



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

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

"Diseño e implementación de un algoritmo de control de un convertidor DC/AC en un sistema Typhoon HIL."

Autores:

Pilatasig Chicaiza Jessica Guadalupe
Ruiz Chacón David Isaac

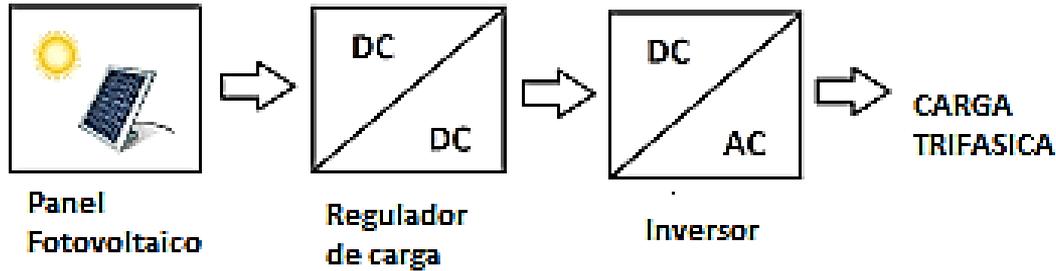
PhD. Llanos Proaño, Jaqueline del Rosario ,***Directora***



- 1 **Introducción**
- 2 **Descripción del Proyecto**
- 3 **Diseño e Implementación del Sistema**
- 4 **Resultados Experimentales**
- 5 **Conclusiones**
- 6 **Trabajos Futuros**

INTRODUCCIÓN.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



OBJETIVO GENERAL

- Diseñar, validar e implementar un **controlador aplicado al inversor DC/AC** para un sistema de generación de energía fotovoltaica.



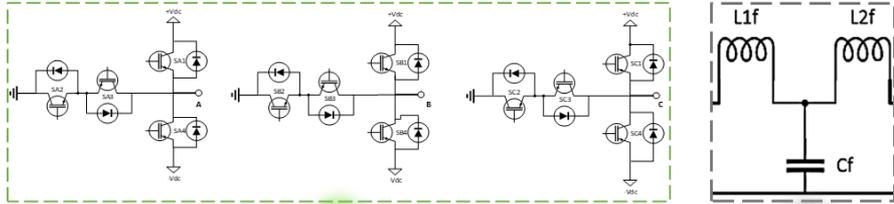
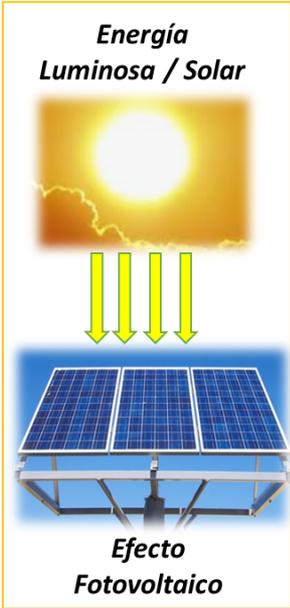
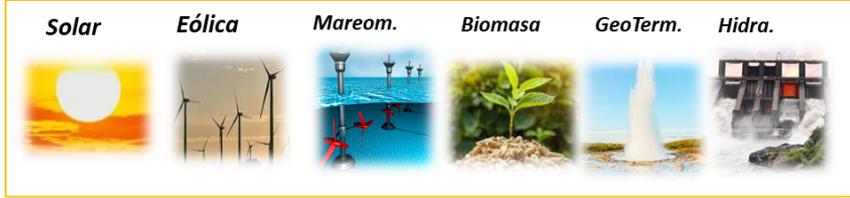
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y validar por simulación un controlador PI para un inversor DC/AC de dos niveles y tres niveles NPC Trifásico.
- Comparar el desempeño por simulación de los controladores para los inversores de dos y tres niveles NPC trifásico.
- Implementar la interfaz de electrónica de potencia (inversor DC/AC) en Typhoon Hardware-in-the-Loop.
- Implementar los controladores para los inversores de dos y tres niveles en la tarjeta DSP.
- Validar y comparar experimentalmente el funcionamiento de los controladores aplicados a la interfaz de electrónica de potencia (inversor DC/AC) en el Typhoon HIL desde la tarjeta DSP.

- 1 **Introducción**
- 2 **Descripción del Proyecto**
- 3 **Diseño e Implementación del Sistema**
- 4 **Resultados Experimentales**
- 5 **Conclusiones**
- 6 **Trabajos Futuros**

Energías Renovables.

Son un tipo de energías derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse



Entrega de Energía del panel en Tensión DC [V]

Inversor Trifásico DC/AC

v_a
 v_b
 v_c

FILTRO LCL



Señal de activación
 $S_{An}, \dots, S_{Bn}, \dots, S_{Cn}$

v^* → **Control PI Coordenadas dq**

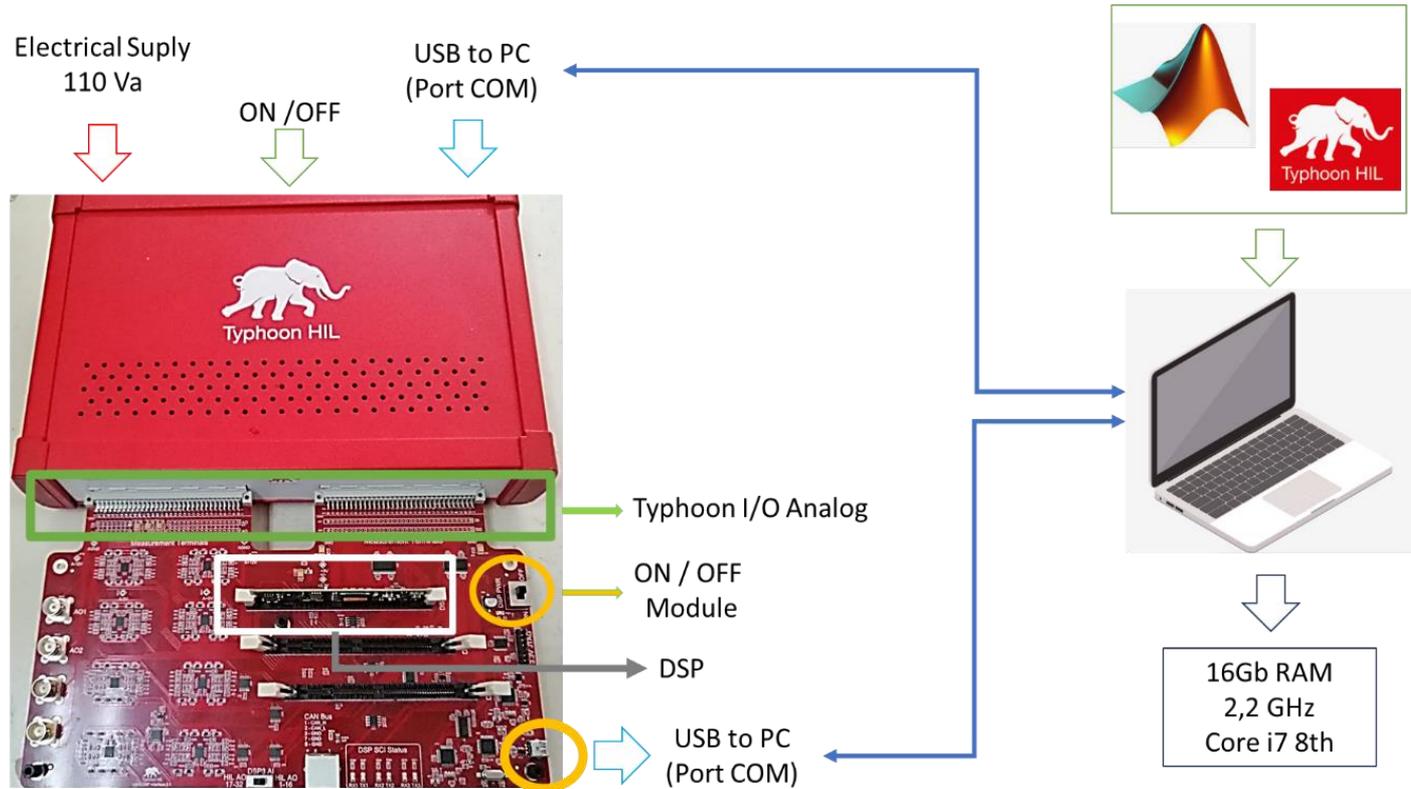
PLL

v_{oa}
 v_{ob}
 v_{oc}

"Perturbación"

RL	R	{	$i_{abc} \neq 0$ [A]
			$\therefore P > 0$ [W]
V	vacío	{	$i_{abc} \approx 0$ [A]
			$\therefore P \rightarrow 0$ [W]

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO



- 1 **Introducción**
- 2 **Propuesta del Proyecto**
- 3 **Diseño e Implementación del Sistema**
- 4 **Resultados Experimentales**
- 5 **Conclusiones**
- 6 **Trabajos Futuros**

