

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONVERTIDOR AISLADO MODULAR DE TOPOLOGÍA DOBLE PUENTE PARA LABORATORIO”

Tomás Magnelli

Cátedra Electronica Industrial FCEFy N – UNC
Córdoba, Argentina

tomas.magnelli@mi.unc.edu.ar

Adrián Agüero

Cátedra Electrónica Industrial FCEFy N – UNC
Córdoba, Argentina

caguero@unc.edu.ar

OBJETIVOS DEL TRABAJO

Objetivo General:

Diseñar e implementar físicamente un prototipo modular del convertidor DC-DC bidireccional de topología Doble Puente Activo que permita realizar estudios experimentales de relevancia académica.

La motivación principal resulta de la **necesidad de incorporar actividades de laboratorio** que pongan en práctica los nuevos conceptos en **tecnologías de convertidores DC-DC** incorporados en la cátedra de Electrónica Industrial.

Objetivos Específicos

- 1) Relevar y analizar topologías existentes de convertidores DC/DC.
- 2) Diseñar y simular el convertidor DC-DC bidireccional DAB.
- 3) Adquirir componentes y ensamblar el convertidor DAB diseñado.
- 4) Programar microcontrolador con secuencia de control.
- 5) Medir experimentalmente las señales de control y potencia más significativas.
- 6) Ajustar el prototipo si es necesario, hasta cumplir con el objetivo general.
- 7) Realizar informe final, analizando los resultados obtenidos experimentalmente.





CATÉDRA DE ELECTRÓNIA INDUSTRIAL



ENFOQUE DE LA CÁTEDRA:

- Componentes electrónicos de potencia.
- Selección y empleo de manuales.
- Circuitos típicos. Formas de ondas características.
- Aplicaciones industriales.



CATÉDRA DE ELECTRÓNIA INDUSTRIAL



EQUPOS PARA TRABAJOS PÁCTICOS DE LABORTORIO

- Placa de convertidor Buck
- Placa de convertidor flyback
- Placa de convertidor Boost SEPIC
- [Placa de un convertidor DAB](#)
- Control de velocidad de un motor asíncrono
- Control de velocidad de un motor brushless
- Monitor de señales para UPSs

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

*Se requiere interconectar equipamiento de consumo y generación de energía eléctrica.
(Cargas y Fuentes)*

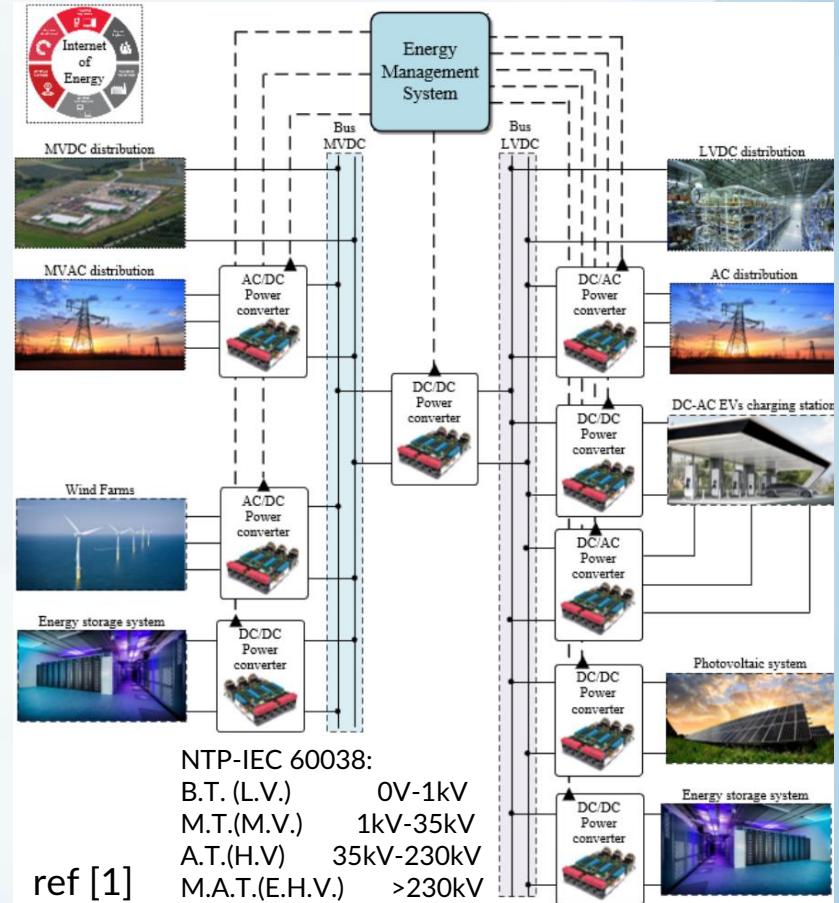
Características de las fuentes y cargas:

- Flujos de consumo y generación de energía eléctrica:
 - Uniformes o no uniformes en el tiempo.
 - Unidireccionales o multidireccionales.
 - Multipuerto o doble puerto.
- Niveles de tensión de operación:
 - Específicos y/o variables.
 - Requieren aislamiento galvánico.
 - DC y/o AC.

Problema técnico:

Controlar y monitorear flujos de potencia en convertidores adecuados a las características de las fuentes y cargas.

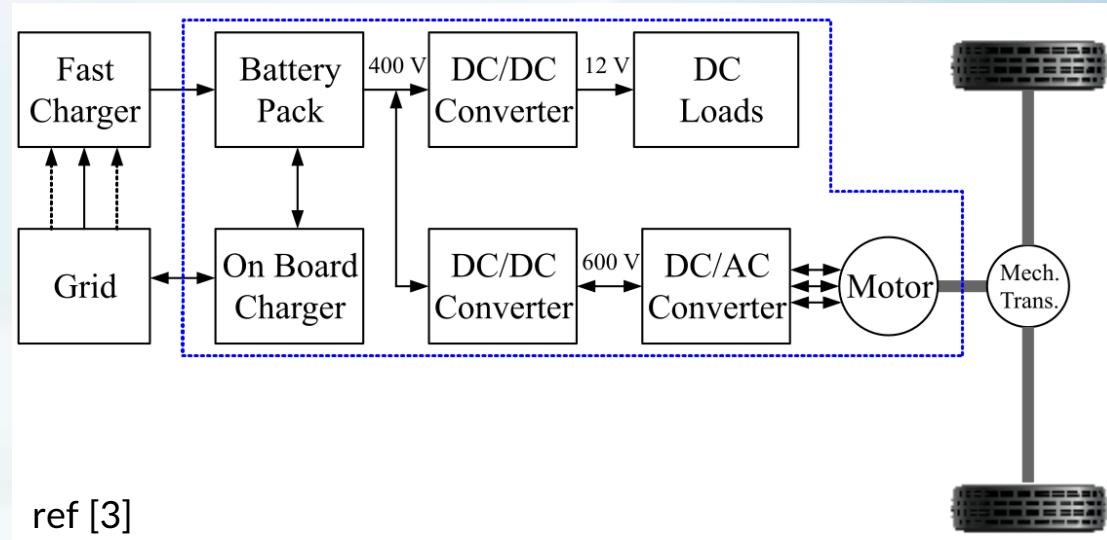
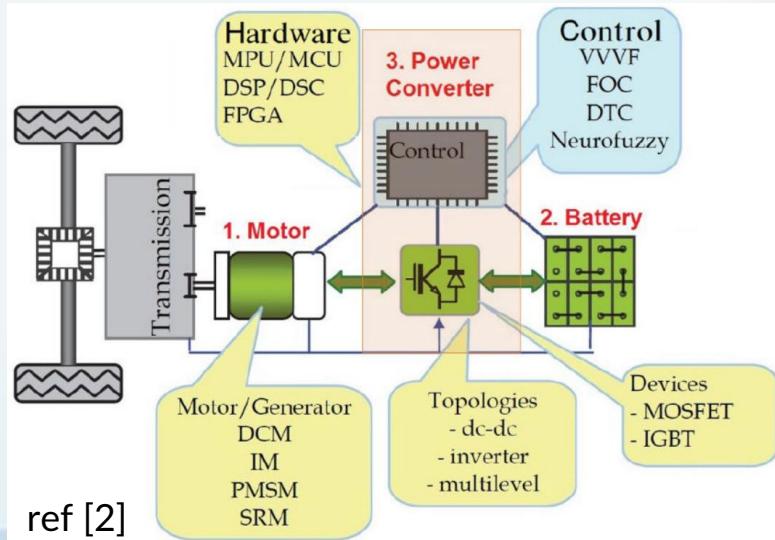
Convertidores en redes de distribución.



CONVERTIDORES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS (EV's)

Principales aplicaciones en EV:

- Interconectar baterías con motor eléctrico. (Unidireccional o Bidireccional)
- Interconectar baterías con equipos de 12V. (Unidireccional)
- Cargador de baterías "On Board Charger". (Unidireccional)
- Estación de carga "Fast Charger". (Unidireccional)



