

Diseño y Desarrollo de una Plataforma Experimental de Evaluación de Sistemas Híbridos Basados en Pilas de Combustible

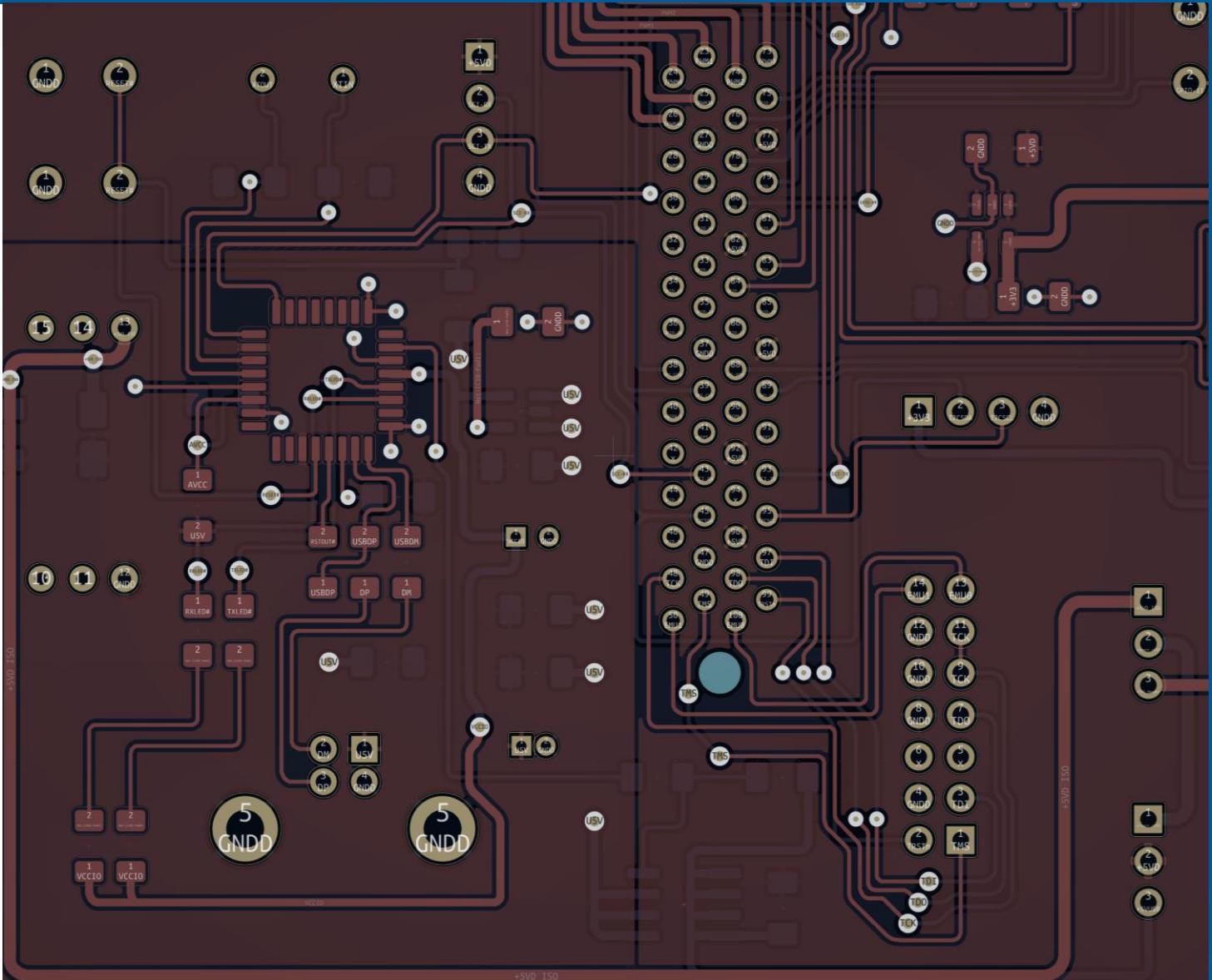
Proyecto Final | Tomás Tavella

Director: Ing. Jorge L. Anderson

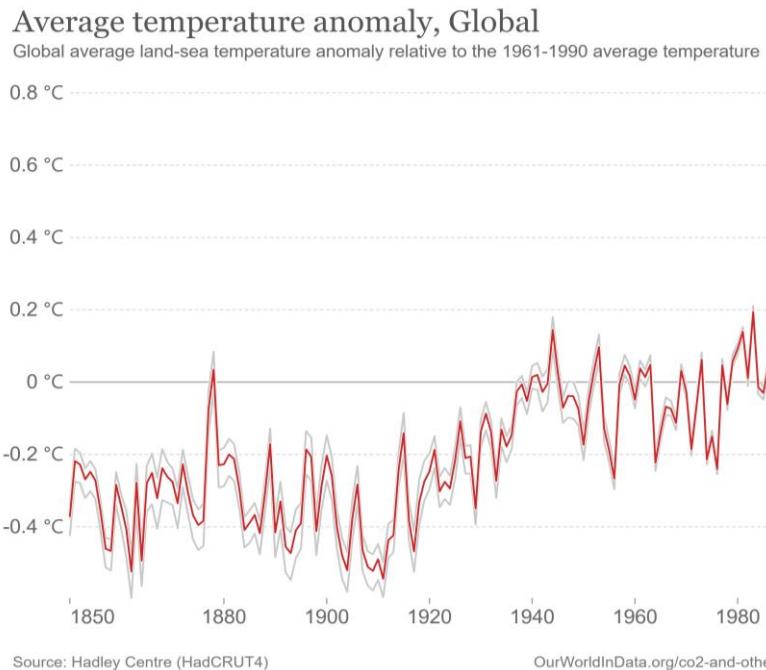
Co-Director: Dr. Ing. Paul F. Puleston

Contenidos

- I. Motivación
- II. Planteo
- III. Diseño
- IV. Implementación
- V. Ensayos
- VI. Conclusiones



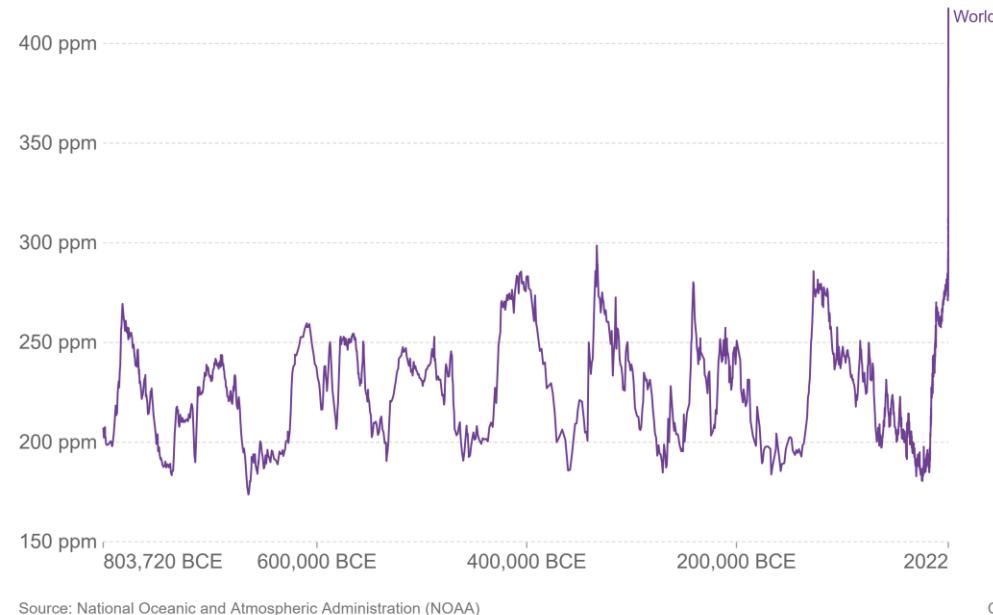
Calentamiento Global



Global atmospheric CO₂ concentration

Atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration is measured in parts per million (ppm).

