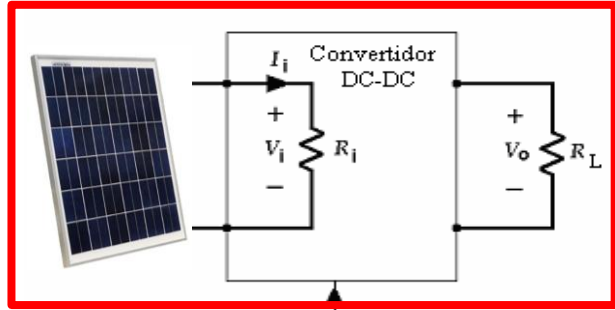
Diseño, Simulación e Implementación de una Estrategia de Control para un Sistema Fotovoltaico Implementado en un sistema

Carrera en Electrónica y Automatización

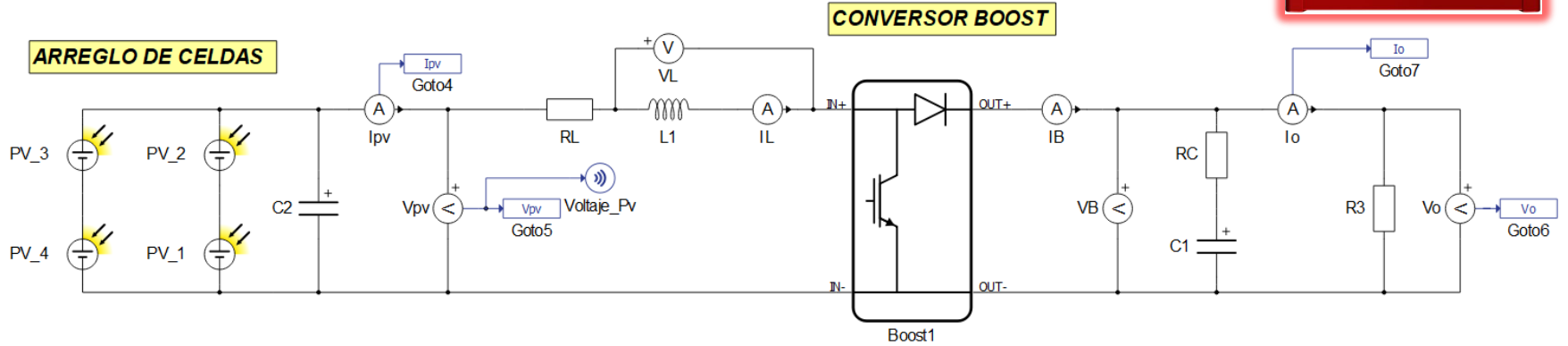
Autor: José Anibal Bucheli Campaña



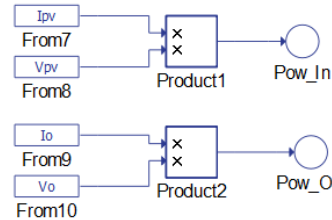
## Implementación del sistema fotovoltaico controlado en Typhoon HIL