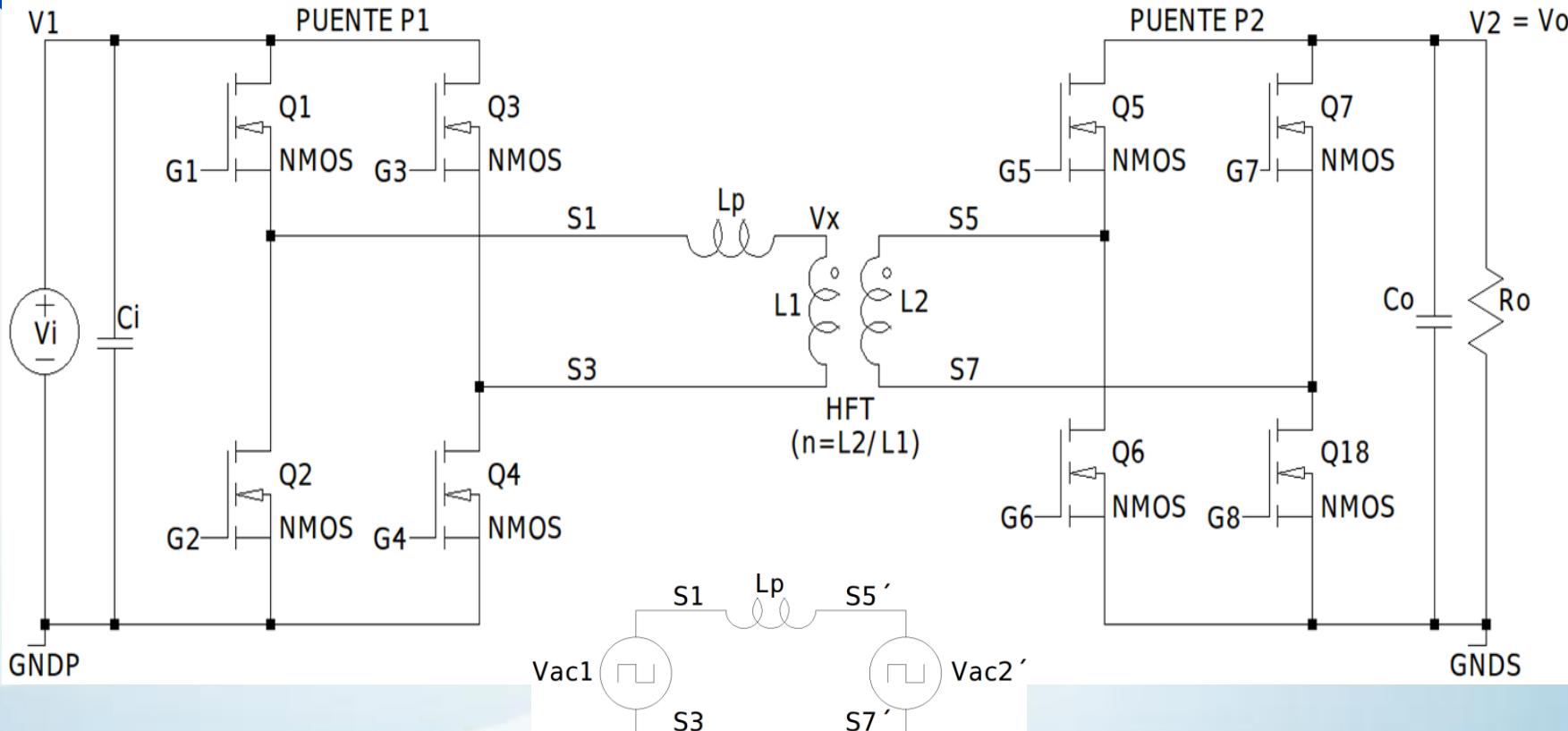
TOPOLOGÍA SELECCIONADA: DOBLE PUENTE ACTIVO

Características principales:

- Elevador o reductor de tensión.
- Aislamiento con transformador de núcleo de ferrita.
- Posibilidad de control bidireccional de potencia.
- Modularidad y escalabilidad.



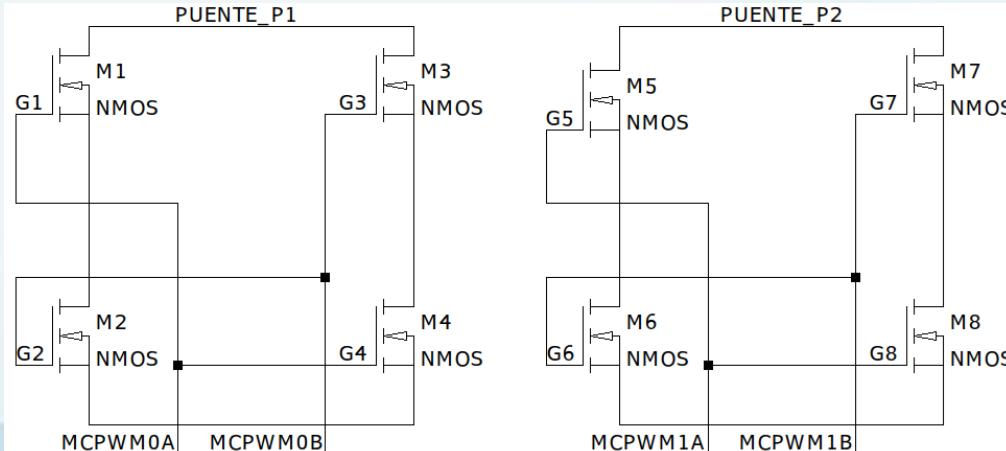
TOPOLOGÍA SELECCIONADA: DOBLE PUENTE ACTIVO



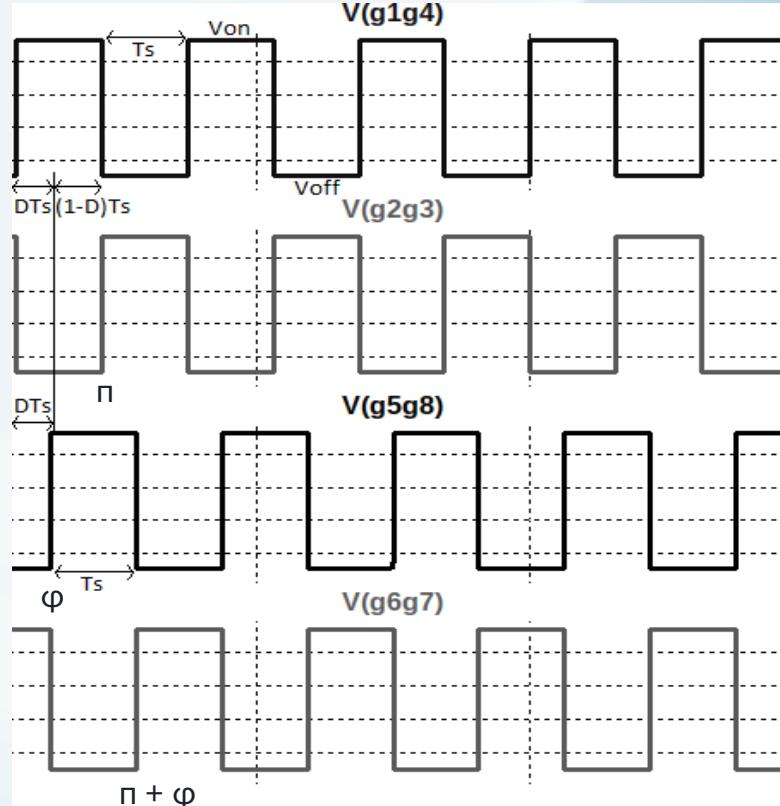
MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE SIMPLE SPS (SINGLE PHASE SHIFT)

Fases de las 4 diagonales de MOSFET de ambos puentes:

- Diagonal G1-G4: $\theta = 0$
(Puente P1)
- Diagonal G2-G3: $\theta = \pi$
(Puente P1)
- Diagonal G5-G8: $\theta = \varphi$
(Puente P2)
- Diagonal G6-G7: $\theta = \pi + \varphi$
(Puente P2)



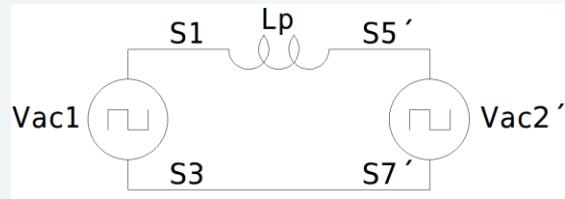
(*) Niveles de disparo de parte alta según niveles de DC +19V



EFECTO DE LA MODULACIÓN SPS.

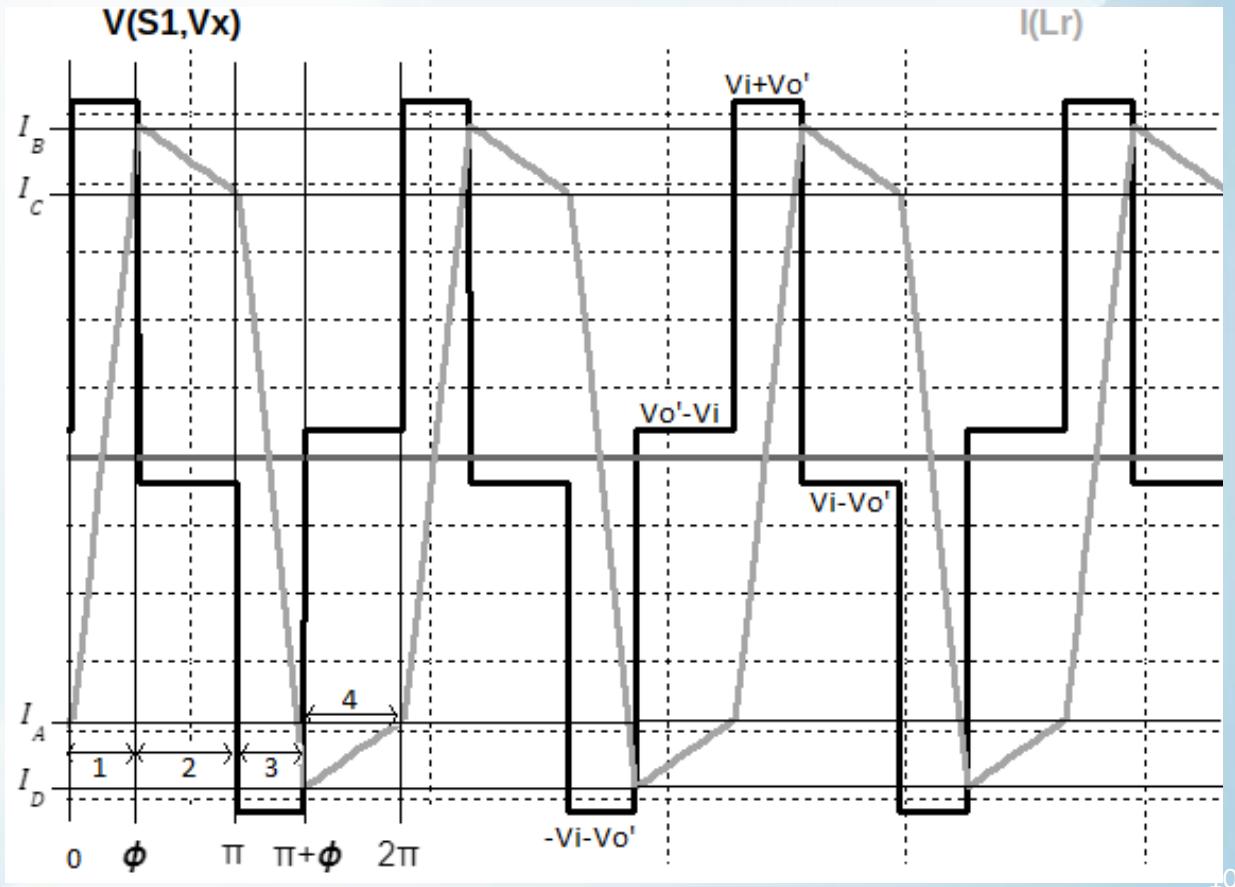
$$V_{L(t)} = L \frac{dI_{L(t)}}{dt}$$

Circuito equivalente:



Ganancia efectiva:

$$G_{ef} = \frac{G}{n} = \frac{V_o}{n V_i}$$



APLICACIÓN DE LA MODULACIÓN SPS

$$t_{ps} = \frac{D}{2*f_s} = \frac{DT}{2} = D * T_s$$

Requisitos de software:

- Generar 4 señales PWM.
- Frecuencia de conmutación f_s variable. (FREC= f_s)
- Tiempo muerto t_d variable. (DTIME= t_d /100ns)
- Desfase ϕ variable por puente (SHIFT= $1000 * \phi [^{\circ}] / 360^{\circ}$)

Requisitos de hardware:

- Asegurar sincronismo.
- Ajustar niveles de disparo. (IR2110)

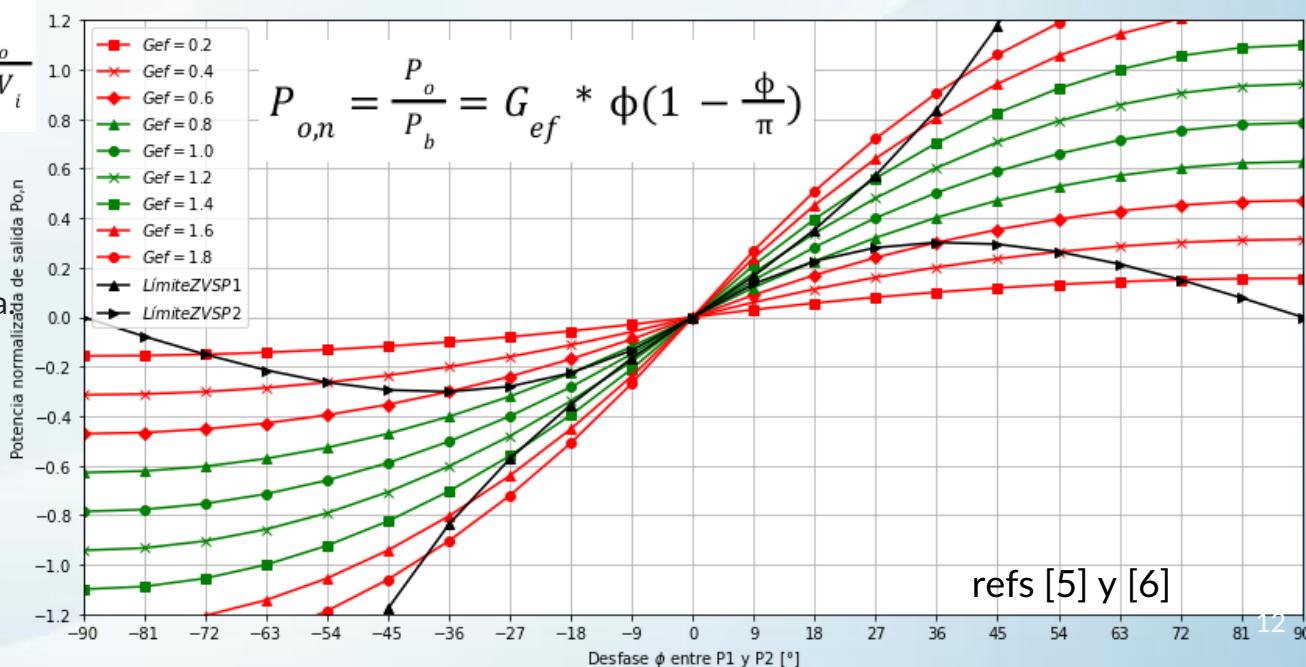
D	ϕ	SHIFT	$tps = D * Ts = D / (2 fs)$	DTIME	$td [us] = DTIME * 100ns$
0,1	18°	50	0,1 / (2 fs)	100	10
0,2	36°	100	0,2 / (2 fs)	50	5
0,4	72°	200	0,4 / (2 fs)	10	1
fs [kHz]	FREC		tps [us]		
		$\phi = 18^{\circ}$ D = 0,1 SHIFT = 50	$\phi = 36^{\circ}$ D = 0,2 SHIFT = 100	$\phi = 72^{\circ}$ D = 0,4 SHIFT = 200	
16	16000	3,1	6,3	12,5	
20	20000	2,5	5,0	10,0	
25	25000	2,0	4,0	8,0	
29	29000	1,7	3,4	6,9	
31	31000	1,6	3,2	6,5	
33	33000	1,5	3,0	6,1	
37	37000	1,4	2,7	5,4	
40	40000	1,3	2,5	5,0	
44	44000	1,1	2,3	4,5	

CONTROL BIDIRECCIONAL DE POTENCIA

$$P_o = I_o V_o = \frac{V_i V_o}{2 n L f_s} \frac{\phi}{\pi} \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right) = \left(\frac{V_i^2}{2\pi f_s L}\right) \frac{V_o}{n * V_i} \phi \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right) = P_b * G_{ef} * \phi \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right)$$

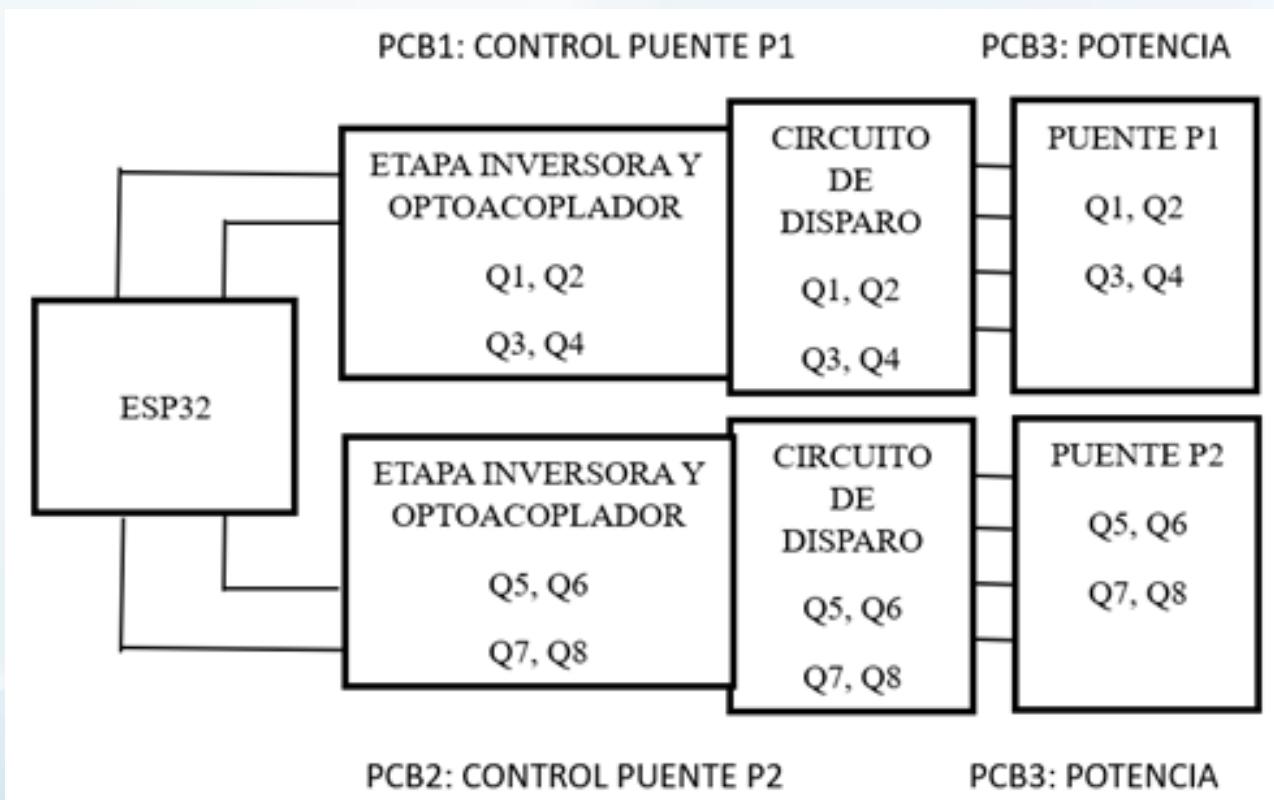
$$P_b = \left(\frac{V_i^2}{2\pi f_s L}\right)$$