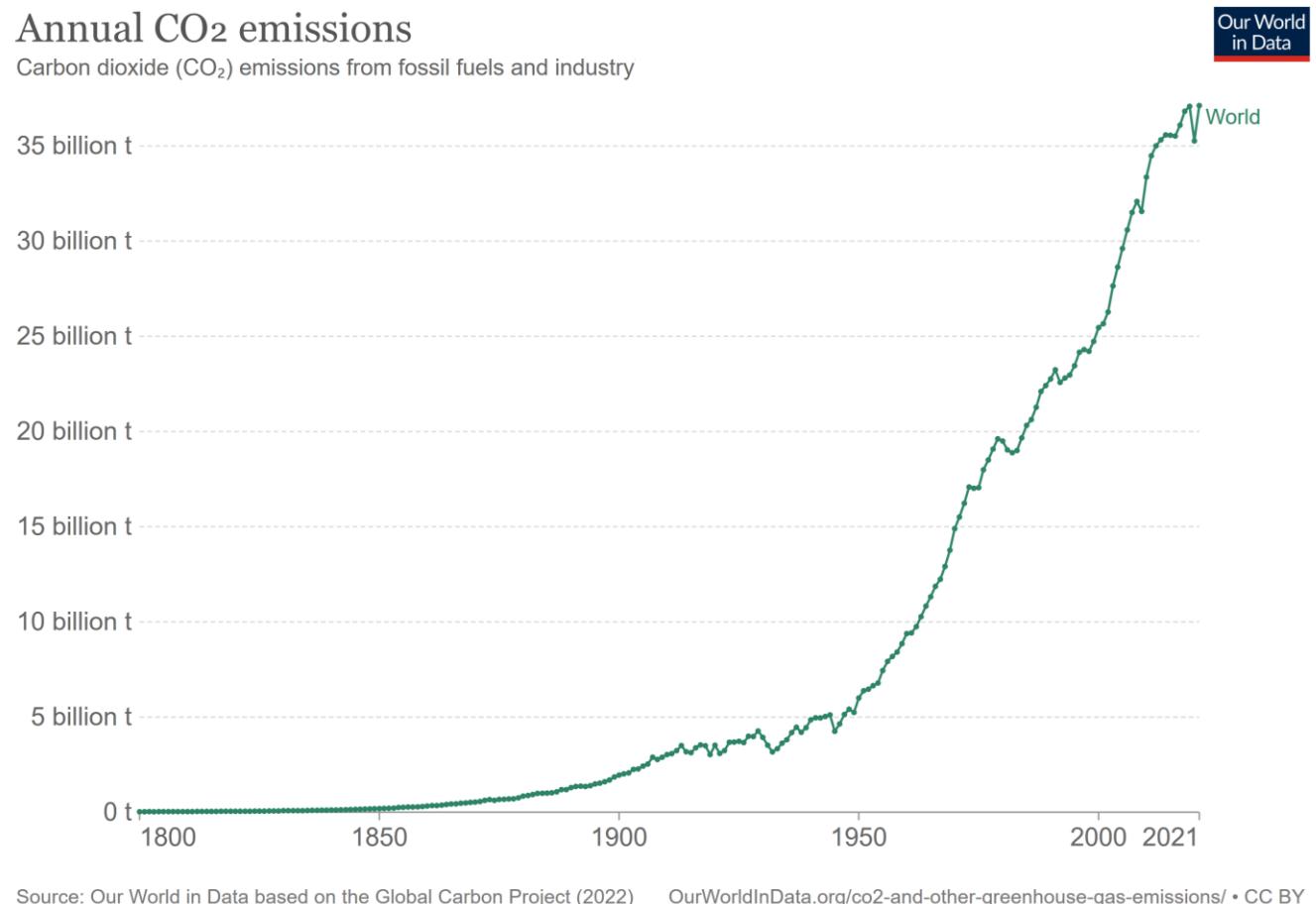
Our World
in Data



La temperatura media global ha aumentado más de 1 °C respecto del comienzo de la era industrial. Esto se corresponde con una concentración atmosférica de CO₂ casi duplicada respecto a tiempos prehistóricos.

Emisiones de CO₂

Desde mediados del siglo XIX, la emisión anual de dióxido de carbono ha aumentado a ritmo acelerado, superando ampliamente el crecimiento demográfico.



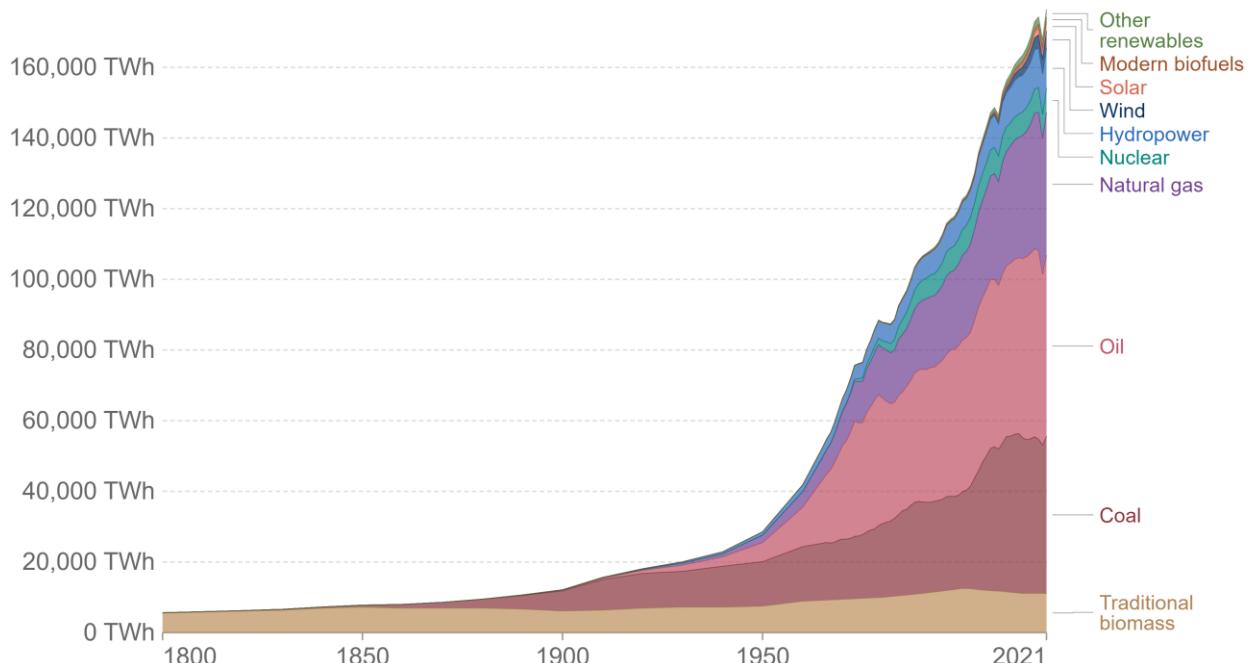
Consumo Energético

A pesar de todos los esfuerzos, en la actualidad el consumo global de energía continua siendo dominado por las fuentes de energía tradicionales.

Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method'