DISEÑO DEL FILTRO LCL

Valores de diseño para filtro LCL			
Descripción	Valor	Descripción	Valor
Valor de tensión de alimentación de entrada del circuito	$V_{dc} = 400V$	Valor de alimentación de la carga	$V_{load} = 110V_{rms}$
Potencia aparente aproximada	$S = 9\text{ kVA}$	Frecuencia de trabajo de carga	$f_{grid} = 50\text{ Hz}$
Frecuencia de conmutación	$f_{sw} = 15\text{ kHz}$	Valor de rizado de corriente permitido	$I_{ripple} = 20\%$

$$L_{f1} = \frac{V_{dc}}{4 \cdot f_{sw} \cdot \Delta I_{picoMAX}}$$

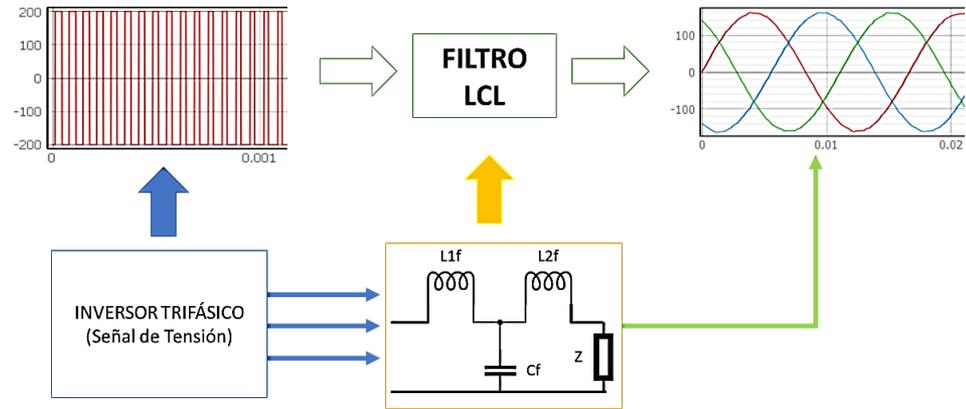
$$Q = \frac{V_{pico}^2}{1} = (5\%) \text{ de } S \text{ [VA]}$$

$$\frac{1}{2\pi f_{grid} C_f}$$

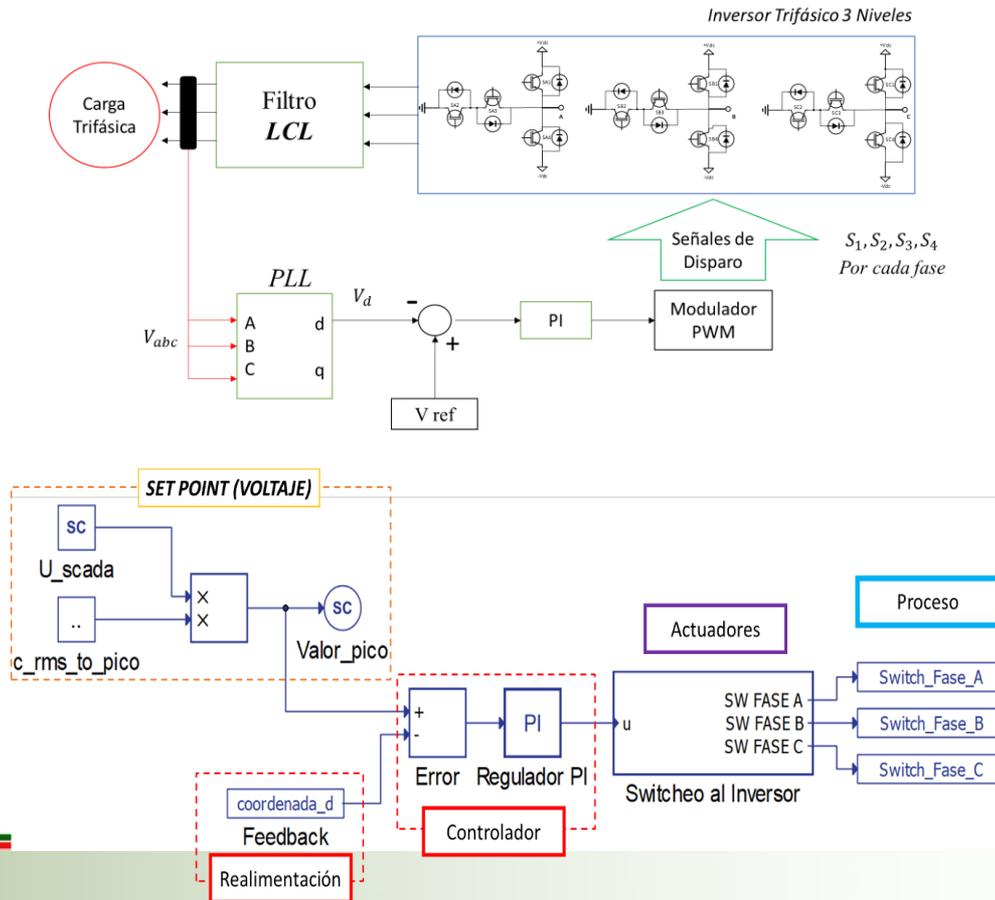
$$V_{L1+L2} = I \cdot X_{L1+L2} = I * 2\pi f (L_{f1} + L_{f2}) = (10\%) V_{nom(L1+L2)}$$

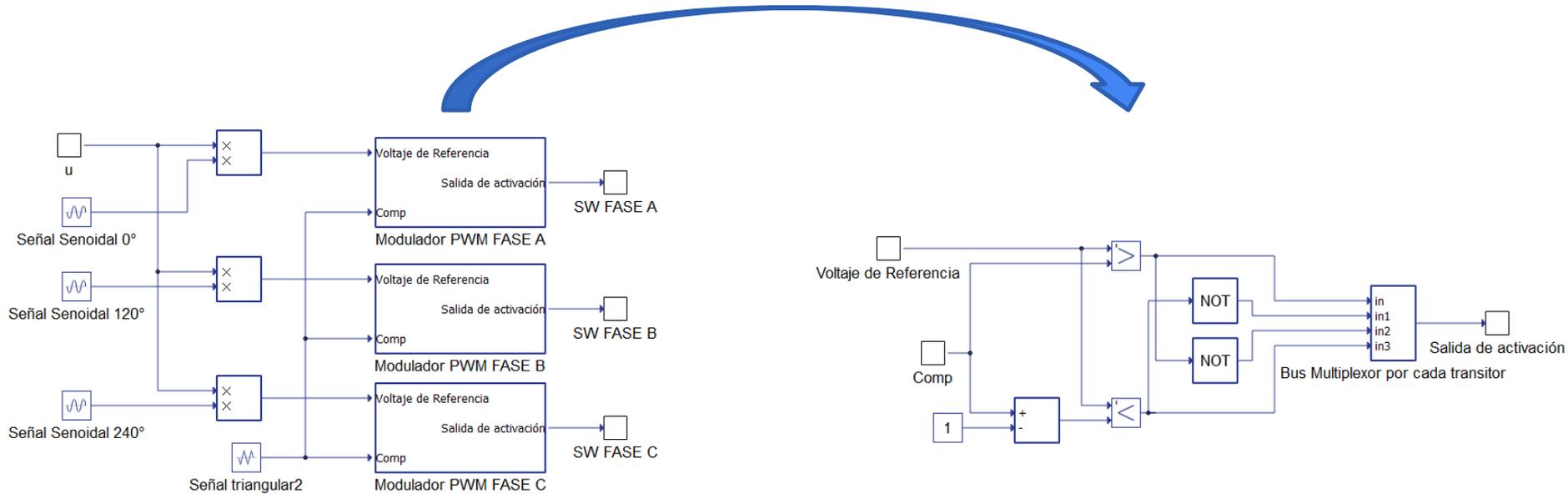
Filtro LCL

$$L_{f1} = 2.71\text{ mH} \quad C_f = 10.96\text{ }\mu\text{F} \quad L_{f2} = 0.49\text{ mH}$$