## Implementación en Sistema Typhoon HIL



### POWER



Implementado en Typhoon



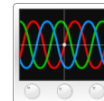
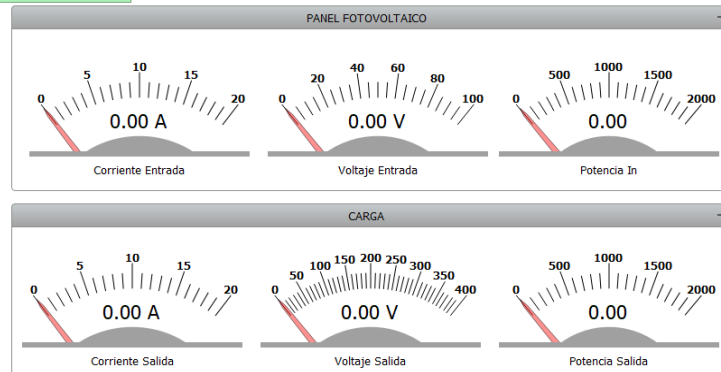
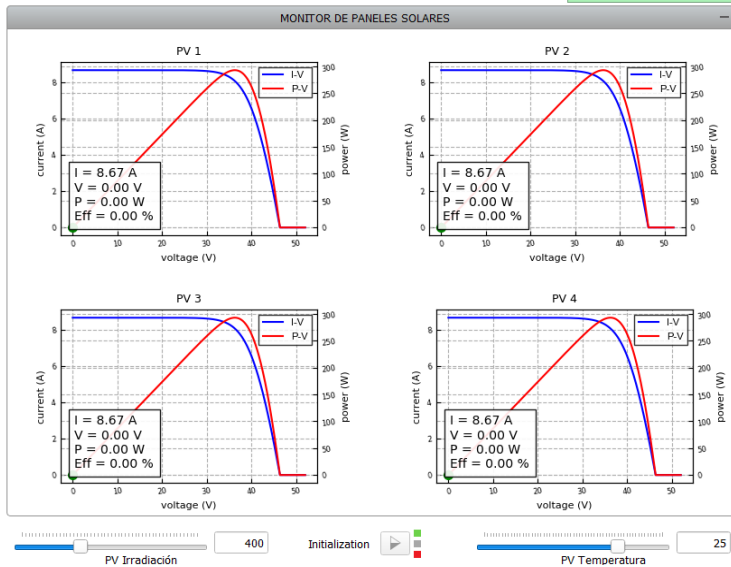


Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Automatización

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



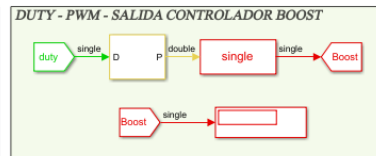
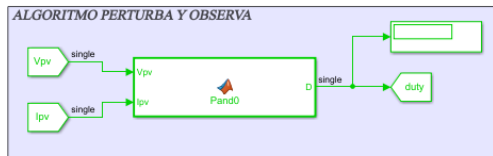
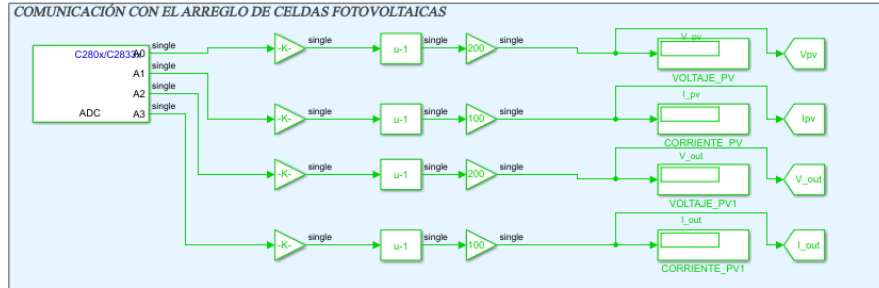
## Implementación del Algoritmo de Control en la DSP



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

Carrera en Electrónica y Automatización

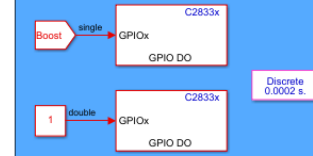
Diseño, Simulación e Implementación de una Estrategia de Control para un Sistema Fotovoltaico Implementado en un sistema Typhoon Hardware in the Loop (HIL).