Our World
in Data

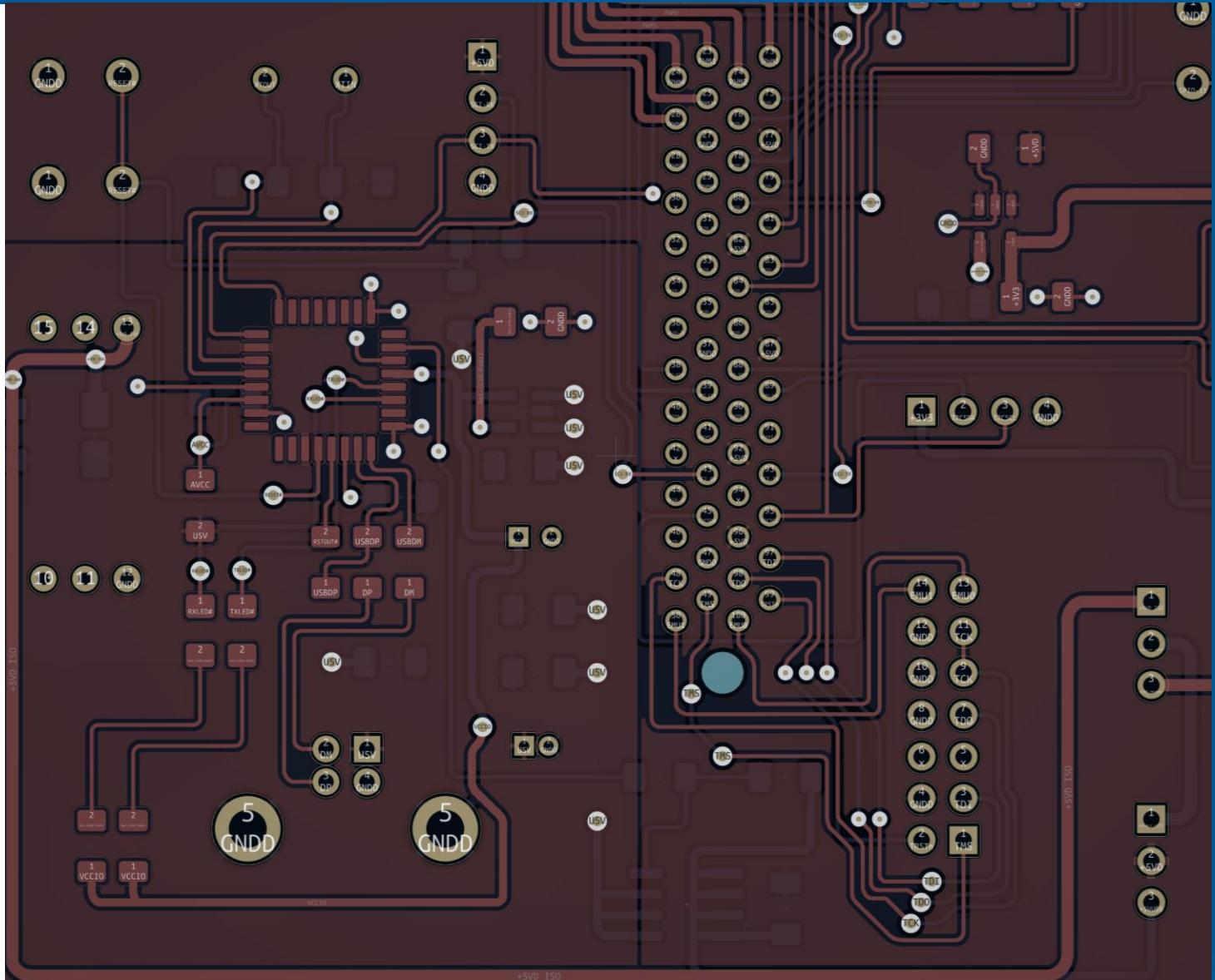


Source: Our World in Data based on Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

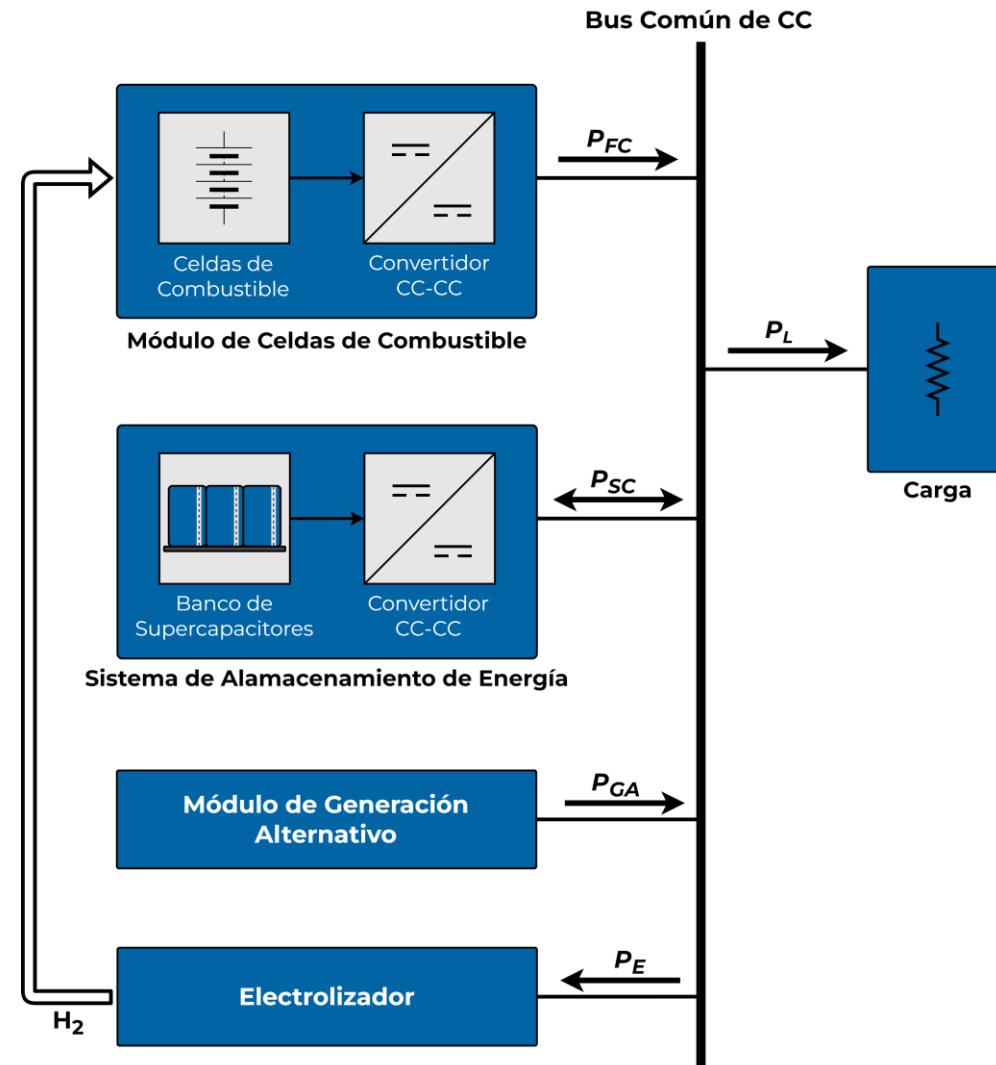
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Contenidos

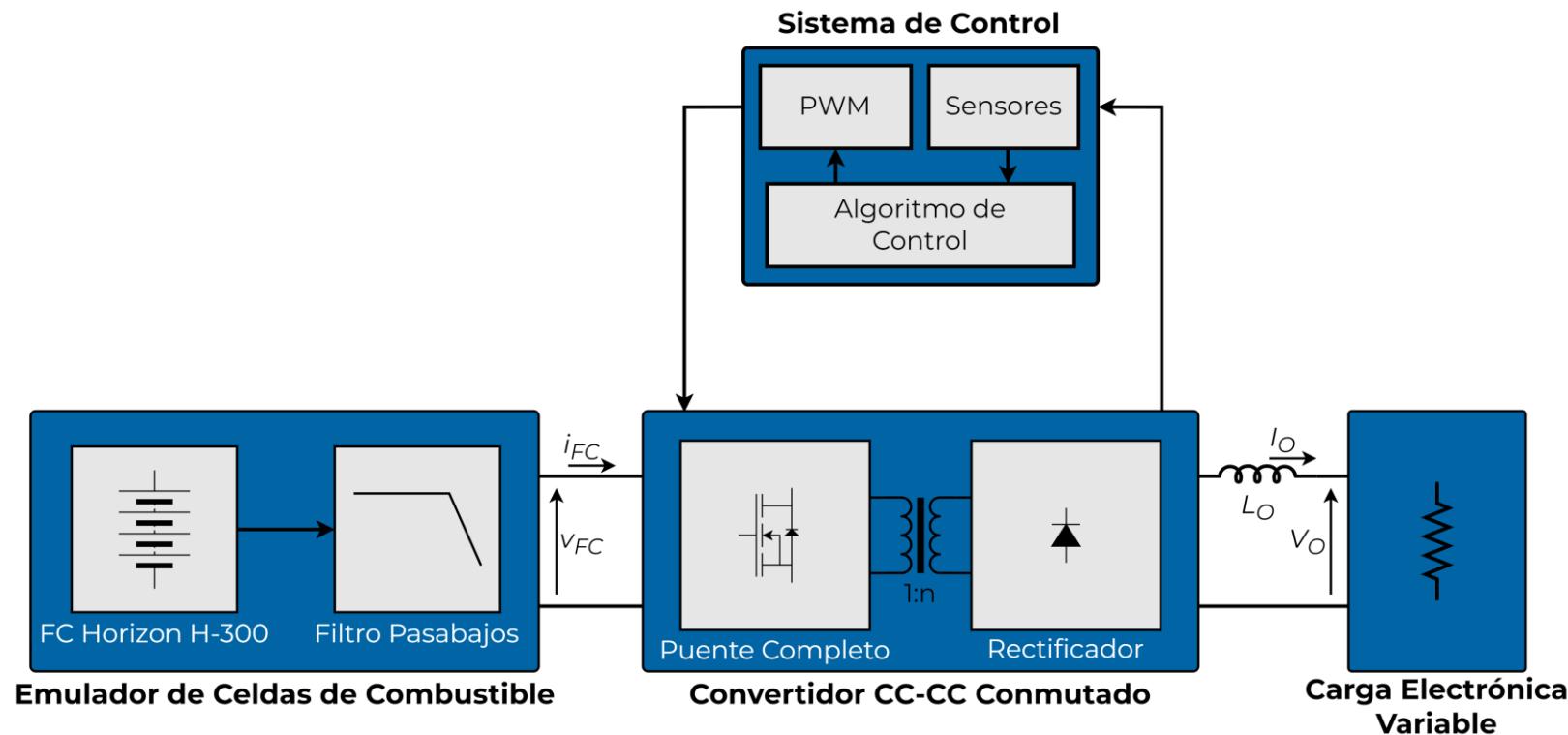
- I. Motivación
- II. Planteo**
- III. Diseño
- IV. Implementación
- V. Ensayos
- VI. Conclusiones