$$G_{ef} = \frac{V_o}{n * V_i}$$

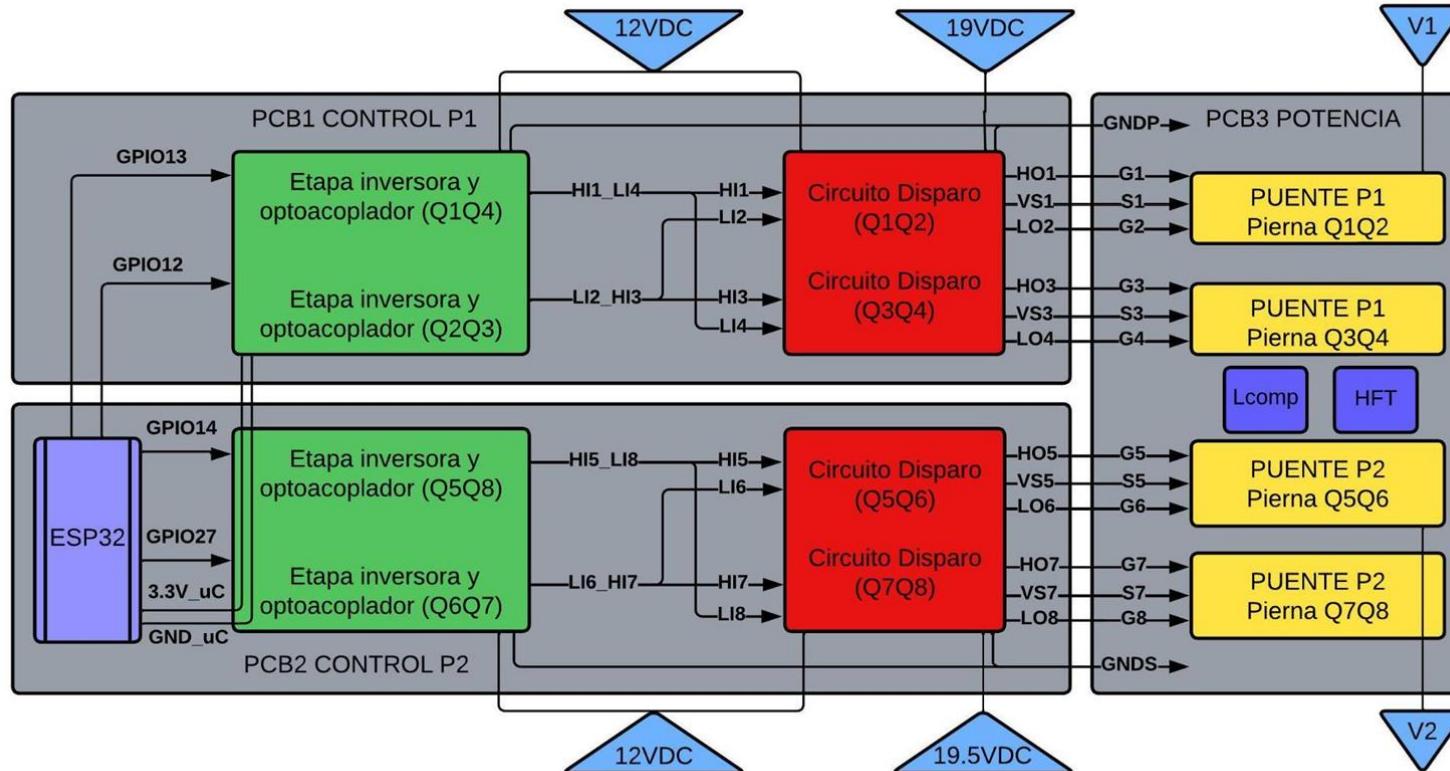


- Rango amplio de tensión/potencia.
- Tensión/potencia variables.
- Posibilidad de flujo bidireccional.
- Posibilidad de comutación ZVS.