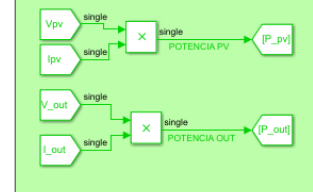
Elaborado: José Anibal Bucheli Campaña



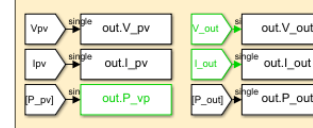
ENVIO DE DATOS AL CONTROLADOR BOOST



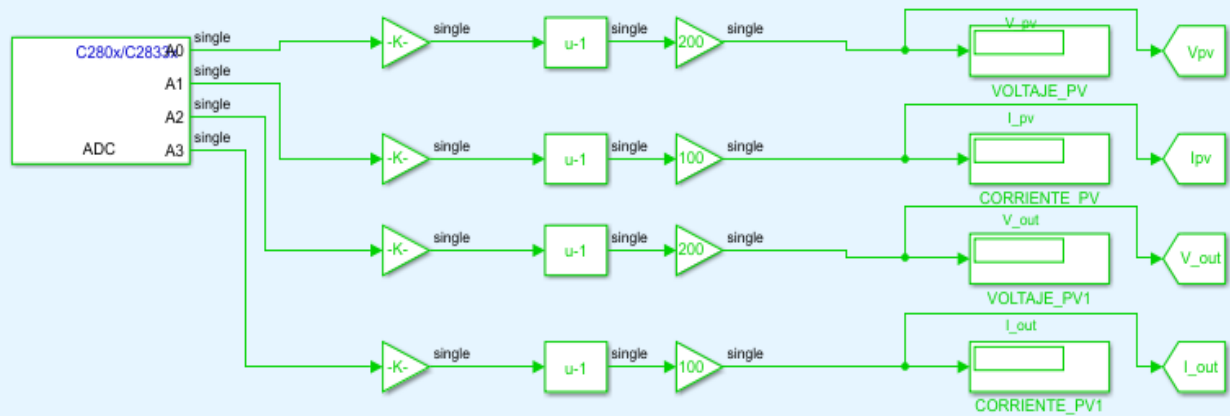
Calculo de Potencia



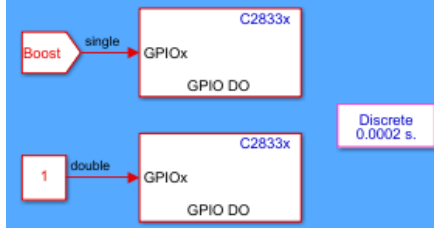
ENVIO DE DATOS AL WORKSPACE



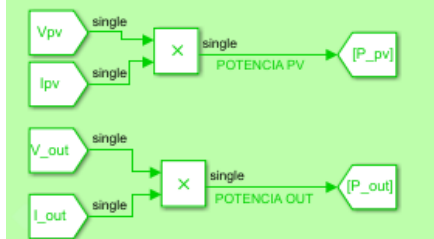
## COMUNICACIÓN CON EL ARREGLO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS



## ENVIO DE DATOS AL CONTROLADOR BOOST



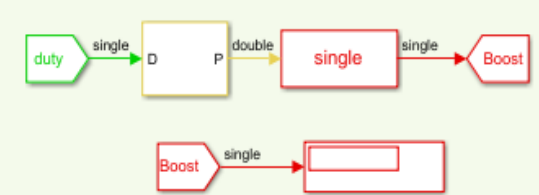
## Calculo de Potencia



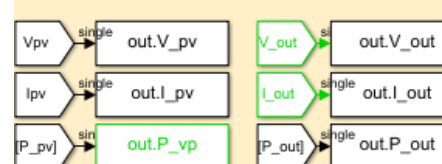
## ALGORITMO PERTURBA Y OBSERVA



## DUTY - PWM - SALIDA CONTROLADOR BOOST



## ENVIO DE DATOS AL WORKSPACE

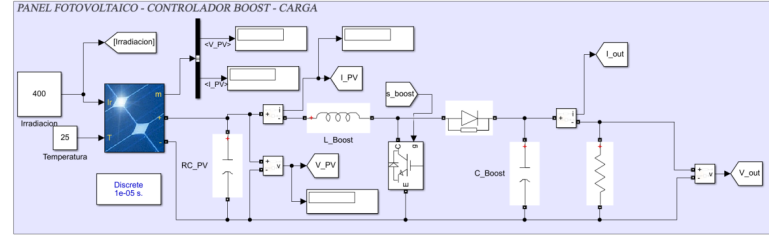


Implementado en DSP

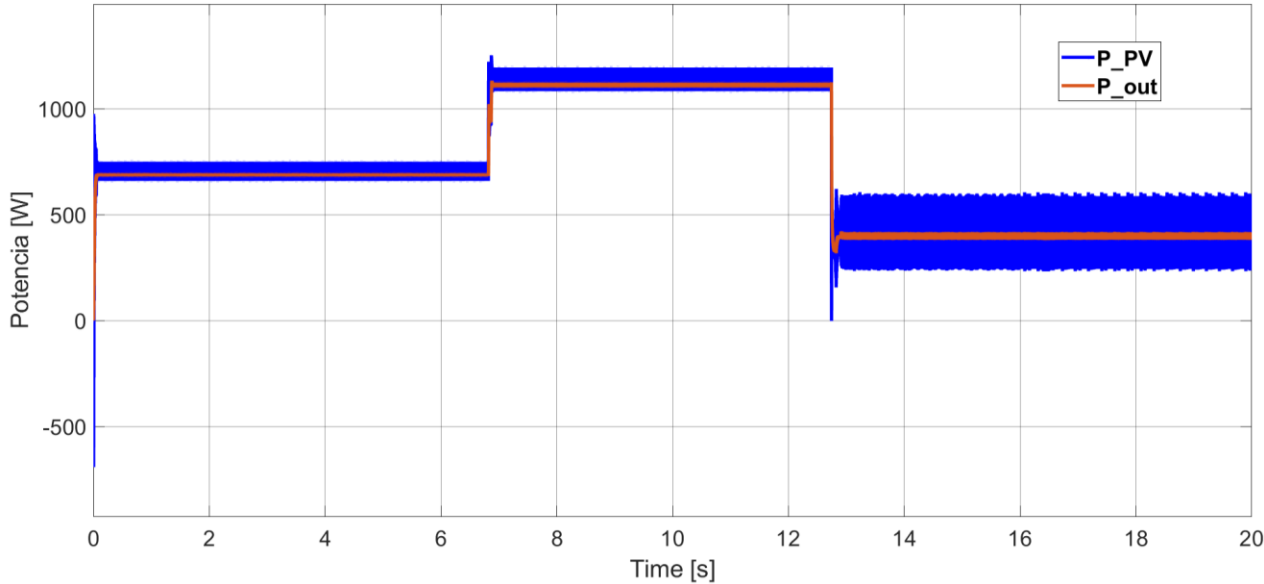




## Resultado simulado del desempeño del sistema

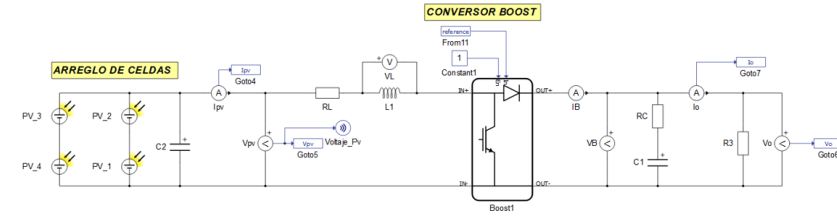


Potencia Del Panel Solar Vs Potencia en la Carga

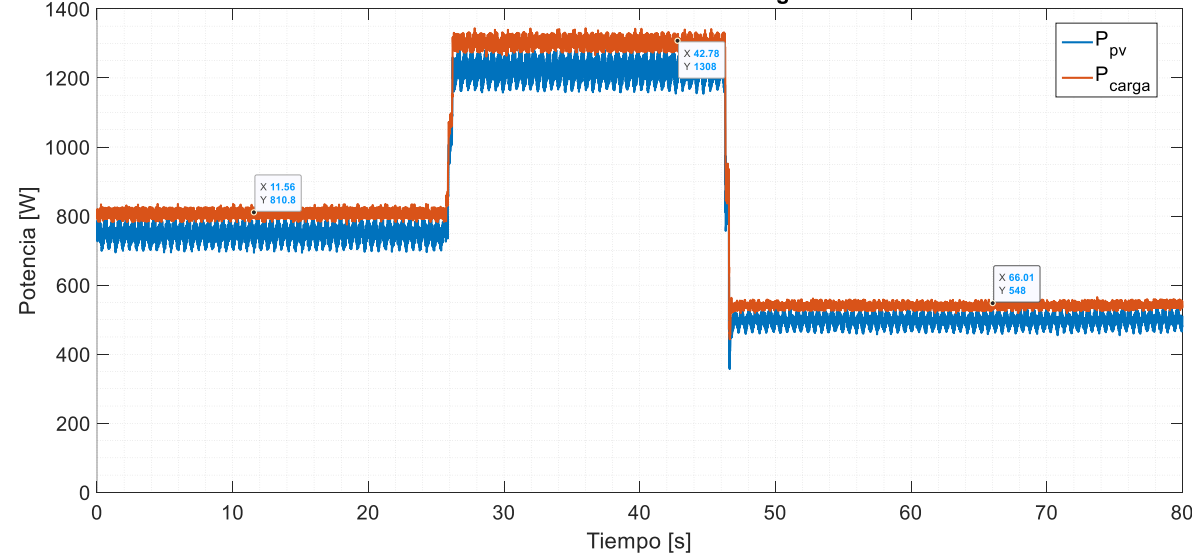


IRRADIACIÓN	POTENCIA IDEAL	POTENCIA REAL
1000 $\frac{W}{m^2}$	1100 [W]	1170 [W]
600 $\frac{W}{m^2}$	700 [W]	750 [W]
400 $\frac{W}{m^2}$	480 [W]	410 [W]