Sistema Híbrido de Generación de Energía

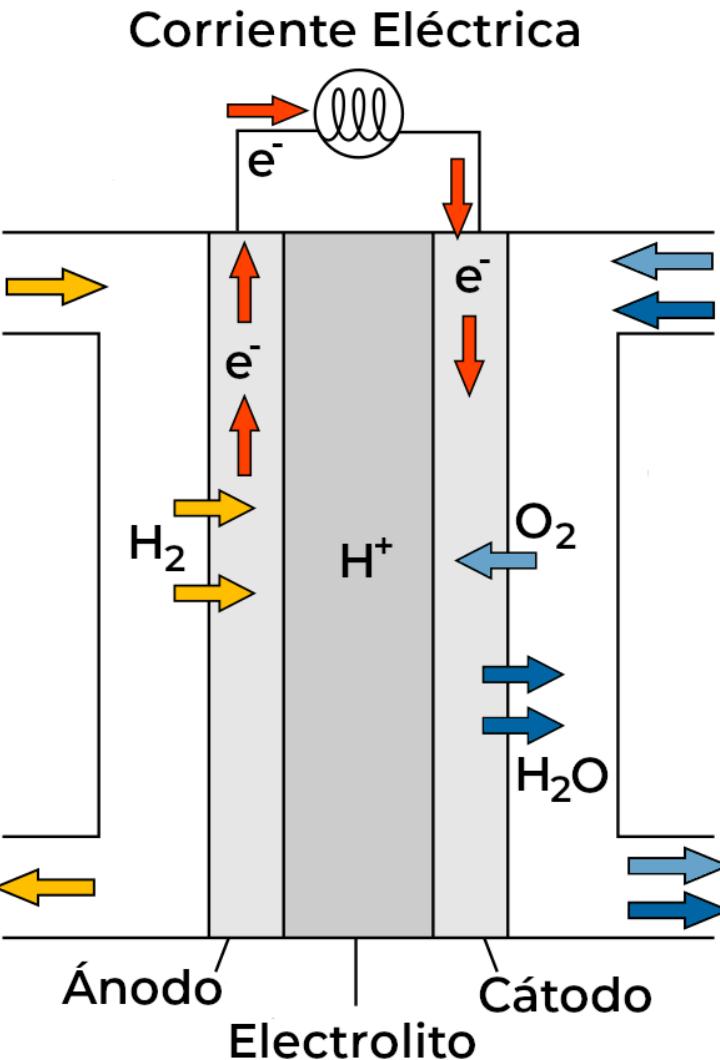
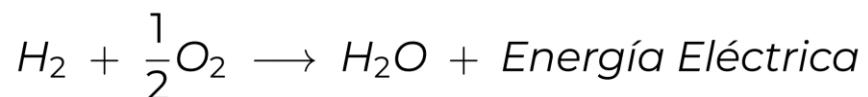


Módulo de Celdas de Combustible



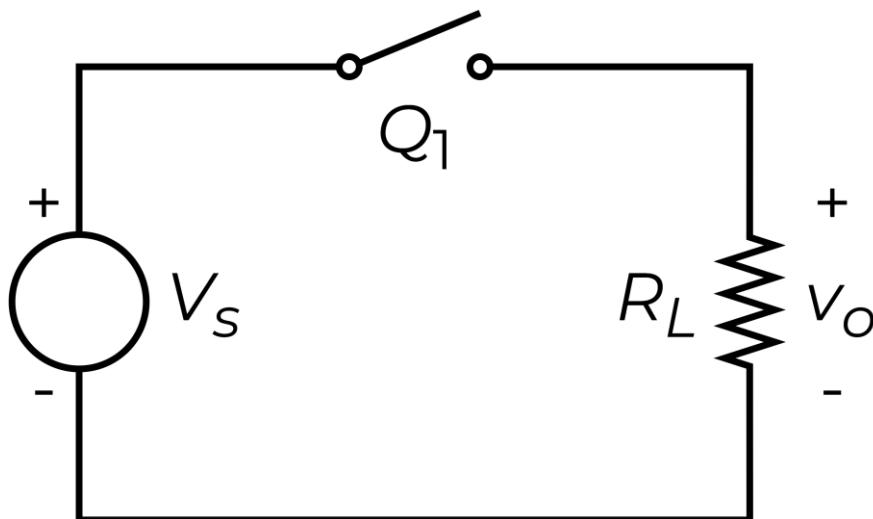
Celda de Combustible

Celda galvánica alimentada por combustible y comburente, que transforma la energía química libre de una reacción a energía eléctrica utilizable.