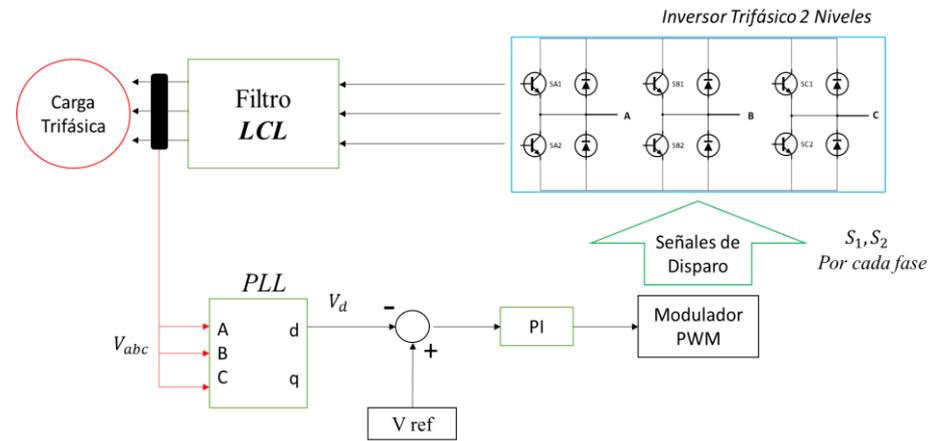
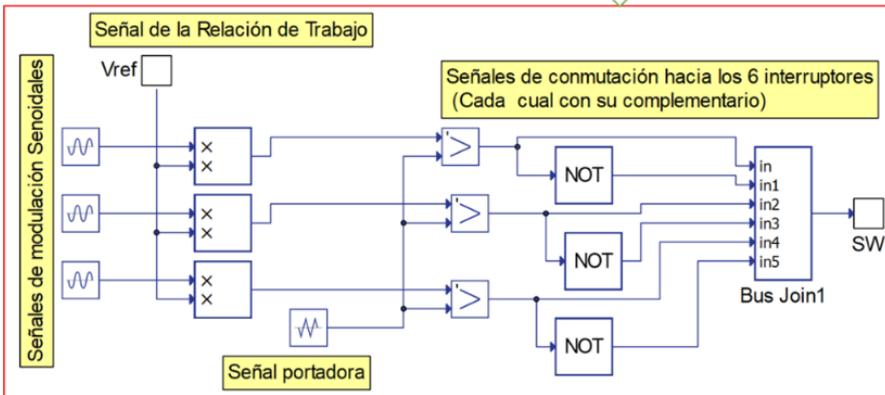
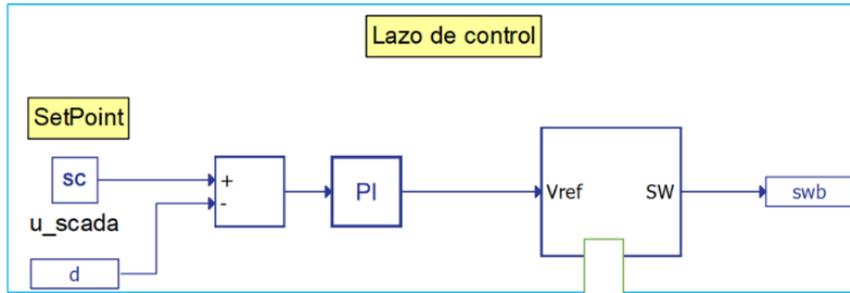


DISEÑO DEL CONTROLADOR PI INVERSOR DC/AC TRES NIVELES

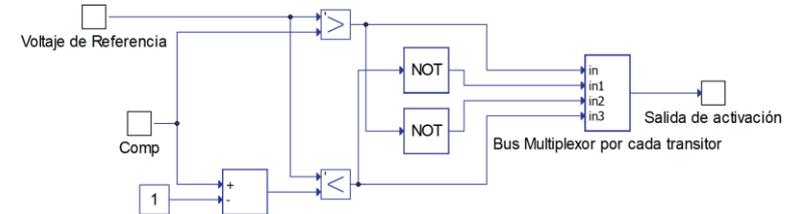
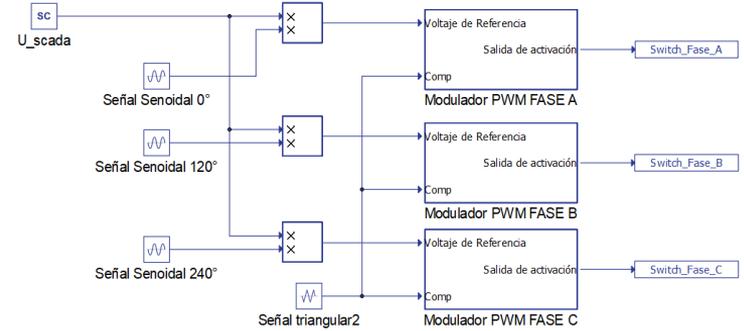
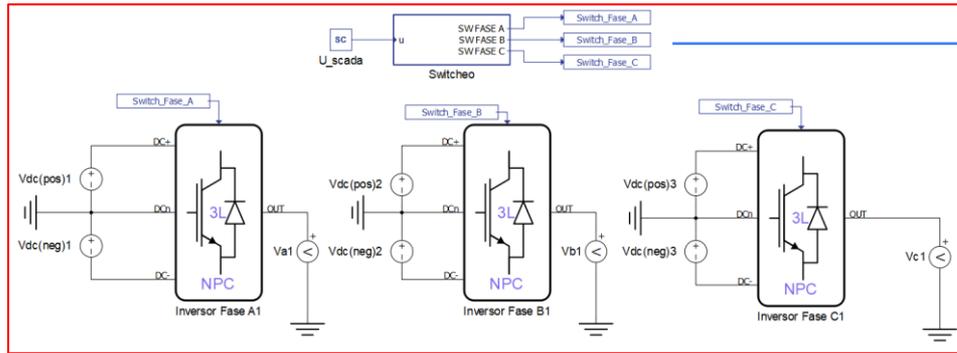
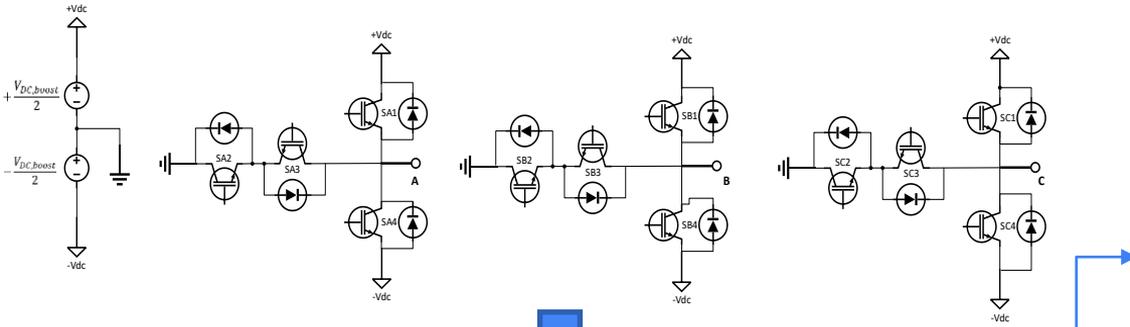




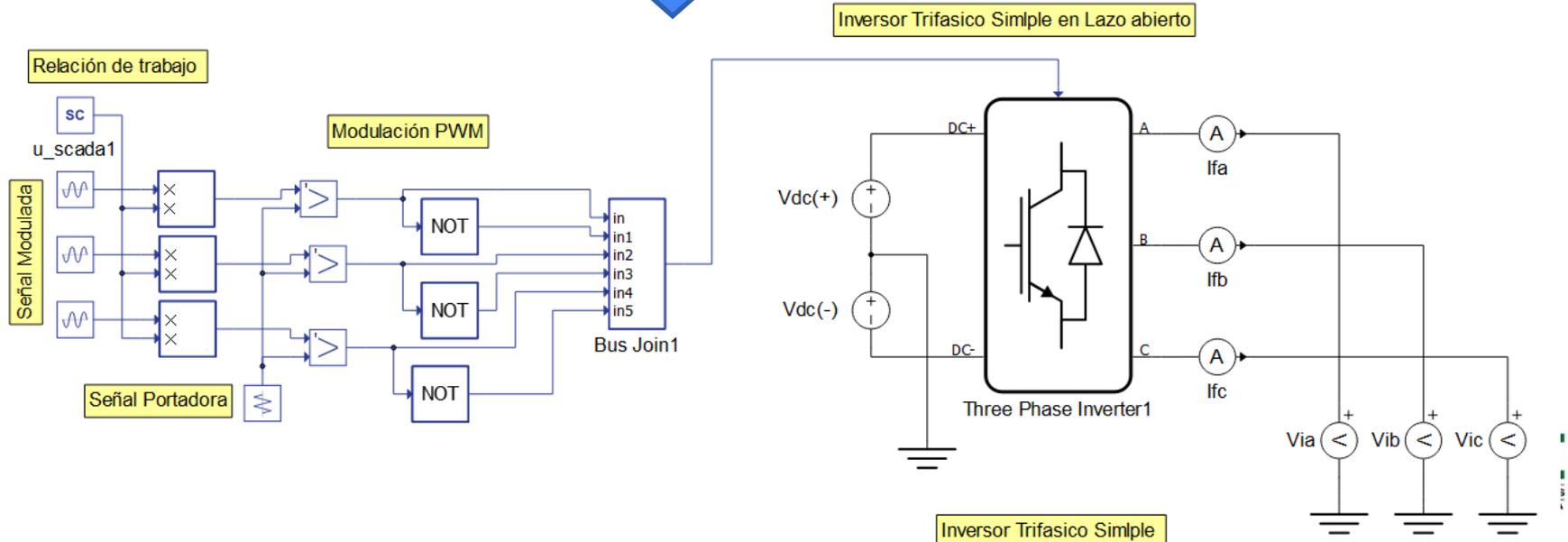
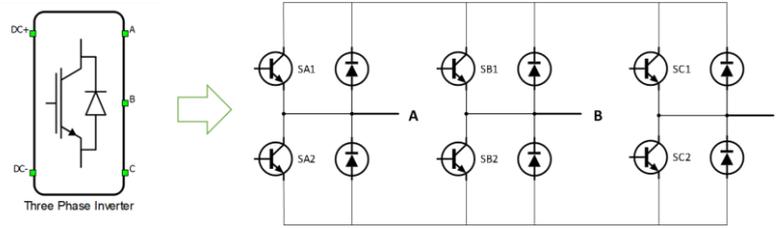
DISEÑO DEL CONTROLADOR PI INVERSOR DC/AC DOS NIVELES