## Resultado simulado en Typhoon del desempeño del sistema

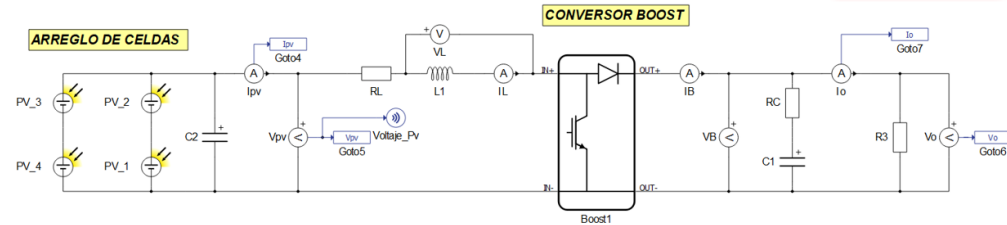


Potencia PV vs Potencia Cargar

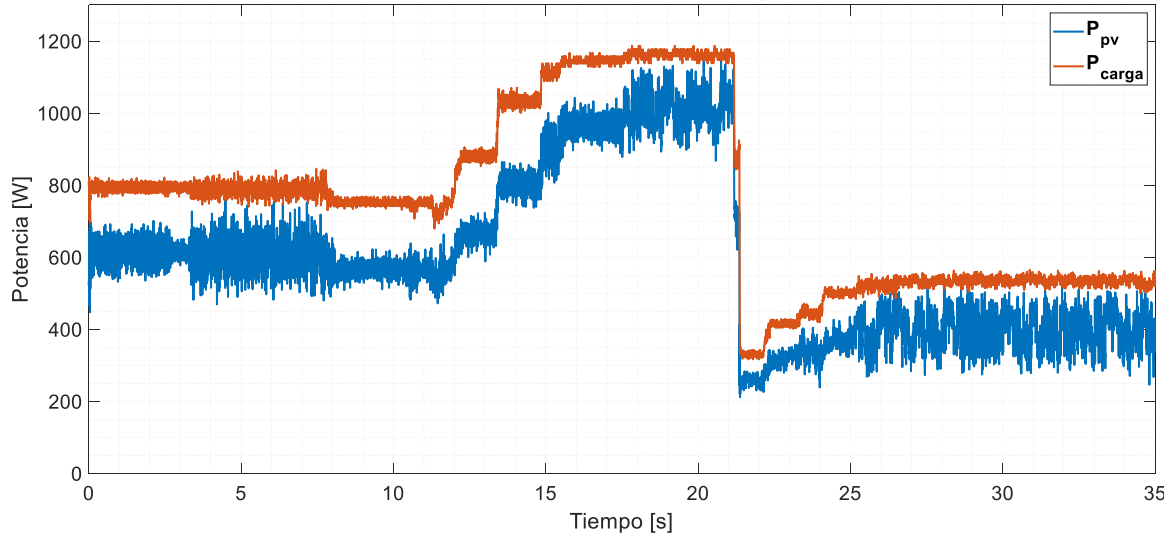


IRRADIACIÓN	POTENCIA IDEAL	POTENCIA REAL
1000 $\frac{W}{m^2}$	1100 [W]	1300 [W]
600 $\frac{W}{m^2}$	700 [W]	810 [W]
400 $\frac{W}{m^2}$	480 [W]	539 [W]

## Resultado experimental en Typhoon HIL del desempeño del sistema



Potencia PV vs Potencia Cargar



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



## COMPARACIÓN POTENCIA IDEAL Y REAL

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]



- 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 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, 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 que puede ser aprovechada, por lo tanto, en trabajos futuros se agregara unidades de almacenamiento.



**Trabajos futuros que no se consideran como alcance u objetivos de este trabajo de integración curricular.**

- Integrar este proyecto al inversor DC/AC diseñado por el trabajo de integración curricular siguiente, para la publicación en la que se está trabajando.
- Diseñar técnicas de control avanzadas para el control del convertidor BOOST.
- Probar distintas topologías de conversores DC-DC, sea Buck o Buck-Boost.
- Integrar el sistema fotovoltaico a un sistema híbrido de energía incluyendo sistemas de almacenamiento.