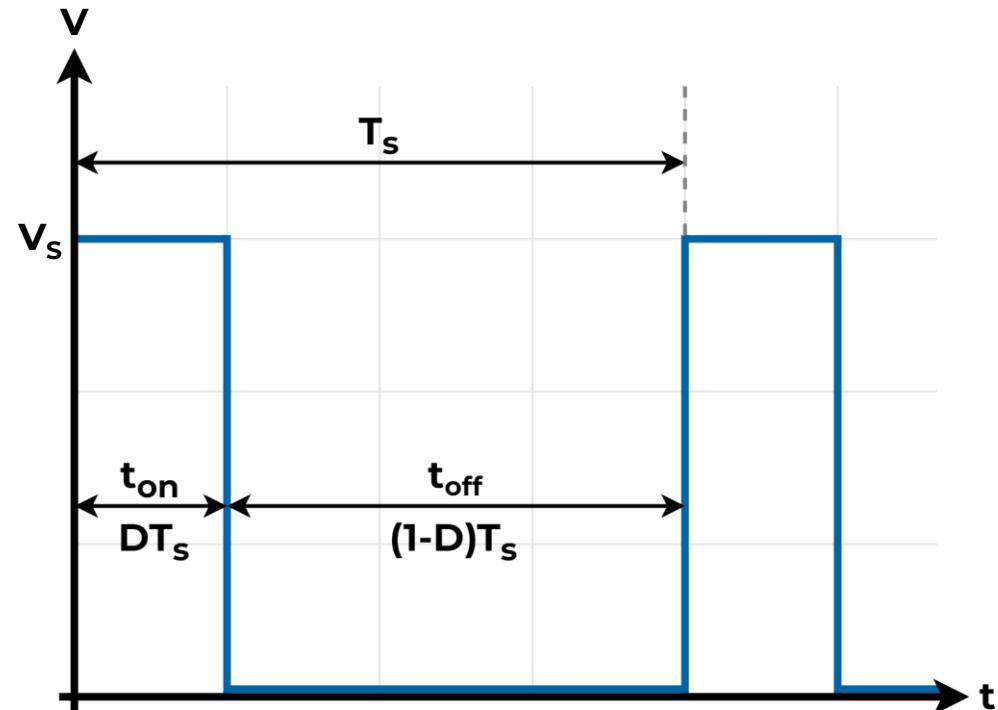


Convertidores CC-CC Conmutados

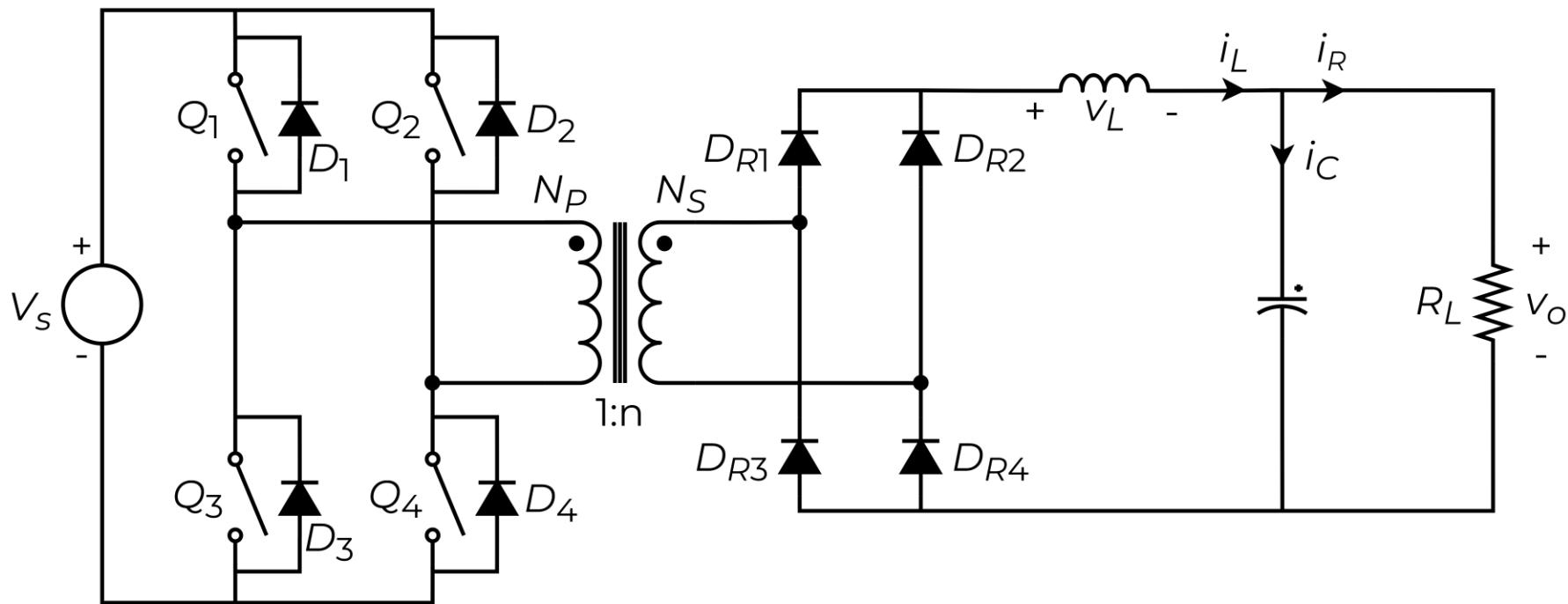
Principios Básicos



$$\bar{V}_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_s dt = V_s \cdot D$$

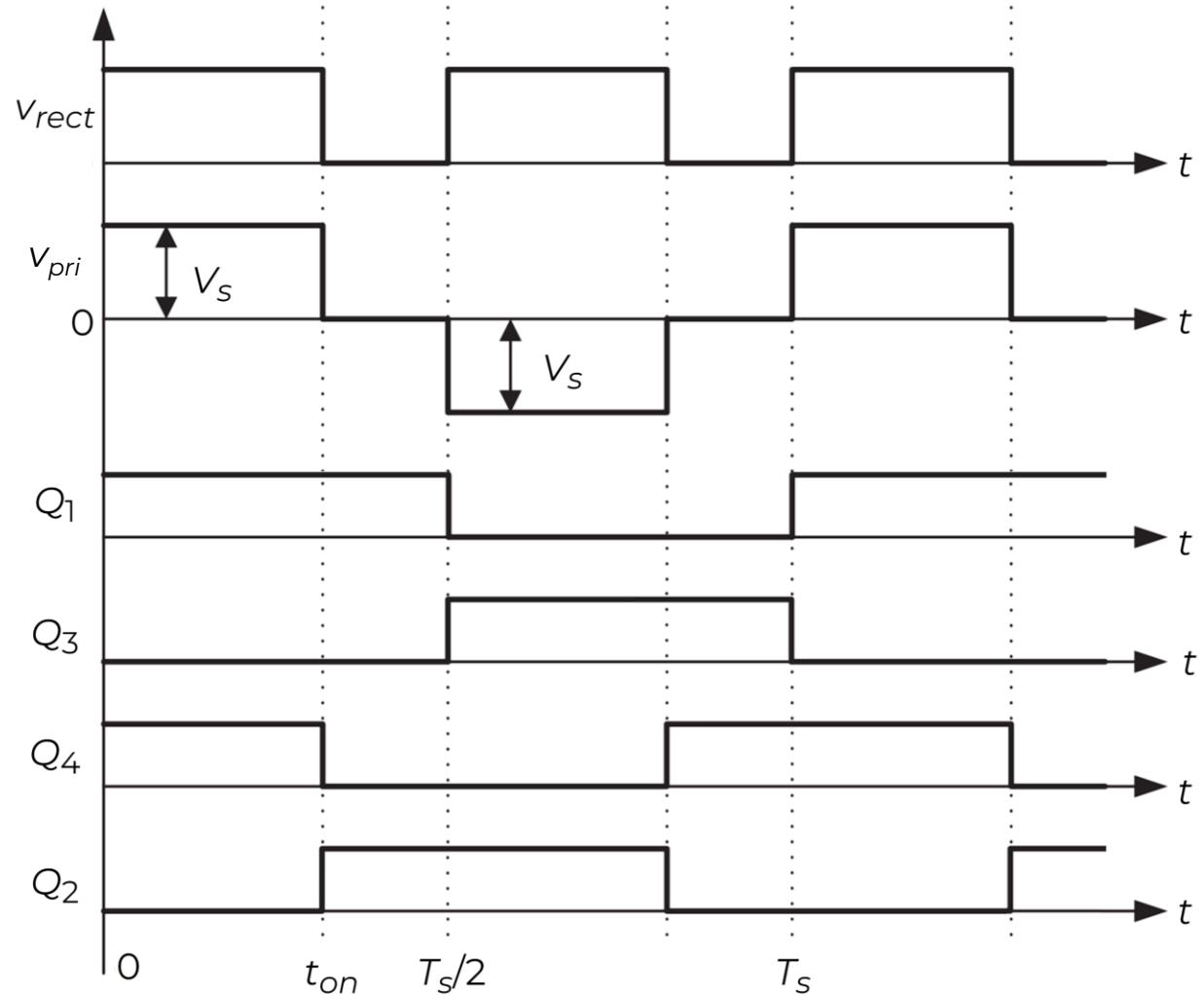


Convertidor CC-CC Conmutado Tipo Puente Completo



Formas de Onda del Convertidor

Para controlar la potencia de salida mediante el ciclo de trabajo, se utiliza el método de *phase-shift* o corrimiento de fase para comandar el disparo de las llaves.



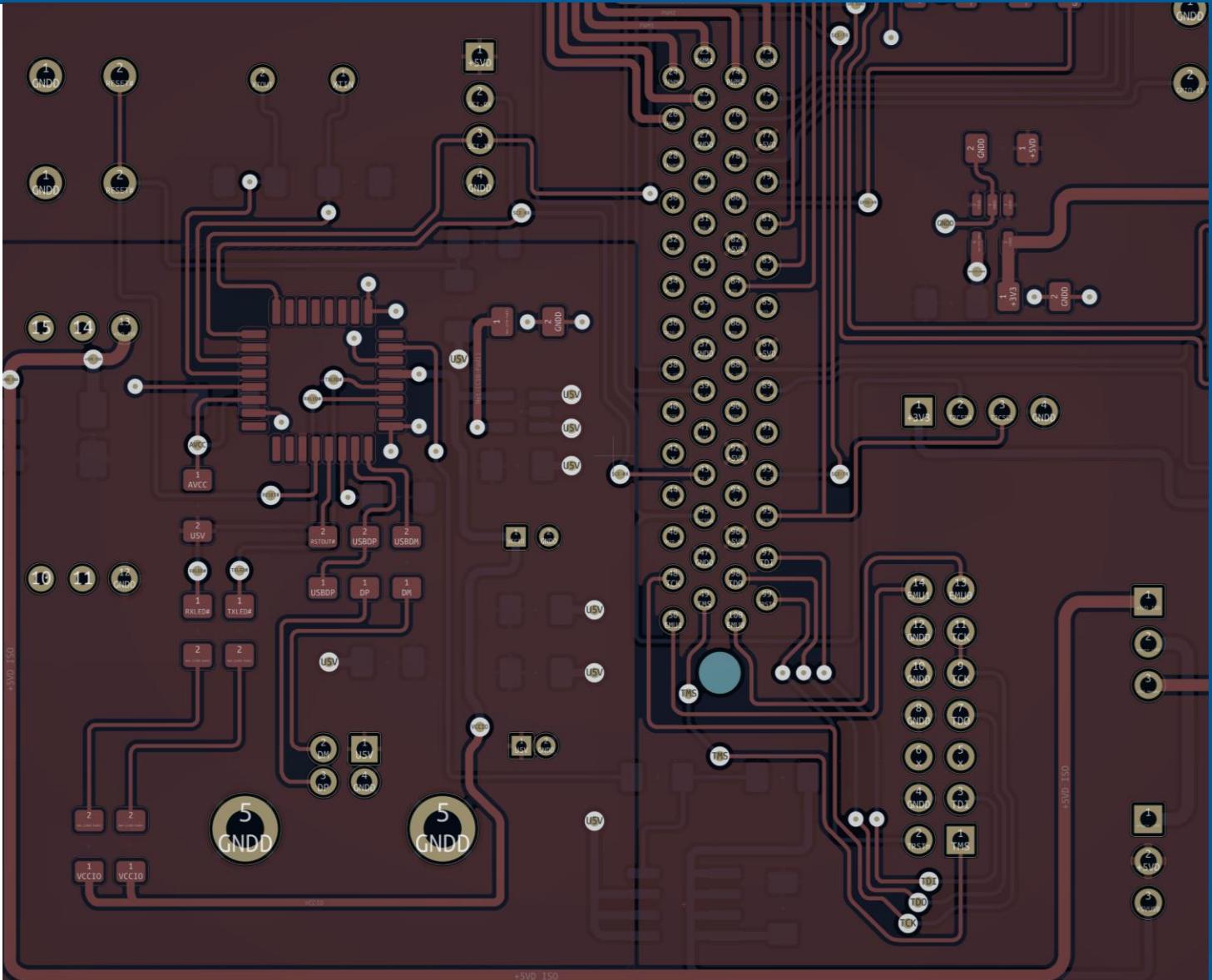
Sistema de Control

Es el “cerebro” de la plataforma, y se encarga de controlar todos sus parámetros:

- Adquiere e interpreta señales importantes de la plataforma.
- Comanda el disparo de las llaves del convertidor, para regular su funcionamiento.
- Se ocupa de la comunicación de datos hacia el exterior.