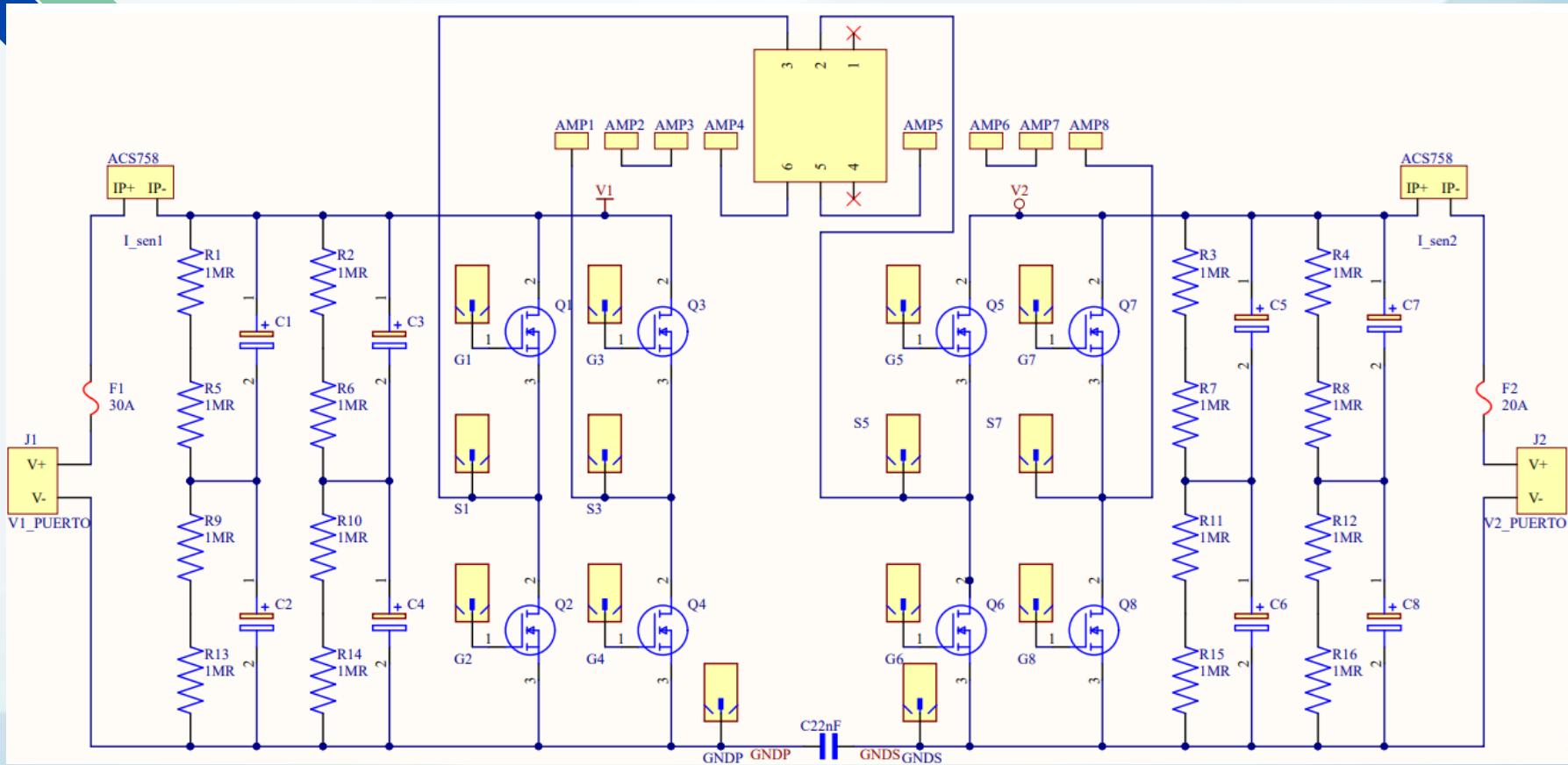
CONVERTIDOR AISLADO MODULAR



CONVERTIDOR AISLADO MODULAR



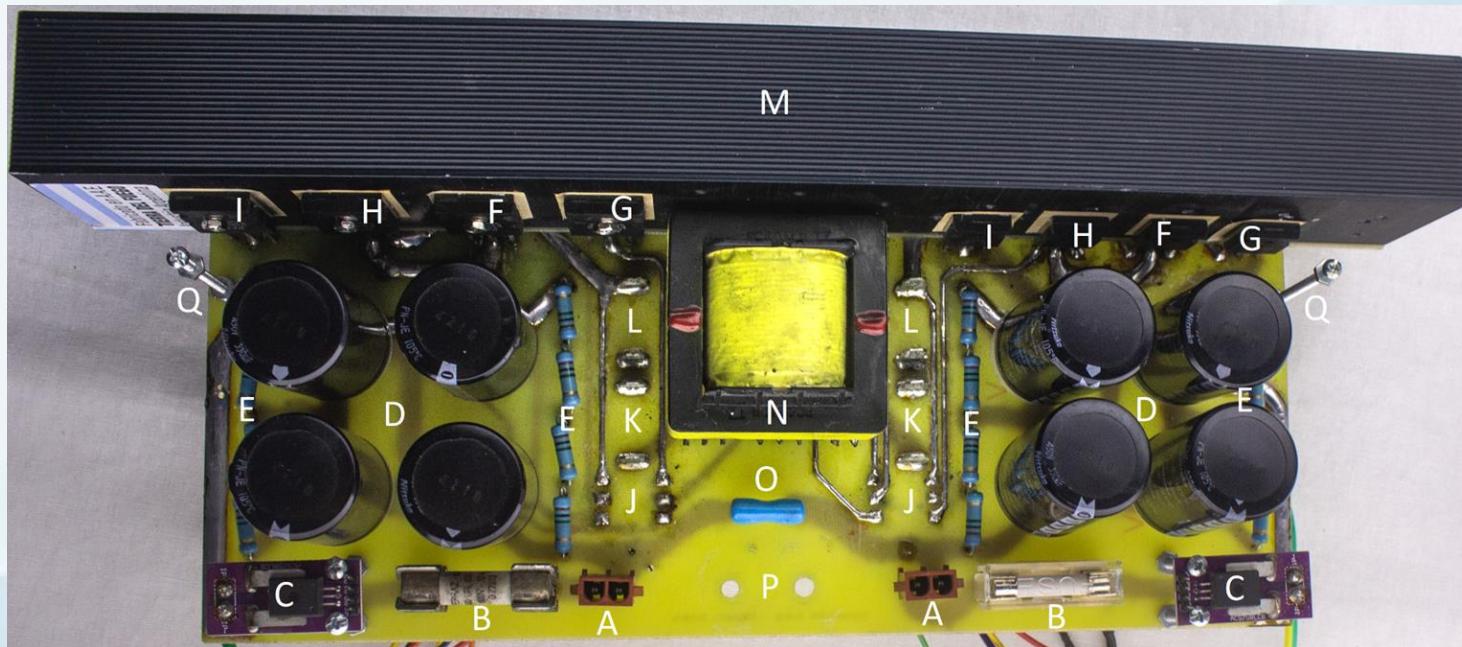
CIRCUITO DE POTENCIA



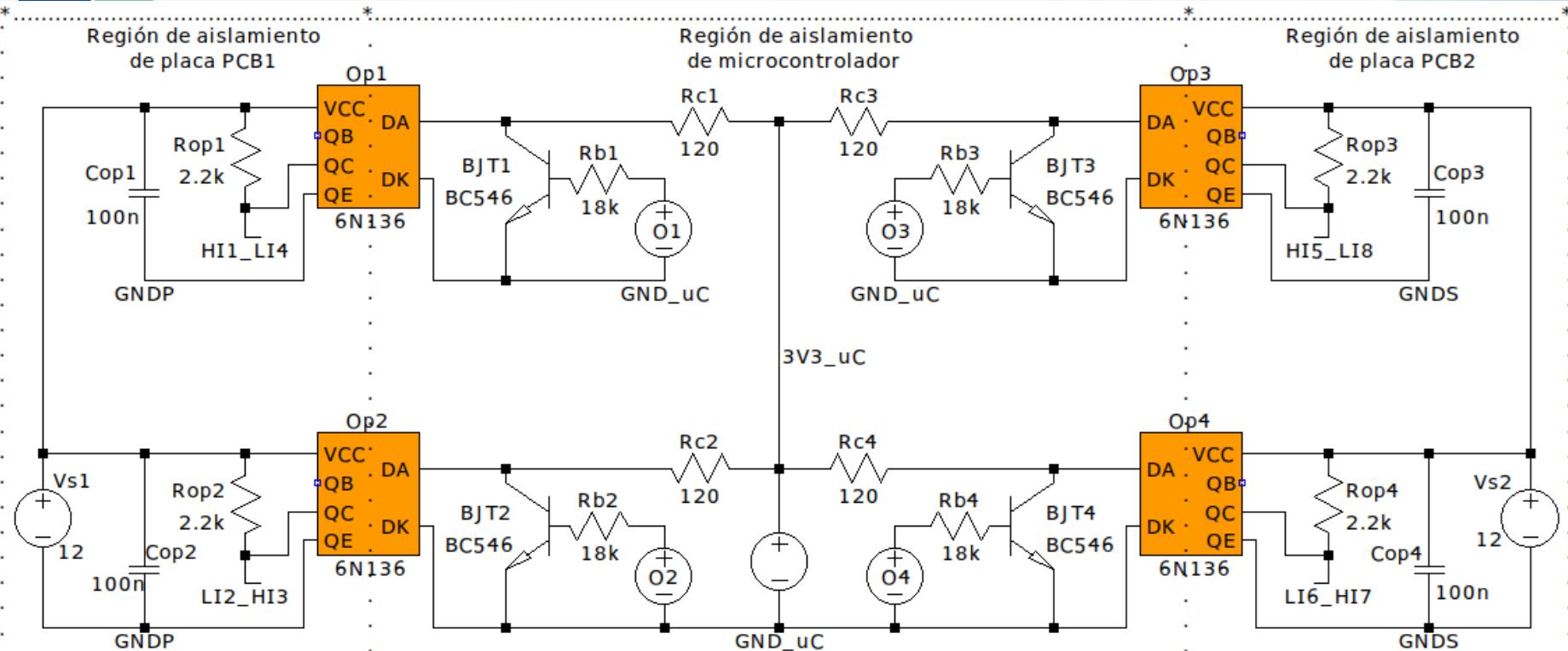
MÓDULO DE POTENCIA PCB3

Señales y elementos principales:

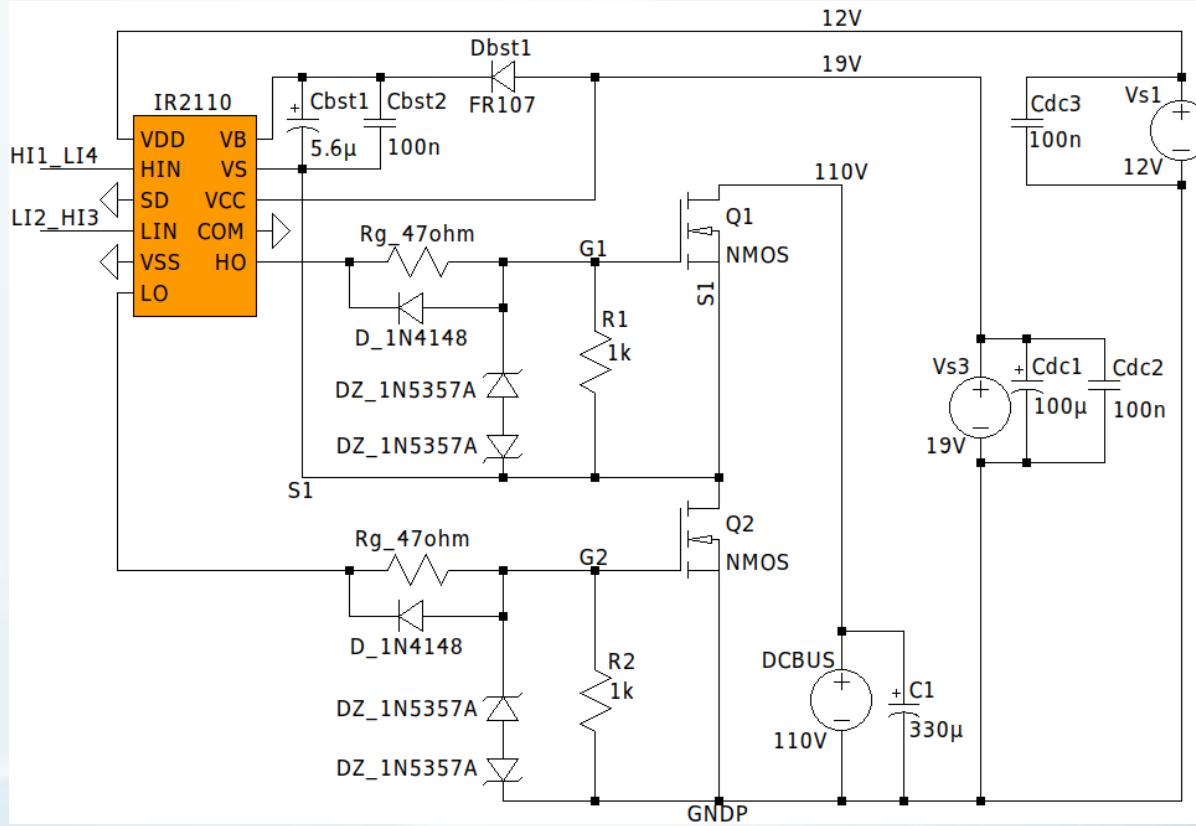
- Puertos de potencia V1 y V2 de puentes P1 y P2.
- Filtros capacitivos en ambos puertos V1 y V2.
- Transformador HFT para aislamiento.
- Inductancia complementaria de pérdidas.



ETAPA INVERSORA Y OPTOACOPLADOR



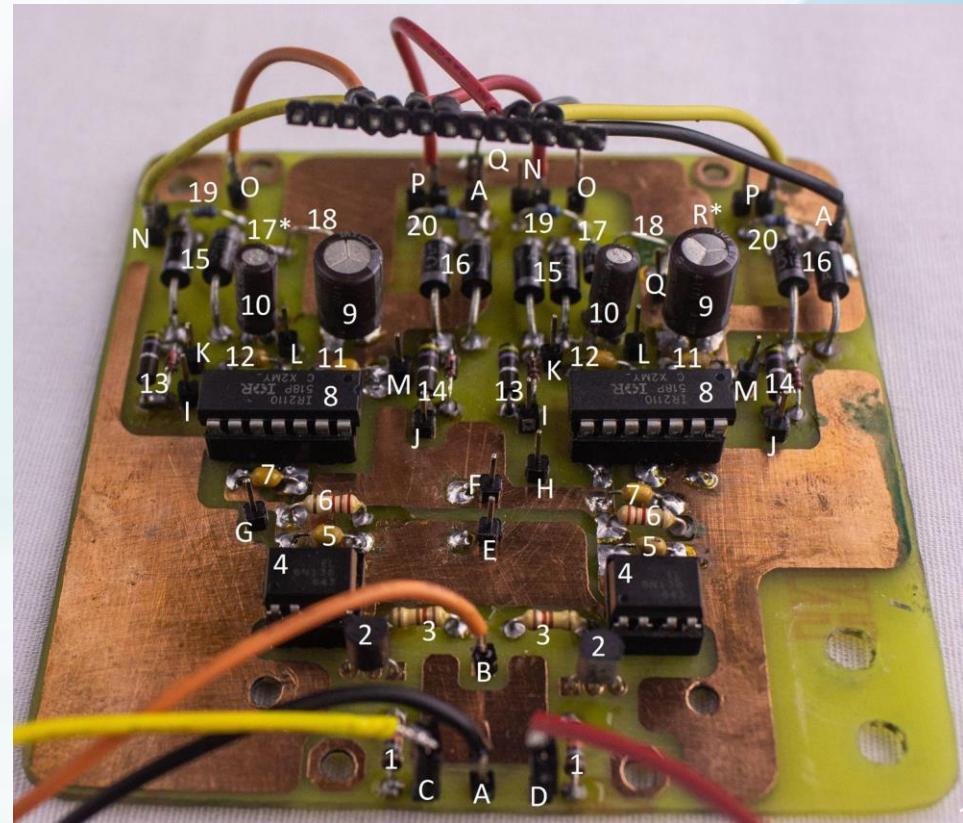
CIRCUITO DE DISPARO



PRIMER MÓDULO DE CONTROL: PCB1

Características principales:

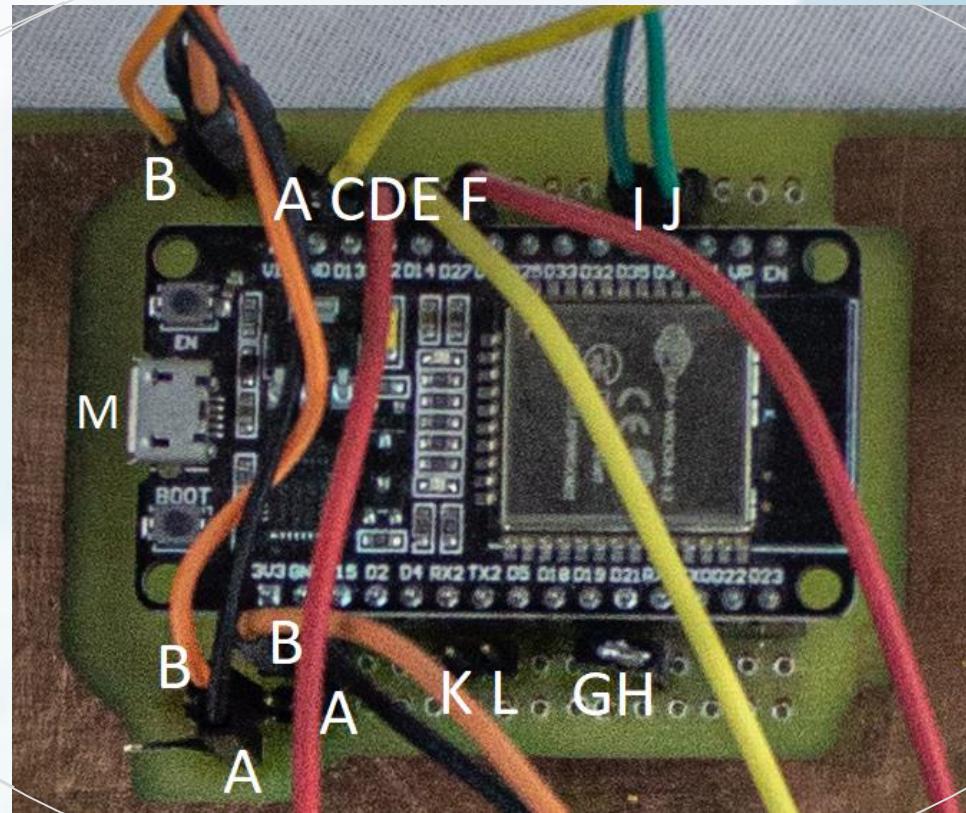
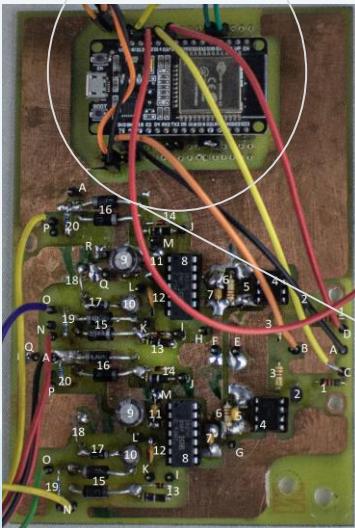
- Señales de entrada MCPWM: 0A y 0B.
- Optoacopladores 6N136 para aislar de ESP32.
- Driver IR2110 para adaptar niveles de disparo PWM.
- Señales de salida G1, G2, G3, G4, S1, S3 y GNDP.