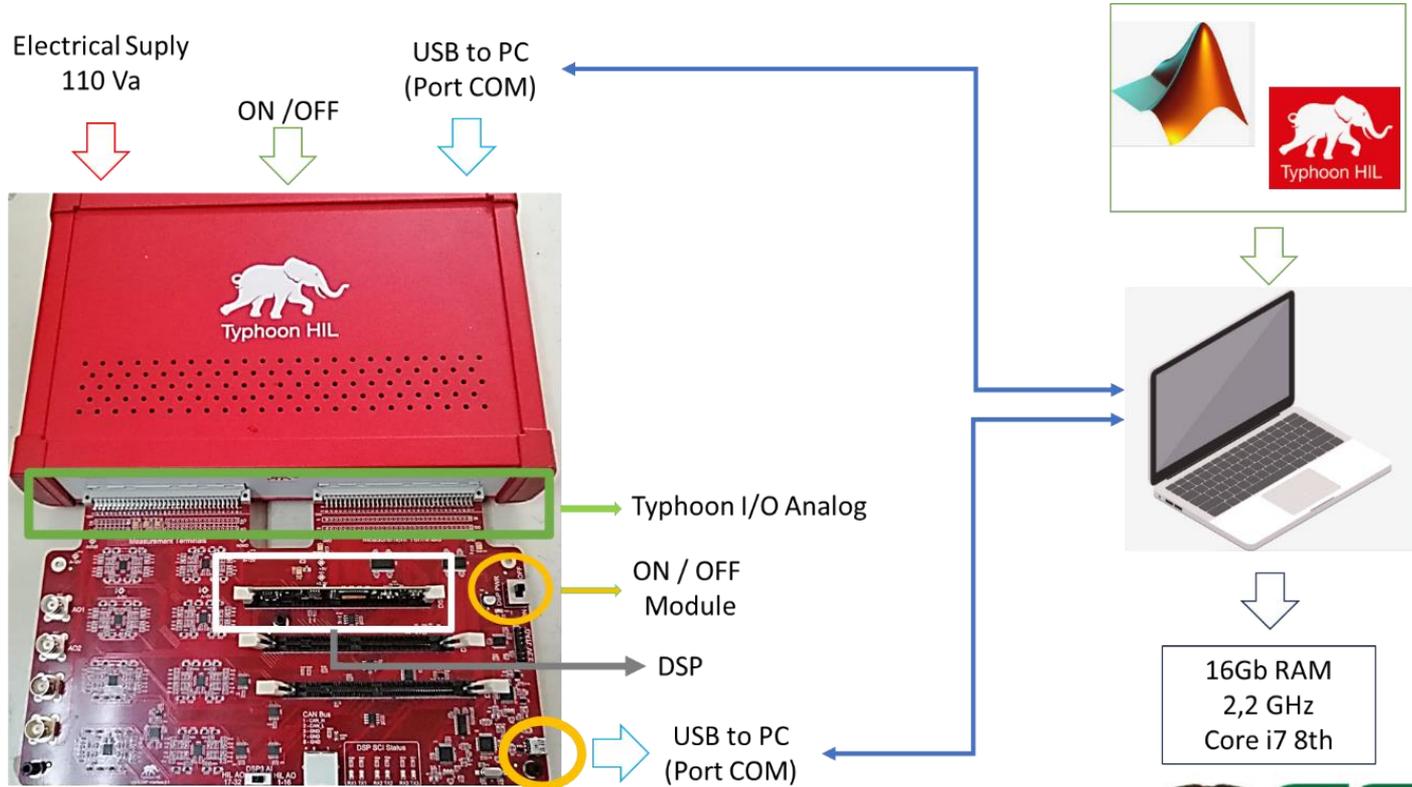
DISEÑO DEL SIMULADOR DEL INVERSOR DC/AC TRES NIVELES TIPO NPC



DISEÑO DEL SIMULADOR DEL INVERSOR DC/AC DOS NIVELES



ESQUEMA GENERAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA



Component (Inversor Fase A) properties

NPC Leg from library 'core'

Switches and diodes are modeled as ideal switches. There are three options for controlling the switches, through digital inputs, using an internal modulator or through model control signals.

weight = 1

General Timing Advanced Extras

Control: Digital input per switch

S1: 32 S1_logic: active high

S2: 25 S2_logic: active high

S3: 26 S3_logic: active high

S4: 31 S4_logic: active high

all high

Gate control enabling:

Sen: 13 Sen_logic: active high

DTV detection:

Help OK Cancel

Component (Inversor Fase B) properties

NPC Leg from library 'core'

Switches and diodes are modeled as ideal switches. There are three options for controlling the switches, through digital inputs, using an internal modulator or through model control signals.

weight = 1

General Timing Advanced Extras

Control: Digital input per switch

S1: 30 S1_logic: active high

S2: 23 S2_logic: active high

S3: 24 S3_logic: active high

S4: 29 S4_logic: active high

all high

Gate control enabling:

Sen: 13 Sen_logic: active high

DTV detection:

Help OK Cancel

Component (Inversor Fase C) properties

NPC Leg from library 'core'

Switches and diodes are modeled as ideal switches. There are three options for controlling the switches, through digital inputs, using an internal modulator or through model control signals.

weight = 1

General Timing Advanced Extras

Control: Digital input per switch

S1: 28 S1_logic: active high

S2: 21 S2_logic: active high

S3: 22 S3_logic: active high

S4: 27 S4_logic: active high

all high

Gate control enabling:

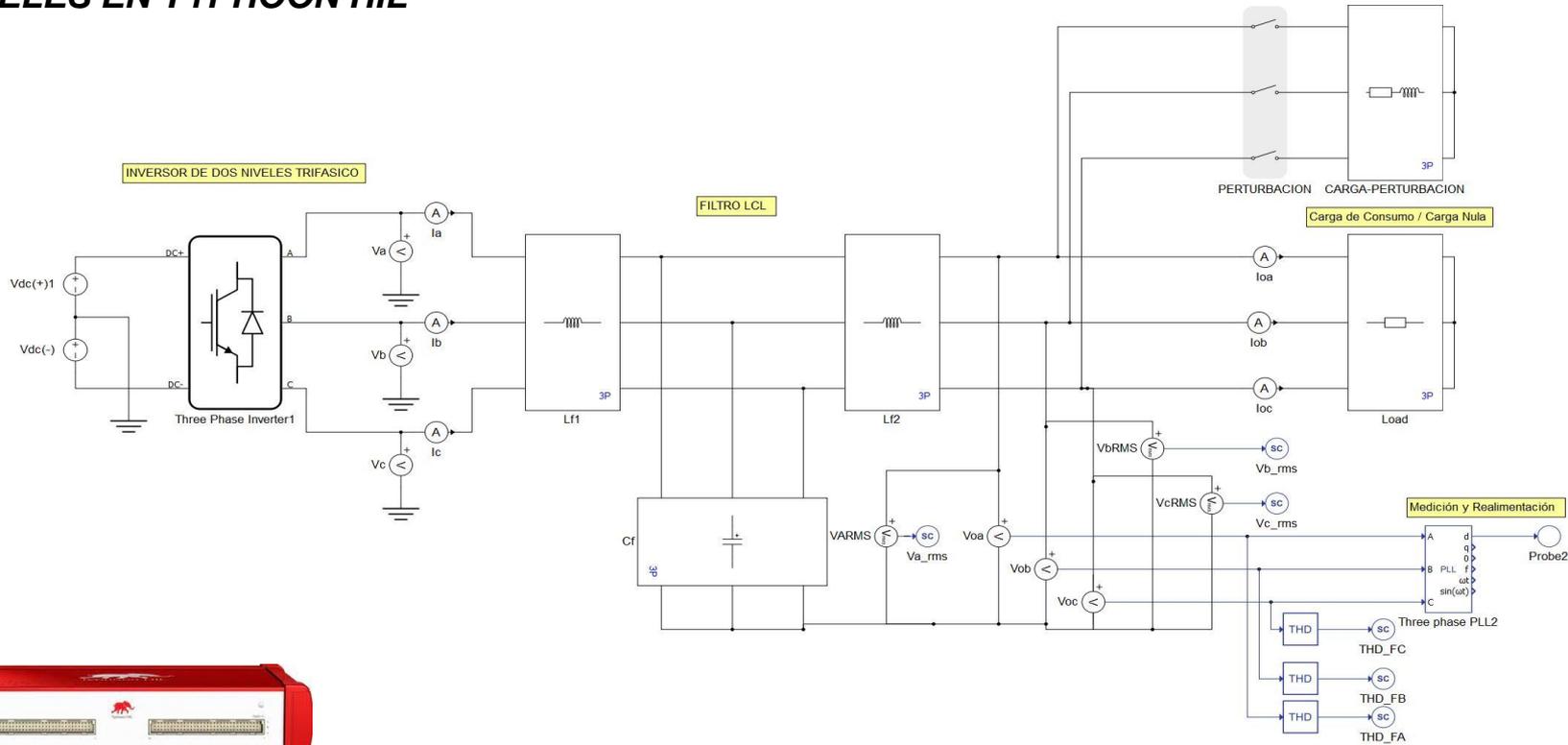
Sen: 13 Sen_logic: active high

DTV detection:

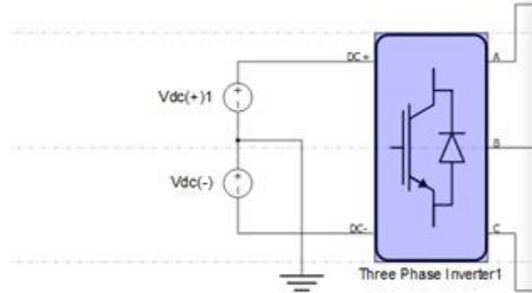
Help OK Cancel



IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA (INVERSOR DC/AC) DOS NIVELES EN TYPHOON HIL



INVERSOR DE DOS NIVELES TRIFASICO



Component (Three Phase Inverter1) properties

Three Phase Inverter from library 'core'

Switches and diodes are modeled as ideal switches.
There are three options for controlling the three phase inverter switches, through digital inputs, using an internal modulator or through model control signals.

weight = 3

General Measurements Timing Losses Advanced Extras

Control: Digital input per switch

Phase A S1:	32	Phase A S1_logic:	active high
Phase A S2:	32	Phase A S2_logic:	active low
Phase B S1:	31	Phase B S1_logic:	active high
Phase B S2:	31	Phase B S2_logic:	active low
Phase C S1:	30	Phase C S1_logic:	active high
Phase C S2:	30	Phase C S2_logic:	active low

all high

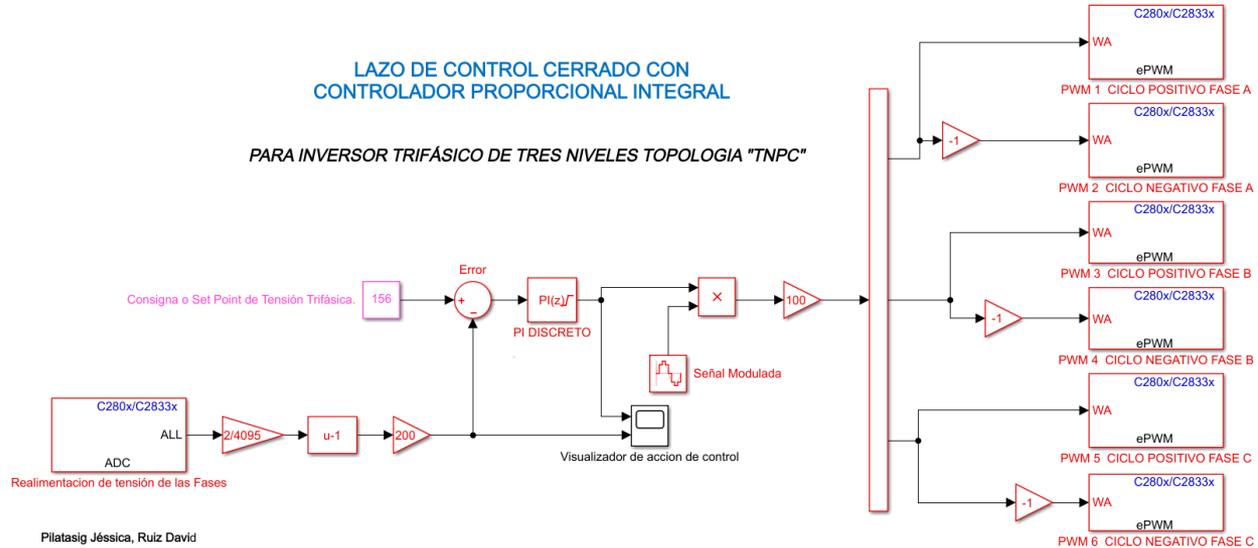
Switching enabled:

Sen: 13 Sen_logic: active high

Help OK Cancel



IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DEL INVERSOR DE TRES NIVELES TIPO NPC EN EL DSP

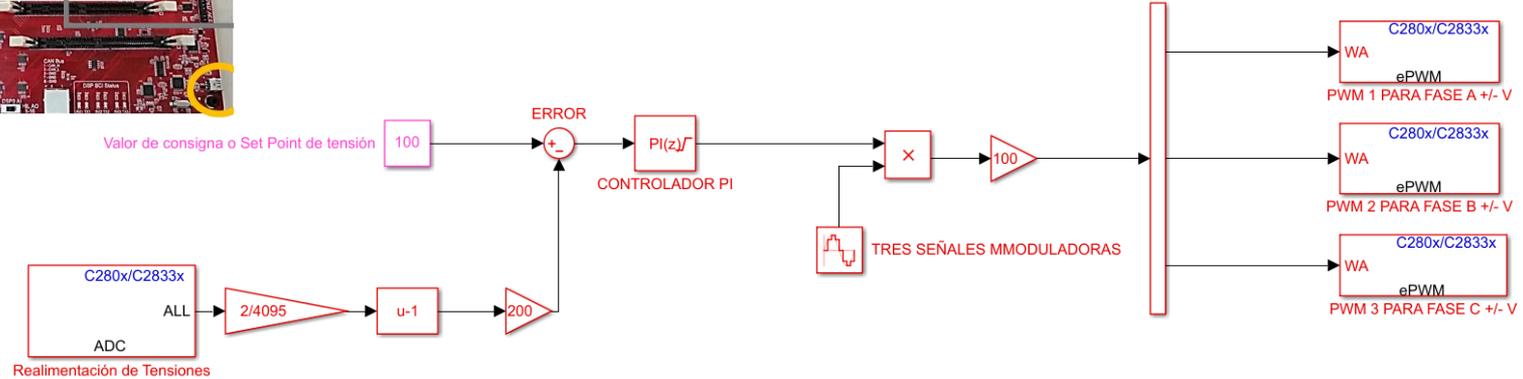


IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DEL INVERSOR DE DOS NIVELES EN EL DSP

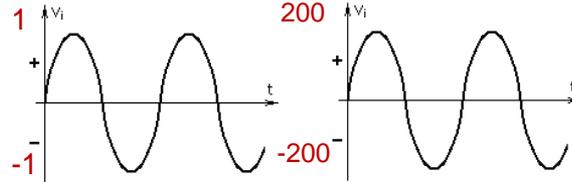
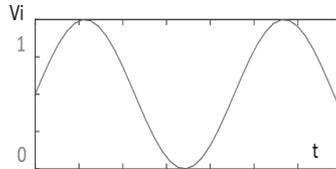
LAZO DE CONTROL CERRADO CON
CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL



PARA INVERSOR TRIFÁSICO DE DOS NIVELES TOPOLOGIA "half-bridge"



Pilatasig Jéssica, Ruiz David



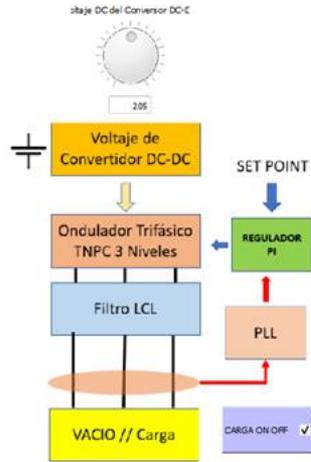
Analog Outputs Settings for HIL 0

Output	Signal	Scaling	Offset (Vdac)	Lower/Upper Limit (Vdac)	Lock
AO1	Probe1	40 units per 1 Vdac	0.0	-10.0 10.0	<input type="checkbox"/>
AO2	const_0V	100.0 V per 1 Vdac	0.0	0.0 0.0	<input type="checkbox"/>
AO3	const_0V	100.0 V per 1 Vdac	0.0	0.0 0.0	<input type="checkbox"/>



IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ DE MONITOREO DEL SISTEMA

SCADA HIL: Sistema de Control [PI] de un Inversor Trifásico tipo TNPC de 2 Niveles



Tensiones en la carga

154.77

Tension A

154.93

Tension B

154.94

Tension C

Error de control [V]

0.55

Error Fa [Volt]

0.43

Error Fb [Volt]

0.42

Error Fc [Volt]

THD [%]

0.87

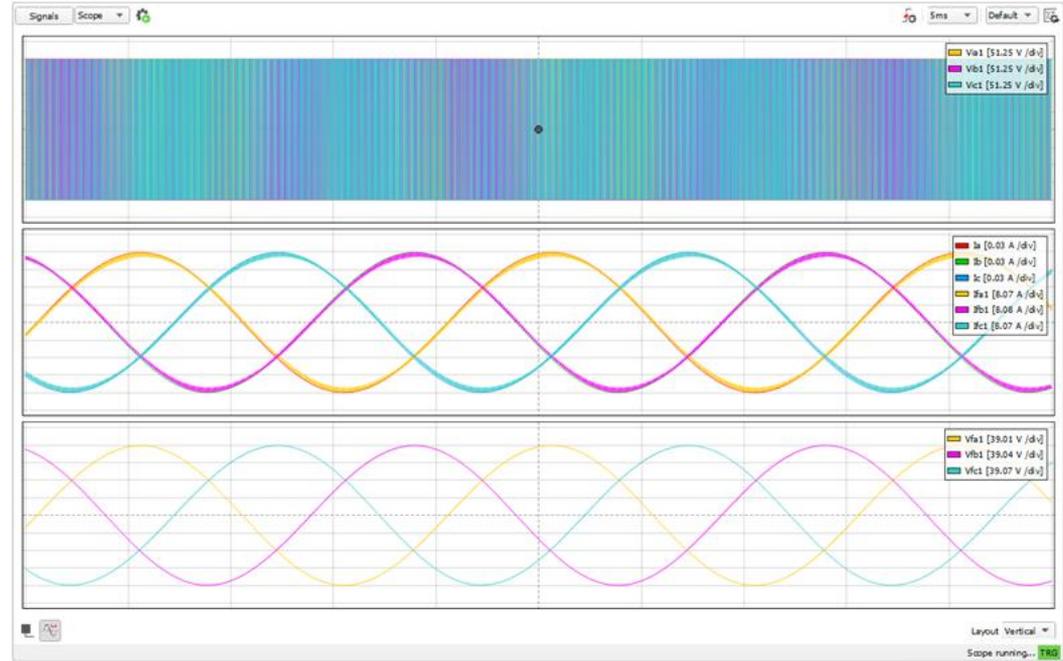
Fase A

0.83

Fase B

0.82

Fase C



- 1 **Introducción**
- 2 **Propuesta del Proyecto**
- 3 **Diseño e Implementación de Sistema**
- 4 **Resultados Experimentales**
- 5 **Conclusiones**
- 6 **Trabajos futuros**



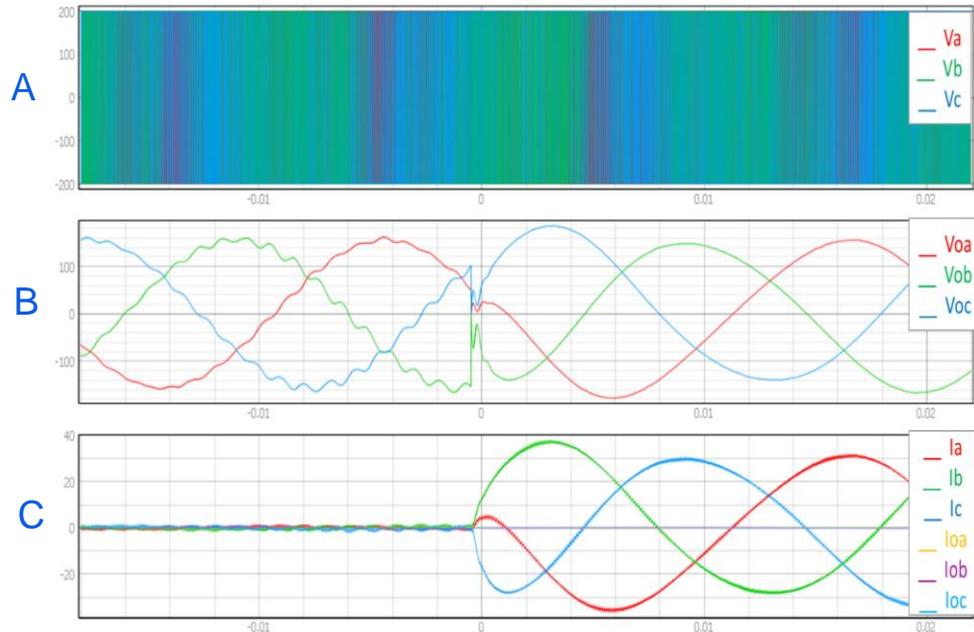
PARAMETROS DE DISEÑO INVERSOR DE DOS Y TRES NIVELES.

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación	400 V
Carga en vacío	1000 ohmios
Carga resistiva	5 ohmios
Carga inductiva	0.06mH
Set point	156 V
Frecuencia nominal AC	50 Hz
Frecuencia de PWM	15 KHz
Periodo de muestreo	100e-6 s
Constante de sintonía PI	$K_p = 0.01$ $K_i = 10$
Valores de filtro LCL	$L_{f1} = 2.71$ mH, $C_f = 10.96$ μ F $L_{f2} = 0.49$ mH

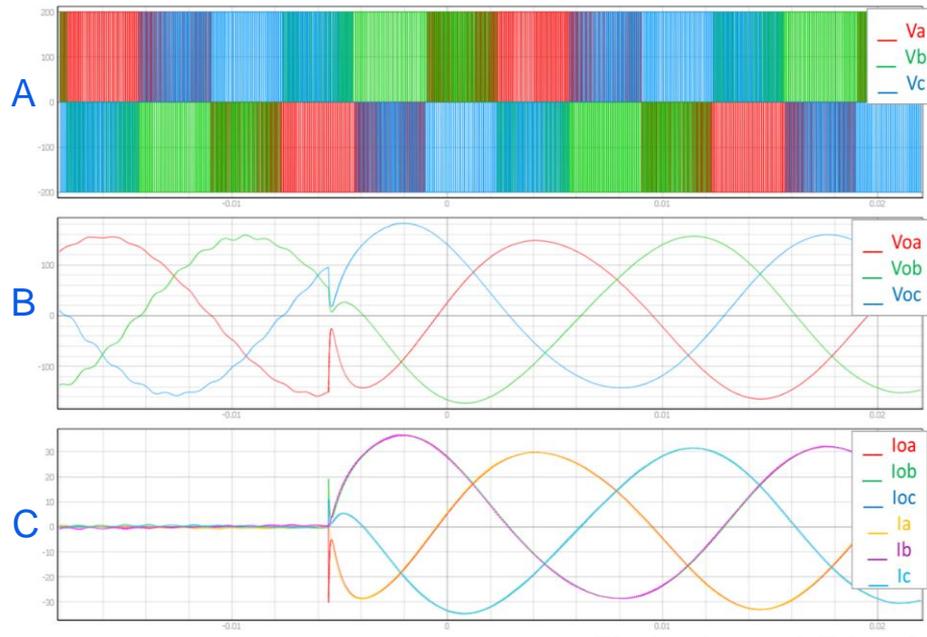


SIMULACIÓN: Control PI aplicado a inversores [2 Niveles v.s 3 Niveles] con carga Resistiva 5Ω

DOS NIVELES



TRES NIVELES



Eje horizontal: T [seg]