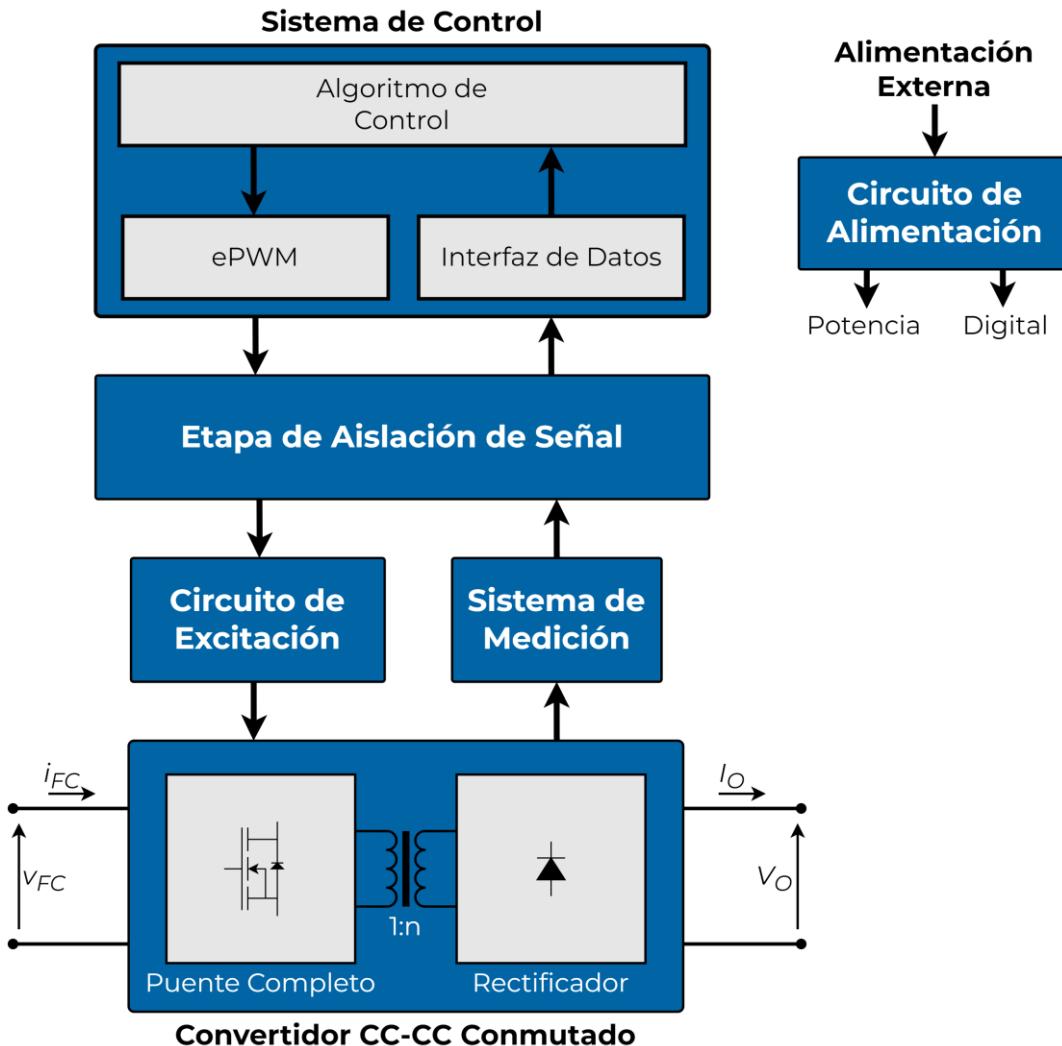
Contenidos

- I. Motivación
- II. Planteo
- III. Diseño**
- IV. Implementación
- V. Ensayos
- VI. Conclusiones



Sistema Completo

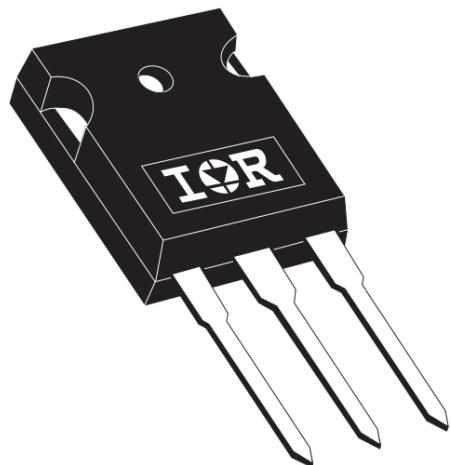
Además del convertidor, la plataforma cuenta con otros circuitos auxiliares, como los de medición y aislación, que completan el sistema.



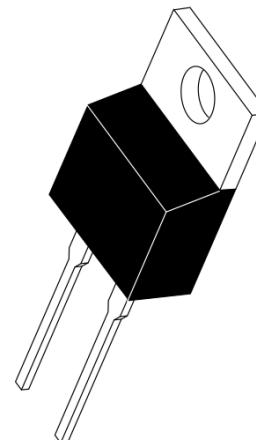
Diseño del Convertidor

- **Potencia nominal P_N** 300 W
- **Tensión de salida V_o** 75 V
- **Corriente máxima de salida I_o** 4 A
- **Corriente máxima de entrada I_{FC}** 10 A
- **Tensión máxima de entrada $V_{FC(máx)}$** 45 V
- **Tensión mínima de entrada $V_{FC(min)}$** 28 V
- **Frecuencia de conmutación f_s** 20 kHz
- **Ripple de corriente de inductor $\Delta I_{Lf(máx)}$** 0,8 A
- **Ripple de tensión de salida $\Delta V_{out(máx)}$** 75 mV