SEGUNDO MÓDULO DE CONTROL: PCB2

Señales y elementos principales:

- Señales de entrada MCPWM: 1A y 1B.
- Diseño del módulo PCB1 con IR2110 y 6N136.
- Señales de salida G5, G6, G7, G8, S5, S7 y GNDS.
- Incluye ESP32.



EQUIPO EXPERIMENTAL COMPLETO

Complementos de control:

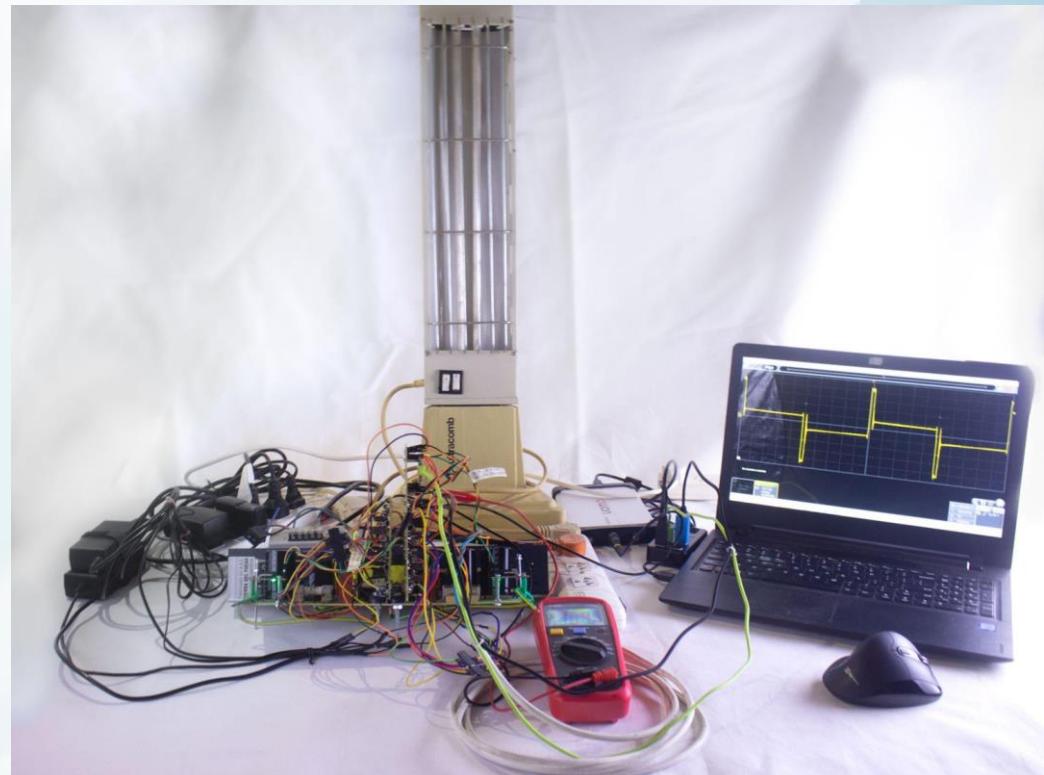
- Fuentes de alimentación:
12V, 12V, 19V y 19.5V
- Adaptadores USB-MicroUSB y UART-USB.
- Notebook con programas instalados(*) .

Complementos de potencia:

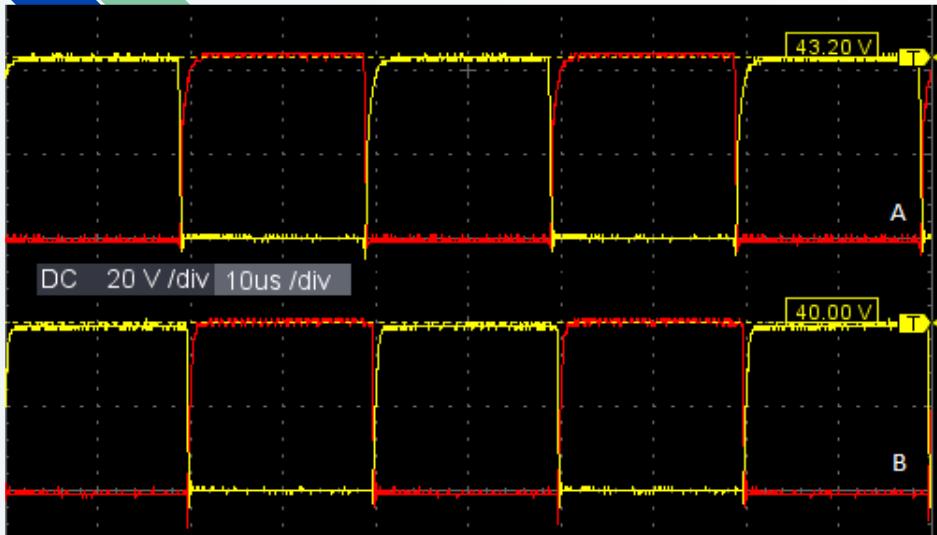
- Fuente de energía de 24V.
- Estufa eléctrica de resistencia 40Ω y 80Ω .
- Inductancia de $280\mu\text{H}$ con 7 espiras.

Instrumentos de medición:

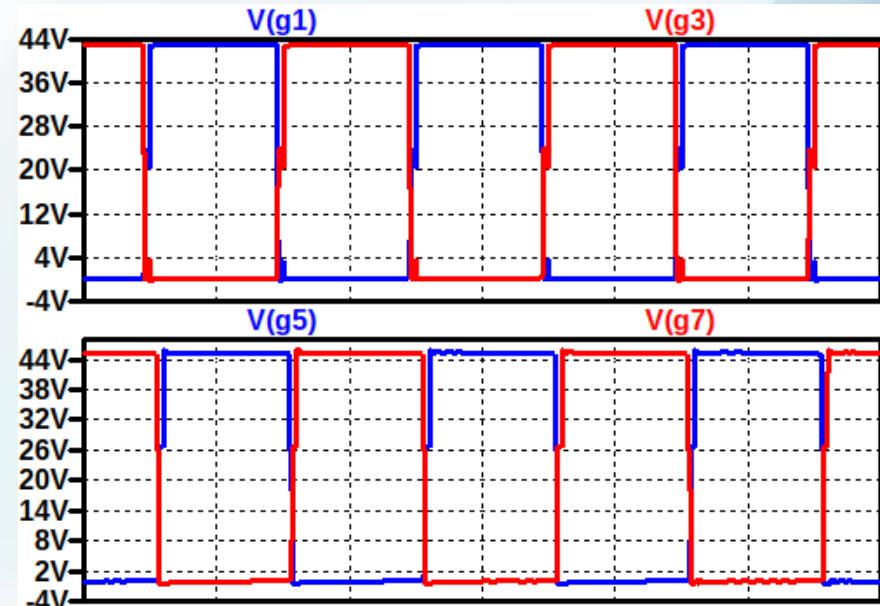
- Osciloscopio OWON 25MHz.
- Multímetro Digital UT136C+.
- Medidor LRC UT603.



MEDICIONES

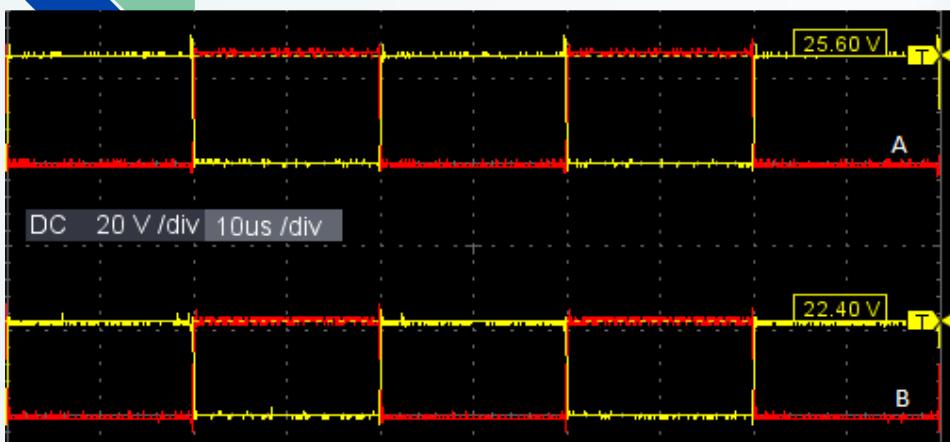


A: Compuertas G1 y G3 de parte alta del puente P1. B: Compuertas G5 y G7 de parte alta del puente P2.