**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**  
**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**

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

**Autor:**

Bucheli Campaña, José Aníbal

**Tutora:** Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario, Phd.



## Aportes

- Con este trabajo se identificó la eficiencia del algoritmo perturbado y observado, en implementación.
- Trabajos reportados evalúan sus propuestas por simulación, en este trabajo a través del sistema Typhoon HIL hemos podido obtener resultados realistas. Recalcando que este equipo es usado no solo en la academia sino a nivel industrial, para testeos previos de controles de convertidores.
- Disponer de un simulador de un Sistema Fotovoltaico, base para otros trabajos de investigación futuros, en donde se pueda cambiar la estrategia de control, es decir, probar con más técnicas de control para comparar y seleccionar la mejor técnica de control que entregue el mejor valor de máximo punto de potencia.
- Disponer de un sistema implementado en Typhoon HIL listo para realizar configuraciones de topologías y control.



## Aportes

- Dejar un precedente respecto al control de dispositivos de electrónica de potencia aplicados casos reales como son aplicaciones en unidades de generación basadas en recursos renovables.
- Una vez que estudiaron la programación la comunicación del sistema HIL, se generará una transferencia de conocimiento a quienes ejecuten trabajos de investigación futuros.



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

Block Parameters: ADC1

C280x/C2833x ADC (mask) (link)

Configures the ADC to output a constant stream of data collected from the ADC pins on the C280x/C2833x DSP.

ADC Control    Input Channels

Module: A

Conversion mode: Sequential

Start of conversion: Software

Sample time: 200e-6

Data type: single

Post interrupt at the end of conversion

OK    Cancel    Help    Apply

Block Parameters: ADC1

C280x/C2833x ADC (mask) (link)

Configures the ADC to output a constant stream of data collected from the ADC pins on the C280x/C2833x DSP.

ADC Control    Input Channels

Number of conversions: 4

Conversion no. 1: ADCINA0

Conversion no. 2: ADCINA1

Conversion no. 3: ADCINA2

Conversion no. 4: ADCINA3

Use multiple output ports

OK    Cancel    Help    Apply

a)

Block Parameters: Digital Output1

C2833x GPIO Digital Output (mask) (link)

Configures GPIO outputs for the specified pins.

In regular mode a value of True at the input of the block will pull the GPIO pin high. A value of False will ground the pin.

In toggle mode, a value of True at the input of the block will switch the actual output level of the GPIO pin. A value of False has no effect on the output level of the GPIO pin.

Parameters

GPIO Group: GPIO0~GPIO7

GPIO0

Toggle GPIO0

GPIO1

GPIO2

GPIO3

GPIO4

GPIO5

GPIO6

GPIO7

OK    Cancel    Help    Apply

Block Parameters: Digital Output2

C2833x GPIO Digital Output (mask) (link)

Configures GPIO outputs for the specified pins.

In regular mode a value of True at the input of the block will pull the GPIO pin high. A value of False will ground the pin.

In toggle mode, a value of True at the input of the block will switch the actual output level of the GPIO pin. A value of False has no effect on the output level of the GPIO pin.

Parameters

GPIO Group: GPIO0~GPIO7

GPIO0

GPIO1

GPIO2

GPIO3

GPIO4

Toggle GPIO4

GPIO5

GPIO6

GPIO7

OK    Cancel    Help    Apply

b)

Analog Outputs Settings for HIL 0

Show All channels

Output	Signal	Scaling	Offset (Vdac)	Lower/Upper Limit (Vdac)	Lock
AO1	Vpv	40.0 V per 1 Vdac	0.0	0.0 0.0	<input type="checkbox"/>
AO2	Ipv	20.0 A per 1 Vdac	0.0	-10.0 10.0	<input type="checkbox"/>
AO3	Vo	40.0 V per 1 Vdac	0.0	0.0 0.0	<input type="checkbox"/>
AO4	Io	20.0 A per 1 Vdac	0.0	-10.0 10.0	<input type="checkbox"/>

find component

- Model Controls
- PVs
- Switching Blocks
- Output Controls
  - Analog Outputs
    - HIL 0
  - Digital Outputs
    - HIL 0