Diseño del Convertidor: Llaves y Diodos

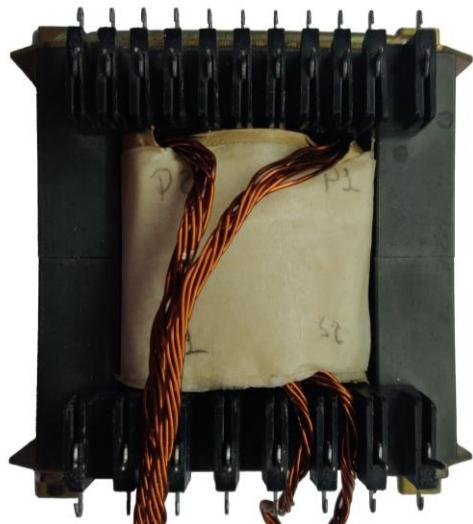


MOSFET IRFP150
100 V | 42 A | 75 ns

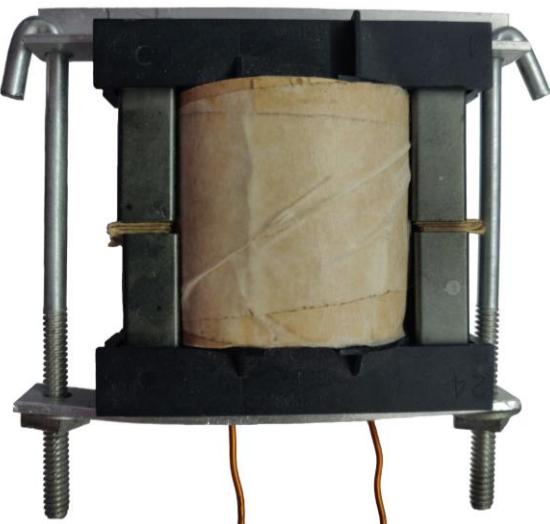


Diodo MUR860
600 V | 8 A | 60 ns

Diseño del Convertidor: Transformador y Filtro de Salida



Transformador
Relación de vueltas 3,6



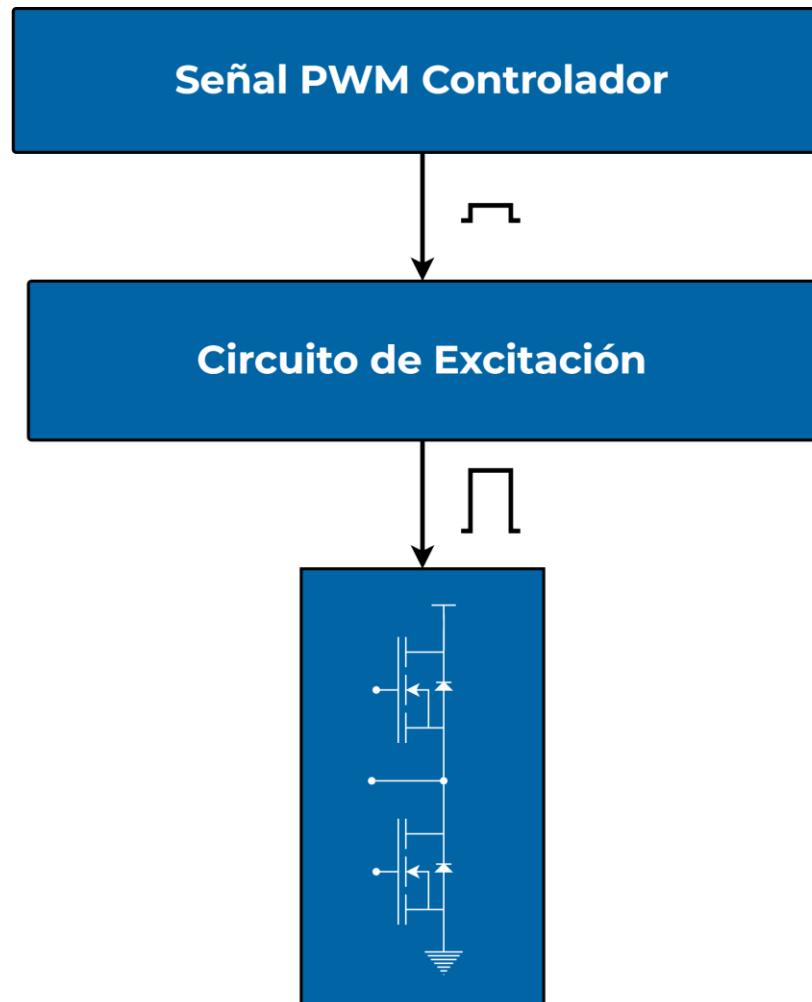
Inductor L_f
1,2 mH



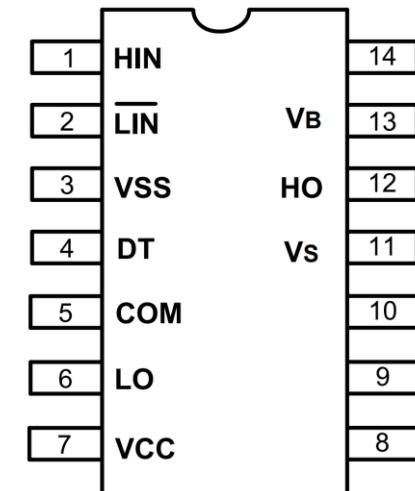
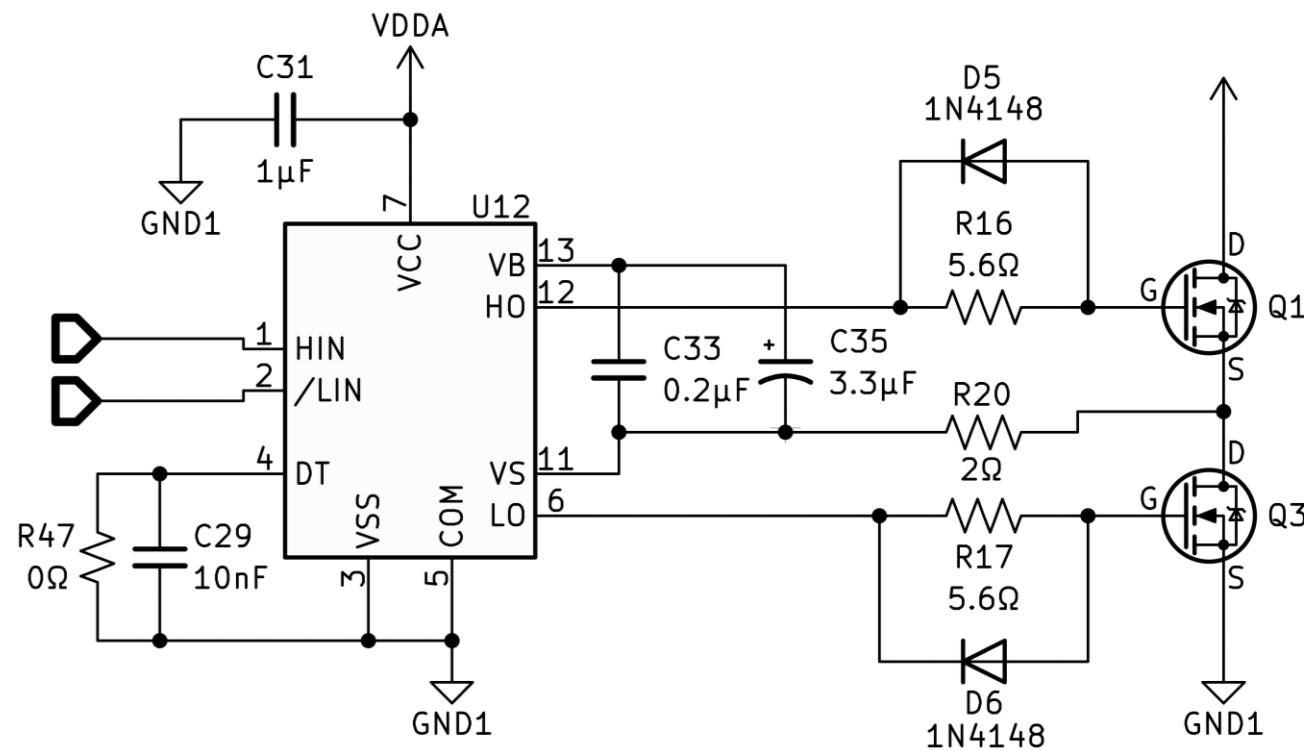
Capacitor C_f
680 μ F | 200 V

Círculo de Excitación (*Driver*)

Círculo encargado de elevar las tensiones y corrientes entregadas por el sistema de control a niveles adecuados para el disparo de las llaves de potencia del convertidor.