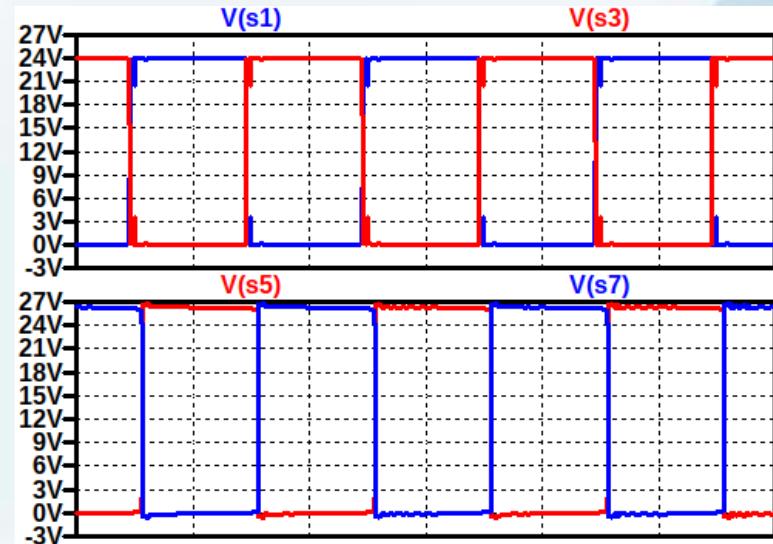


Simulación de señales de Fig. 8 en LTSpice con parámetros $V_i=24V$, $f_s=25kHz$, $\phi=18^\circ$, $Leq=134\mu H$.

MEDICIONES

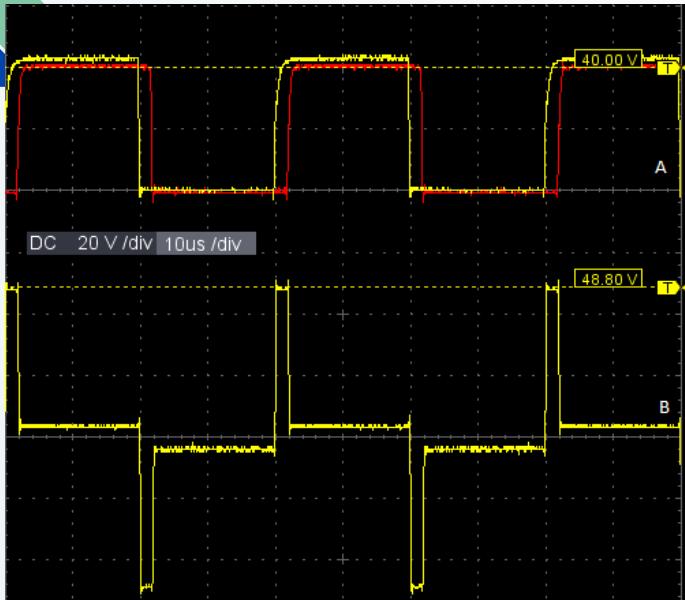


A: Surtidores S1 y S3 de parte alta del puente P1.
B: Surtidores S5 y S7 de parte alta del puente P2.

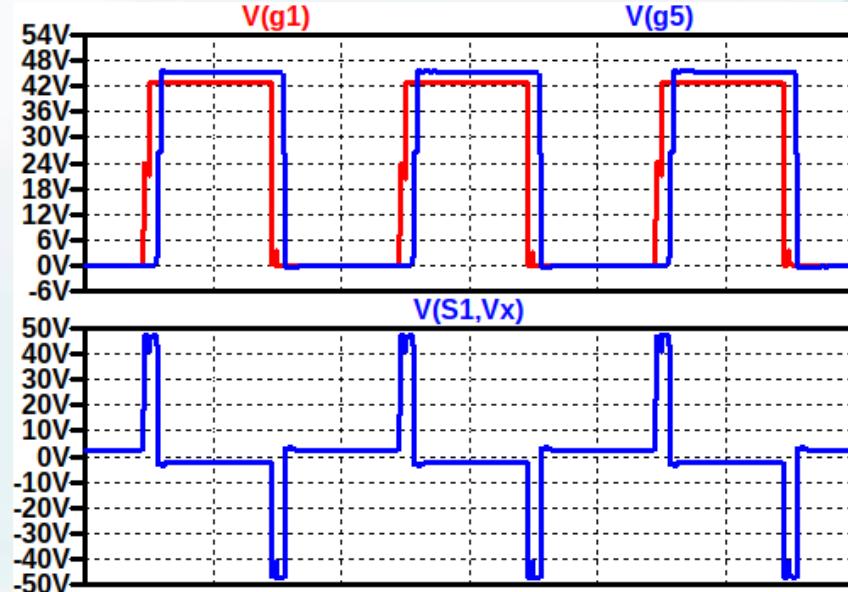


Simulación de señales de Fig. 10 en LTSpice con parámetros $V_i=24V$, $f_s=25kHz$, $\phi=18^\circ$, $Leq=134\mu H$.

MEDICIONES



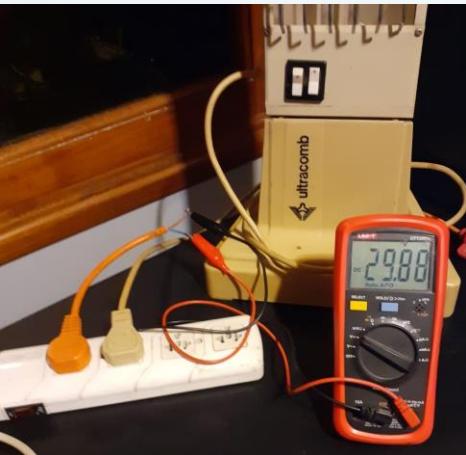
Compuertas G1 del puente P1(amarillo) y G5 del puente P2 (rojo). B: Tensión en bornes del inductor.



Simulación de señales de Fig. 12 en LTSpice con parámetros $V_i=24V$, $f_s=25kHz$, $\phi=18^\circ$, $L_{eq}=134\mu H$.

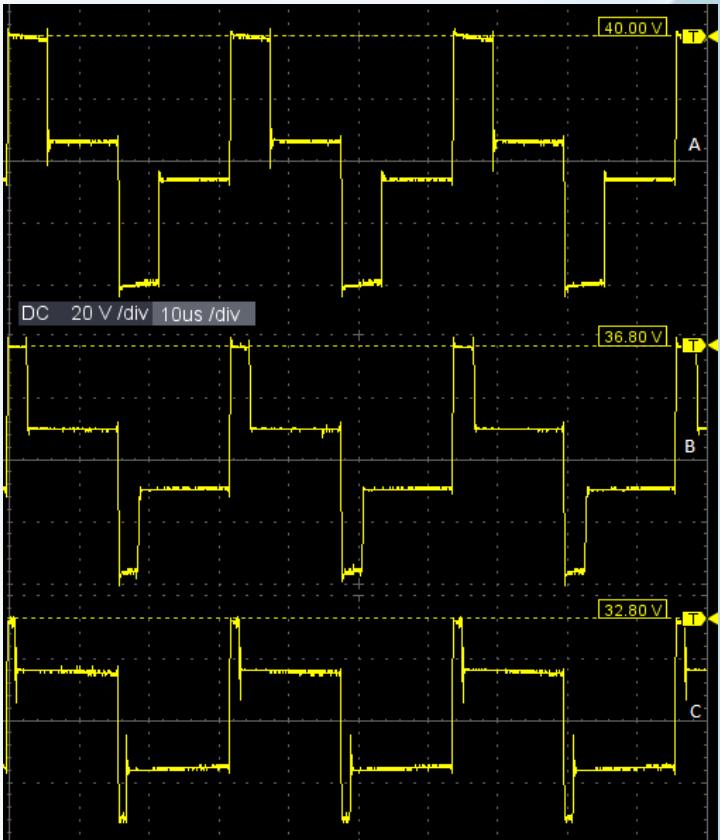
MEDICIONES PARAMÉTRICAS

$$V_o = I_o R_L = \frac{V_i R_L}{2 n L_{eq} f_s} \frac{\phi}{\pi} \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \right)$$



- Frecuencia: $f_s = \{16\text{kHz} ; 20\text{kHz} ; 25\text{kHz} ; 29\text{kHz} ; 31\text{kHz} ; 33\text{kHz} ; 37\text{kHz} ; 40\text{kHz} ; 44\text{kHz}\}$.
- Desfase: $\phi = \{18^\circ ; 36^\circ ; 72^\circ\}$.
- Carga resistiva: $R_L = \{40\Omega ; 80\Omega\}$
- Inductancia complementaria: $L_{comp} = \{127\mu\text{H} ; 281\mu\text{H}\}$

$$L_{eq} = L_{comp} + L_{per}$$



Parámetros de casos específicos:

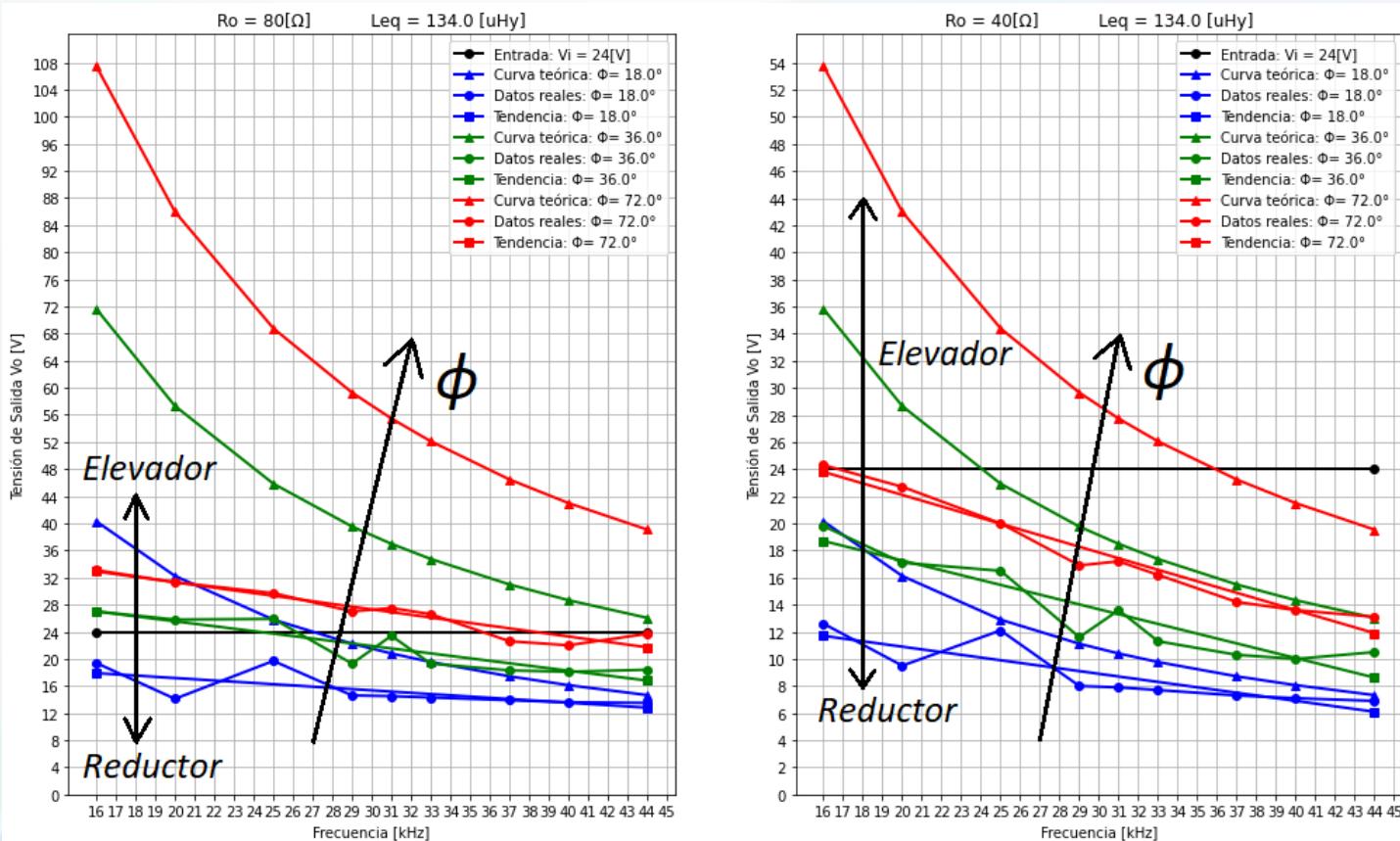
- 31kHz de frecuencia de conmutación (FREC)
- 3 ángulos de desfase $\phi = \{18^\circ ; 36^\circ ; 72^\circ\}$. (SHIFT)
- 1us de tiempo muerto. (DTIME)

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

COMPARACIÓN DE TENSIONES AL VARIAR CARGAS. LA DIFERENCIA ENTRE LA TENSIÓN DE SALIDA CON $RL=40\Omega$ Y LA MITAD DE LA TENSIÓN CON $RL=80\Omega$.

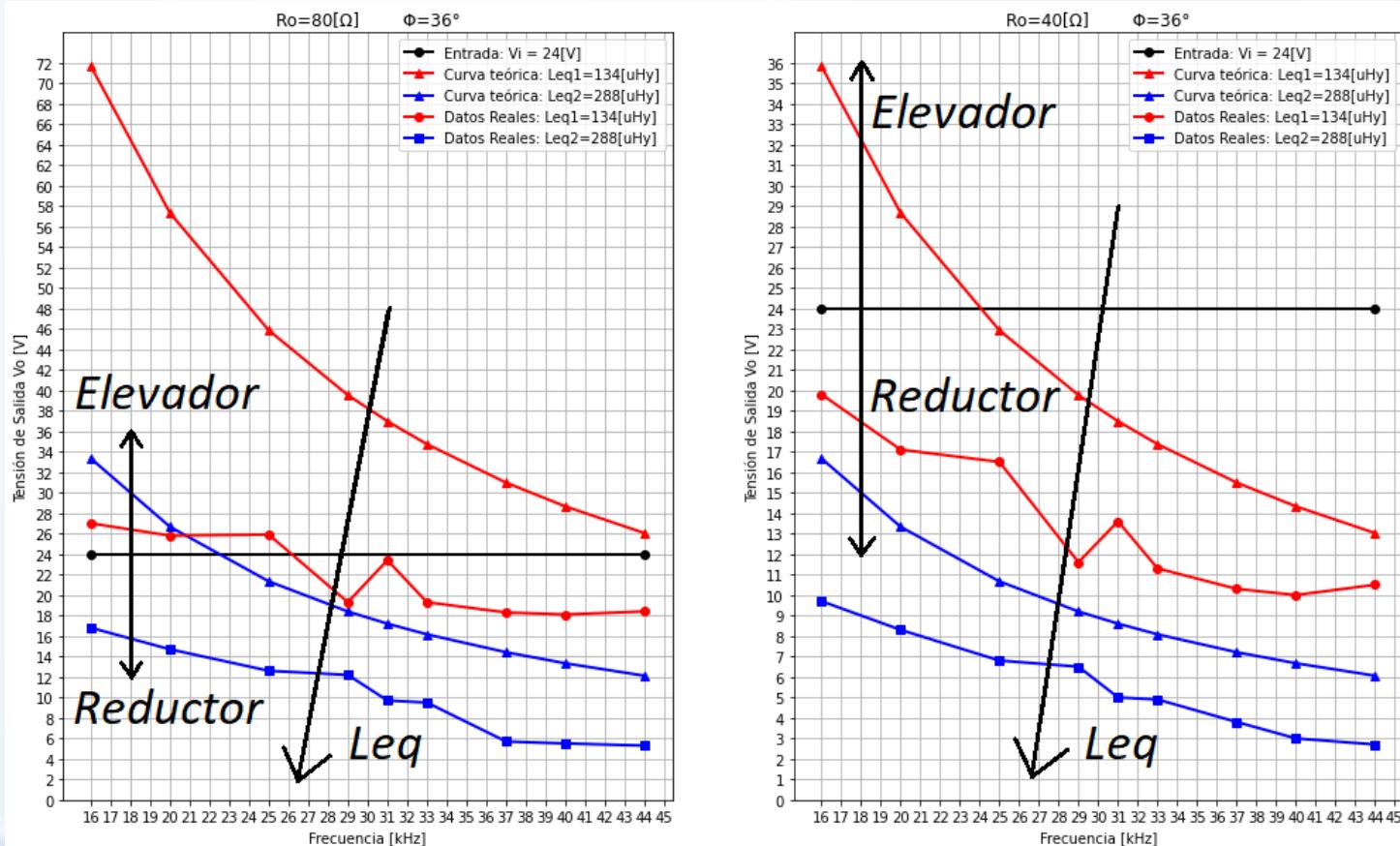
Frec [kHz]	$\phi=18^\circ$			$\phi=36^\circ$			$\phi=72^\circ$		
	D=0,1			D=0,2			D=0,4		
	SHIFT=50			SHIFT=100			SHIFT=200		
	Vo (80Ω),[1]	Vo (40Ω),[2]	[2]- ([1]/2)	Vo (80Ω)	Vo (40Ω)	[2]- ([1]/2)	Vo (80Ω)	Vo (40Ω)	[2]- ([1]/2)
16	19,4	12,6	2,9	27,0	19,8	6,3	33,1	24,3	7,8
20	14,1	9,5	2,5	25,8	17,1	4,2	31,3	22,7	7,1
25	19,7	12,1	2,3	25,9	16,5	3,6	29,7	20,0	5,2
29	14,6	8,0	0,7	19,3	11,6	2,0	27,0	16,9	3,4
31	14,5	7,9	0,7	23,4	13,6	1,9	27,5	17,2	3,5
33	14,3	7,7	0,6	19,3	11,3	1,7	26,6	16,2	2,9
37	13,9	7,3	0,4	18,3	10,3	1,2	22,6	14,2	2,9
40	13,6	7,1	0,3	18,1	10,0	0,9	22,0	13,6	2,6
44	13,5	6,9	0,2	18,4	10,5	1,3	23,7	13,1	1,3

RESULTADOS



Paramétricas variando f_s ; ϕ ; R_L

RESULTADOS



Paramétricas variando f_s ; L_{comp} ; R_L

REFERENCIAS

- [1] **Samuele Granata, Marco Di Benedetto, Cristina Terlizzi, Riccardo Leuzzi, Stefano Bifaretti y Pericle Zanchetta.**
“Power Electronics Converters for the Internet of Energy: A Review.”
https://www.researchgate.net/publication/359703553_Power_Electronics_Converters_for_the_Internet_of_Energy_A_Review
- [2] **Ahmad Tavakoli, Sajeeb Saha, Mohammad Taufiqul Arif, Md Enamul Haque, Nishad Mendis y Aman M.T. Oo.**
“Impacts of grid integration of solar PV and electric vehicle on grid stability, power quality and energy economics: A review.”
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-esi.2019.0047>
- [3] **Nestor Berbel, Gabriel J. Capella, Jordi Zaragoza y Jose Luis Romeral (2021)**
“Performance Assessment of a Wide-Bandgap-Semiconductor Dual-Active-Bridge Converter for Electrical Vehicles”.
- [4] **Guía de programación 2 “Programming Guide ESP-IDF”- ESPRESSIF-IDF.**
<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/mcpwm.html>
- [5] **Tesis Doctoral de Javier Antonio Guacaneme Moreno (Diciembre de 2015)** “Control de puentes activos duales (DABs) en sistemas bidireccionales de alimentación con alta densidad de potencia.” <http://hdl.handle.net/10251/61627>
- [6] **Documento de investigación científica. Maximin Blanc, Yves Lembeye, Jean-Paul Ferrieux, Corentin Rizet, Arnaud Mahe, Taoufik Bensalah.**
“Optimization of a DC/DC dual active bridge converter for aircraft application.” <https://hal.science/hal-02278144/document>



PROGRAMAS UTILIZADOS

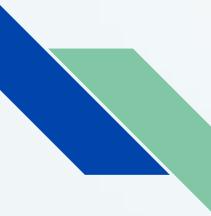
- *LTSpice XVII*
- *Altium Designer 19.0.15.446*
- *Github 2.39.1*
- *Visual Studio Code 1.78.0*
- *Lenguajes de programación:*
- *C en VSCode con extensión C/C++ v1.15.4*
- *Python 3.6.9 con extensión v2023.6.1*

*Control de versiones GITHUB: <https://github.com/TomiM-Git/DABREPO>
(Incluye comentarios de cada actualización del código).*



AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Córdoba, por su apoyo en el desarrollo de proyectos involucrados en el Control y modelado de procesos de dinámica lenta, media y rápida.



¡Gracias por su atención!

¿Preguntas?