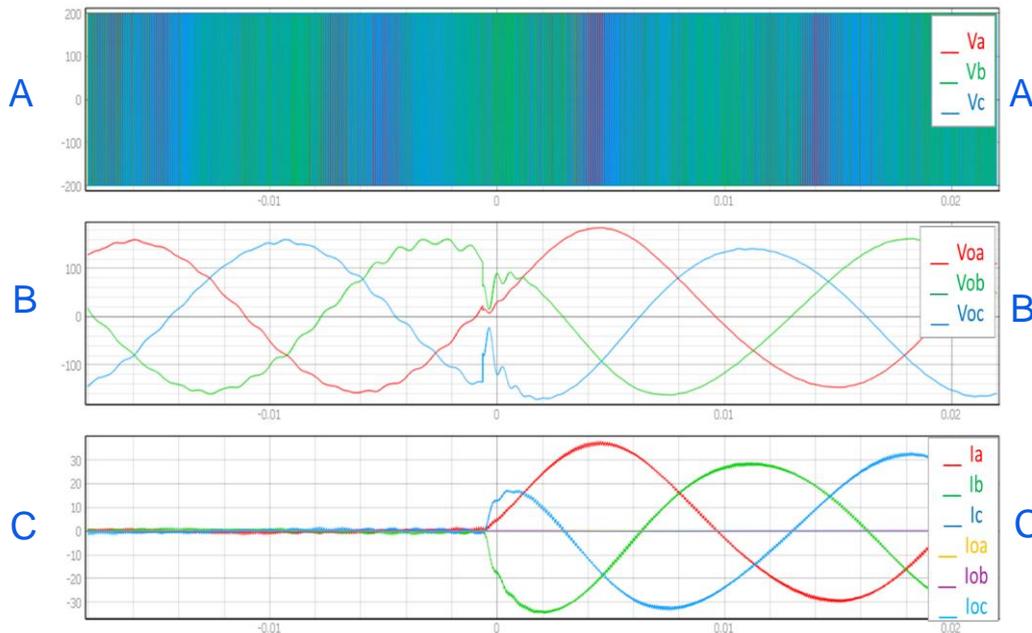
A en [V]: Voltaje medido a la salida del inversor antes del filtro.

B en [V]: Voltaje medido a la salida del filtro hacia la conexión a la carga.

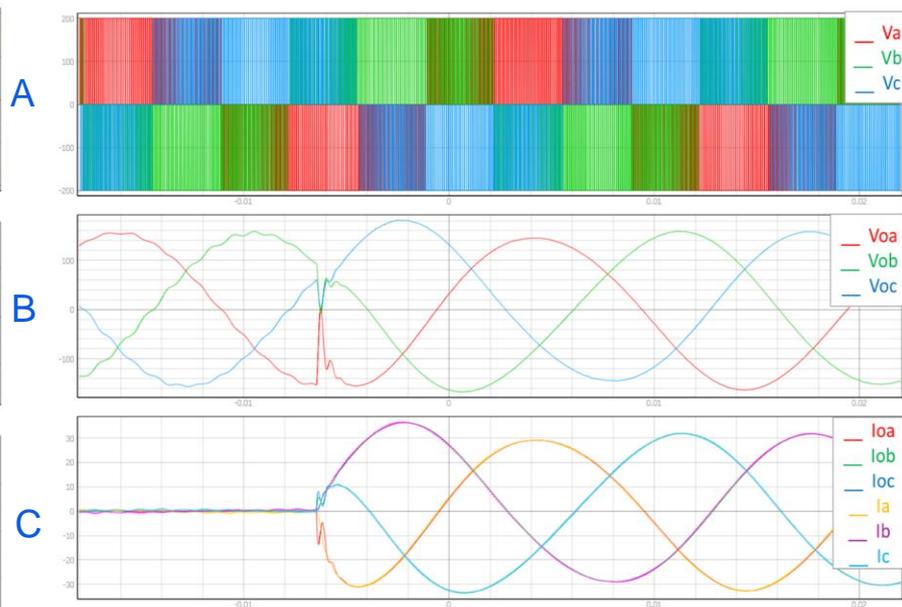
C en [A]: (I_a, I_b, I_c) Corrientes medidas a la salida del inversor antes del filtro, (I_{oa}, I_{ob}, I_{oc}) Corrientes medidas después del filtro en la conexión hacia la carga.

SIMULACIÓN: Control PI aplicado a inversores [2 Niveles v.s 3 Niveles] con carga **Resistiva-Inductiva** de $5\ \Omega$ - 0.6mH .

DOS NIVELES



TRES NIVELES



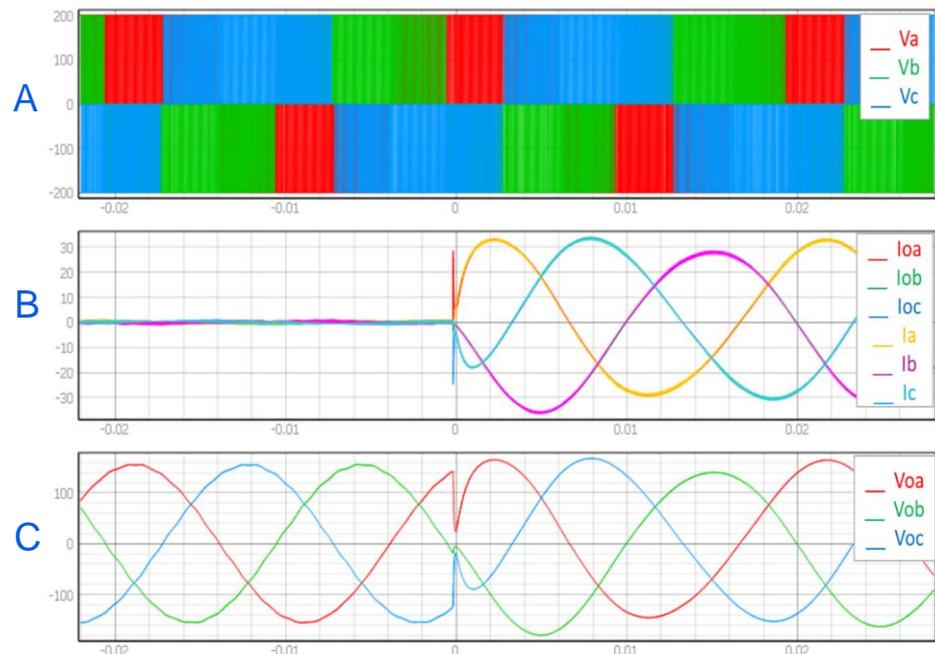
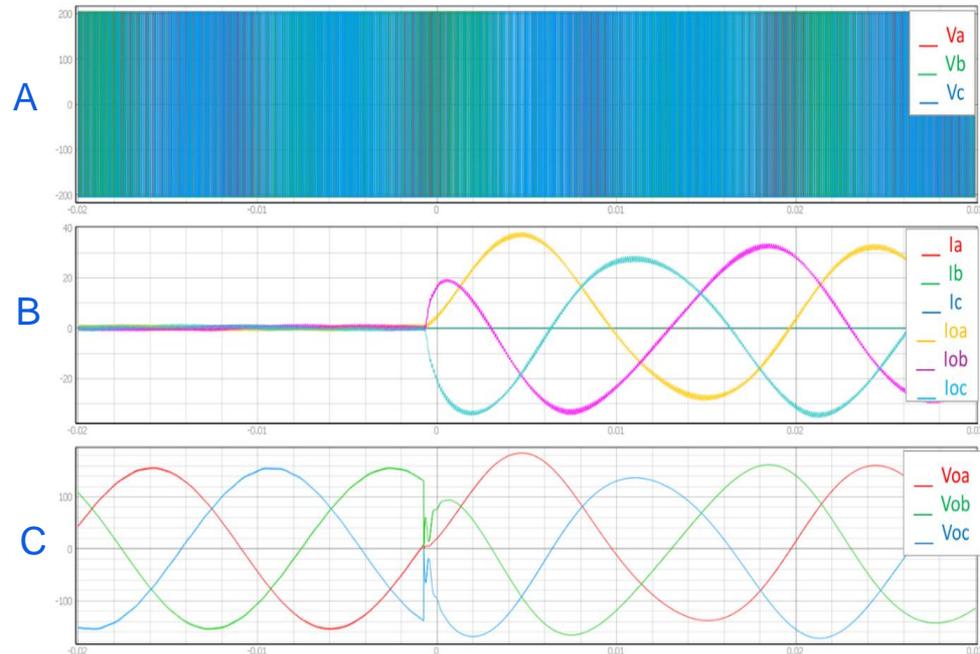
Eje horizontal: T [seg]

A en [V]: Voltaje medido a la salida del inversor antes del filtro.

B en [V]: Voltaje medido a la salida del filtro hacia la conexión a la carga.

C en [A]: (I_a, I_b, I_c) Corrientes medidas a la salida del inversor antes del filtro, (I_{oa}, I_{ob}, I_{oc}) Corrientes medidas después del filtro en la conexión hacia la carga.

IMPLEMENTACIÓN: Control PI aplicado a inversores [2 Niveles v.s 3 Niveles] con carga Resistiva 5Ω
DOS NIVELES **TRES NIVELES**



Eje horizontal: T [seg]

A en [V]: Voltaje medido a la salida del inversor antes del filtro.

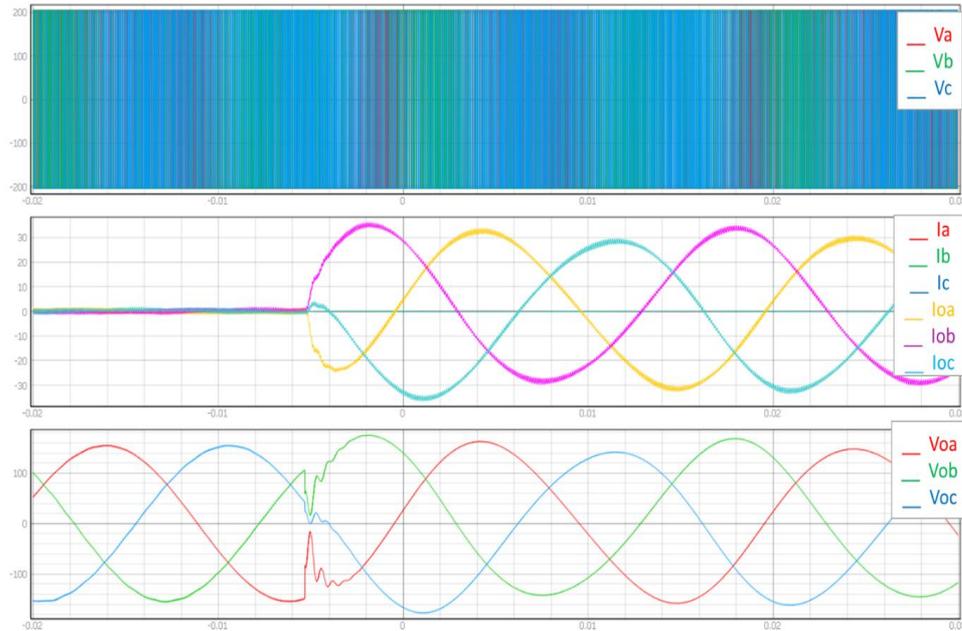
B en [A]: Voltaje medido a la salida del filtro hacia la conexión a la carga.

C en [V]: (I_a, I_b, I_c) Corrientes medidas a la salida del inversor antes del filtro, (I_{oa}, I_{ob}, I_{oc}) Corrientes medidas después del filtro en la conexión hacia la carga.

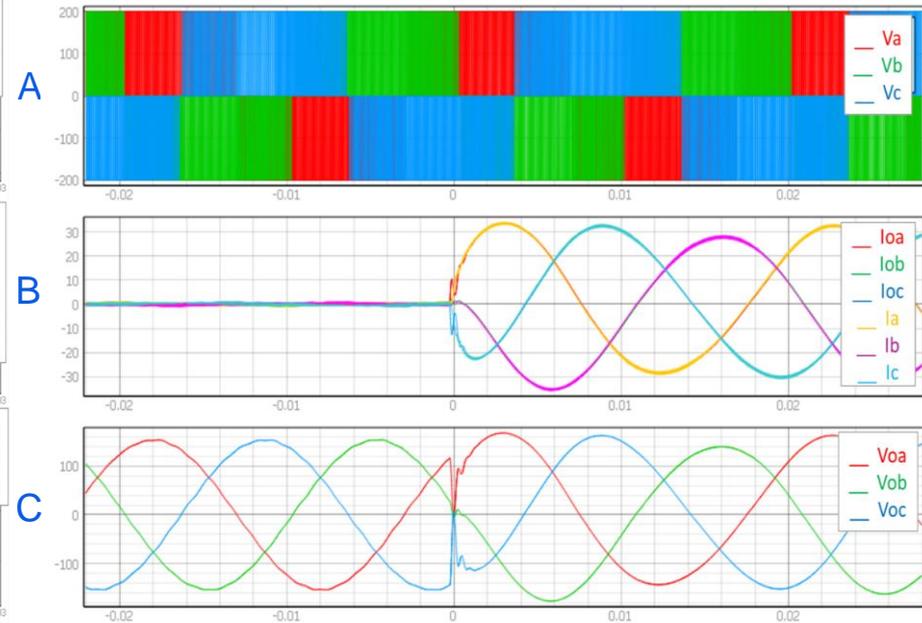
RESULTADOS OBTENIDOS

IMPLEMENTACIÓN: Control PI aplicado a inversores [2 Niveles v.s 3 Niveles] con carga **Resistiva-Inductiva** de $5\ \Omega$ - 0.6mH .

DOS NIVELES



TRES NIVELES



A en [V]: Voltaje medido a la salida del inversor antes del filtro.

B en [A]: Voltaje medido a la salida del filtro hacia la conexión a la carga.

C en [V]: (I_a, I_b, I_c) Corrientes medidas a la salida del inversor antes del filtro, (I_{oa}, I_{ob}, I_{oc}) Corrientes medidas después del filtro en la conexión hacia la carga.

Eje horizontal: T [seg]



COMPARTIVA DEL CONTROL APLICADO A LOS INVERSORES [2 Niveles v.s 3 Niveles]

Resultados de **simulación** con control PI para cargas no lineales

Resultados de **implementación** con control por PI para cargas no lineales

Inversor	Carga	Valor de Carga	THD FASE %		
			A	B	C
2 niveles	R (vacío)	1000 Ω	2.32	3.18	4.23
	R	5 Ω	0.41	0.35	0.34
	RL	5 Ω -0.6mH	0.58	0.54	0.57
NPC 3 Niveles	R (vacío)	1000 Ω	1.61	2.56	2.49
	R	5 Ω	0.22	0.24	0.25
	RL	5 Ω -0.6mH	0.26	0.27	0.27

Inversor	Carga	Valor de Carga	THD FASE %		
			A	B	C
2 niveles	R (vacío)	1000 Ω	1.03	1.04	1.31
	R	5 Ω	0.65	0.66	0.55
	RL	5 Ω -0.6mH	0.56	0.66	0.58
NPC 3 Niveles	R (vacío)	1000 Ω	0.70	0.71	0.66
	R	5 Ω	0.38	0.39	0.39
	RL	5 Ω -0.6mH	0.44	0.36	0.44



- 1 **Introducción**
- 2 **Propuesta del Proyecto**
- 3 **Diseño e Implementación de Sistema**
- 4 **Resultados Experimentales**
- 5 **Conclusiones**
- 6 **Trabajos futuros**

- Se observó que ante la presencia de un cambio en el valor o tipo de carga conectado al inversor DC/AC (de vacío a carga), existe una distorsión notable en las señales de tensión y corriente medidas. Sin embargo, el controlador compensa esta perturbación y alcanza el valor de consigna de tensión asignado.
- Las dos arquitecturas planteadas se validan mediante simulación y experimentación en vacío, se observó que el inversor NPC de 3 niveles tienen una diferencia en el porcentaje de THD comparado con un inversor de dos niveles con valores de: 0.33% para la fase A, 0.33% para la fase B y 0.65% para la fase C, siendo el tres niveles el que presenta menor distorsión armónica.
- El inversor NPC de 3 niveles con carga resistiva tiene una diferencia en el porcentaje de THD comparado con un inversor de dos niveles con valores de: 0.19% para la fase A, 0.11% para la fase B y 0.09% para la fase C, siendo el tres niveles el que presenta menor distorsión armónica.
- El inversor NPC de 3 niveles con carga resistiva inductiva tiene una diferencia en el porcentaje de THD comparado con un inversor de dos niveles con valores de: 0.12% para la fase A, 0.3% para la fase B y 0.14% para la fase C, siendo el tres niveles el que presenta menor distorsión armónica.
- El control PI aplicado al inversor DC/AC de tres niveles de tipo NPC muestra una menor distorsión armónica en comparación al inversor de dos niveles clásico con diferentes tipos de cargas, evidenciando un mejor rendimiento. Además, los valores de THD obtenidos son inferiores al 5% , cumpliendo el estándar de calidad de la energía según la Regulación CONELEC 003/08.



- 1 **Introducción**
- 2 **Propuesta del Proyecto**
- 3 **Diseño e Implementación de Sistema**
- 4 **Resultados Experimentales**
- 5 **Conclusiones**
- 6 **Trabajos Futuros**



- Existen varias investigaciones sobre sistemas de conversión de energía en las que se usa un controlador por corriente para enganche a la red eléctrica y poder entregar o vender energía. Por lo que se propone, el Diseño e Implementación de un Algoritmo de Control Avanzado de un Inversor DC/AC en un Sistema Typhoon HIL que permita la conexión a la red eléctrica.
- Actualmente aparte de la energía fotovoltaica existen fuentes de energía renovables como la eólica, térmica, biomasa, mareomotriz, etc. Estas fuentes entregan corriente continua, es por esto que se plantea el Diseño e Implementación de un Algoritmo de Control de un Inversor DC/AC en un Sistema Typhoon HIL que use la corriente de las fuentes mencionadas.





UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

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

"Diseño e implementación de un algoritmo de control de un convertidor DC/AC en un sistema Typhoon HIL."

Autores:

Pilatasig Chicaiza Jessica Guadalupe
Ruiz Chacón David Isaac

PhD. Llanos Proaño, Jaqueline del Rosario ,***Directora***