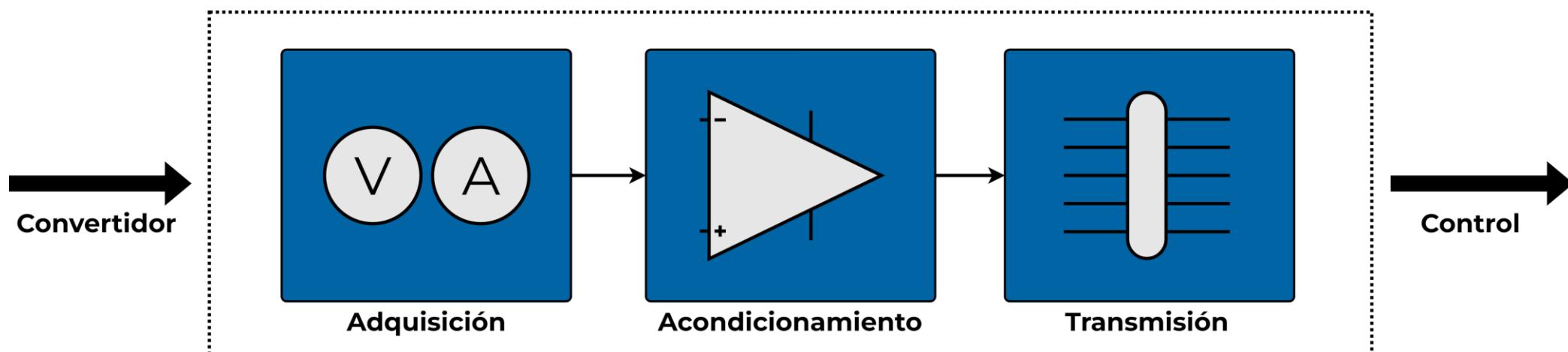


Diseño y Selección del Circuito de Excitación



Driver de Medio Puente
2ED21834-S06J

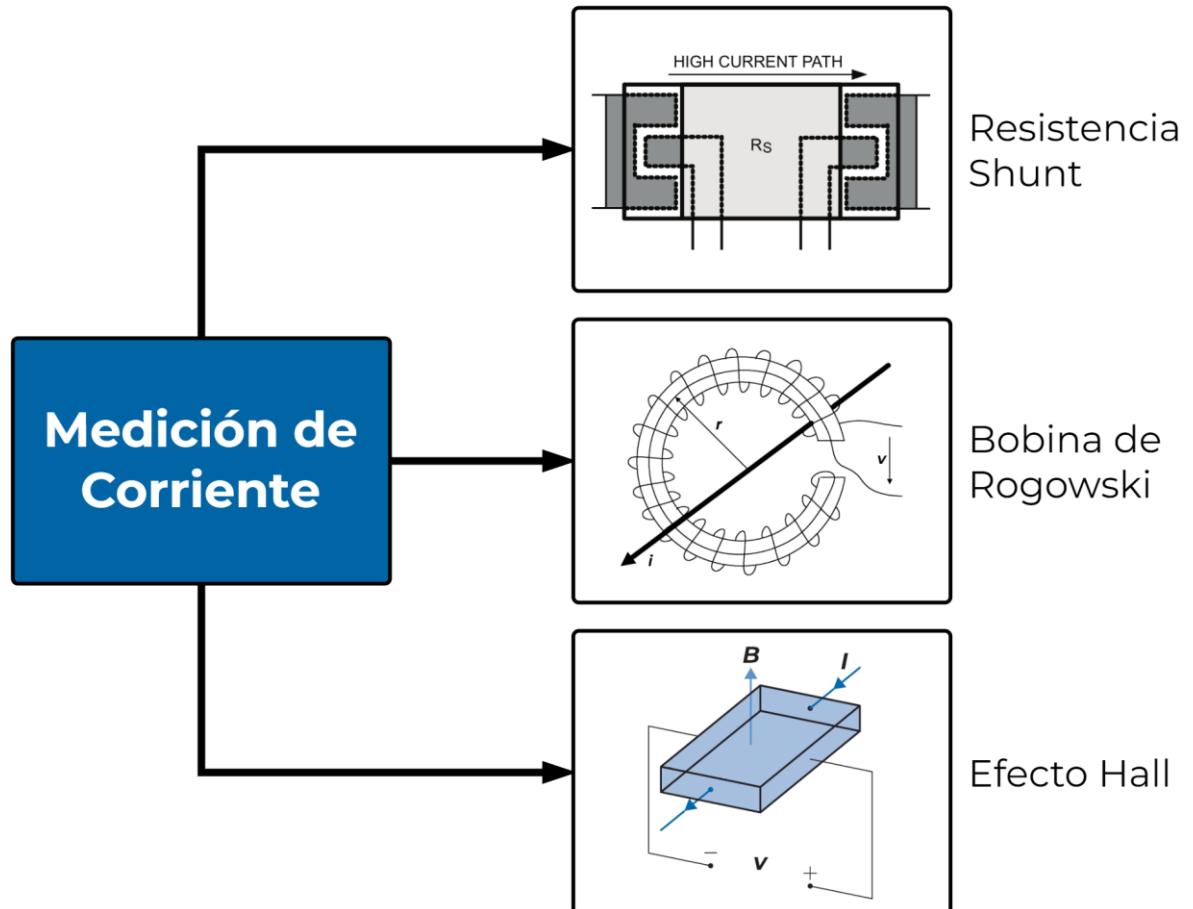
Sistema de Medición



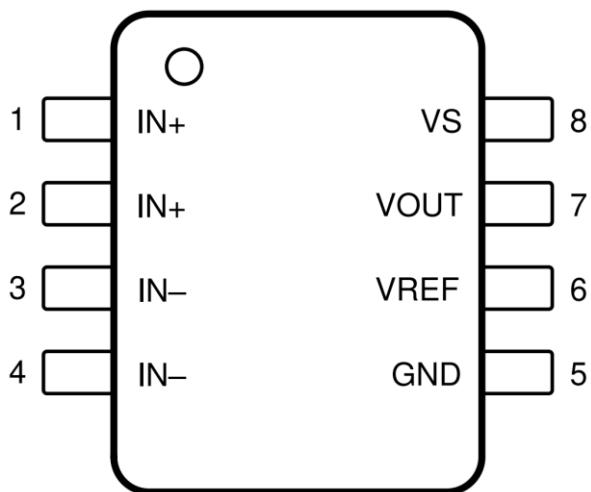
Sistema de Medición: Adquisición

Para el control de la plataforma, se deben adquirir únicamente señales de tensión y corriente:

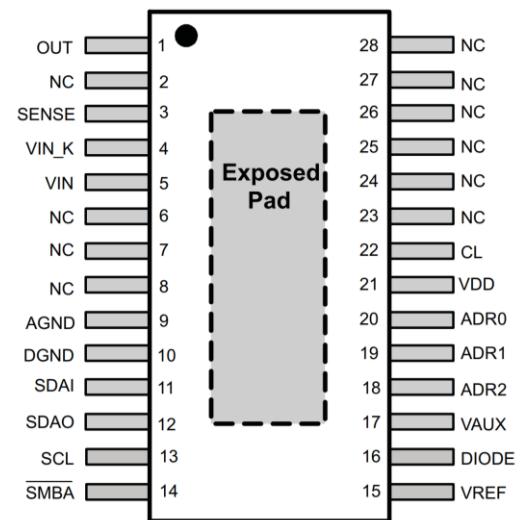
- Tensión de entrada v_{FC}
- Corriente de entrada i_{FC}
- Tensión de salida v_o
- Corriente de salida i_o



Sensores Seleccionados



TMCS1100A4 – Efecto Hall
Corriente de salida i_o
Salida Analógica



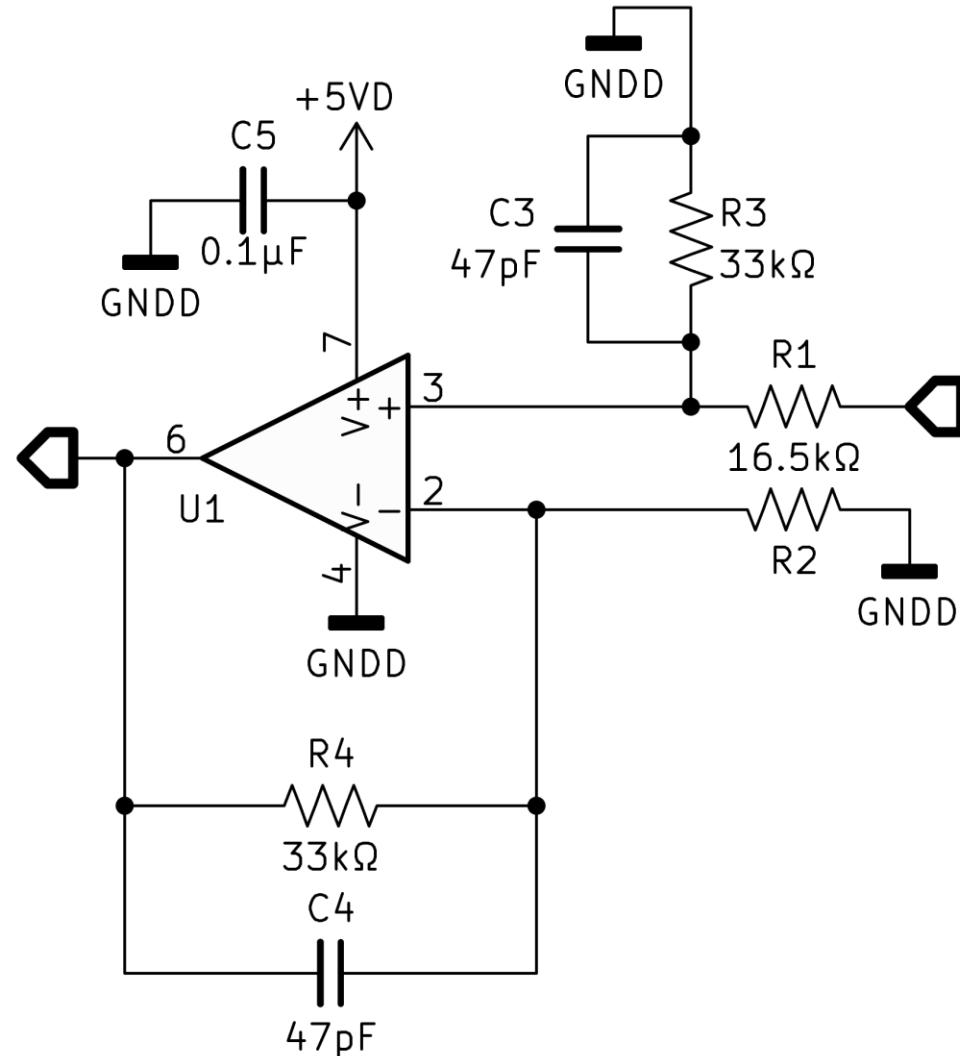
LM5056A – Resistencia Shunt
Señales restantes
Salida Digital

Sistema de Medición: Acondicionamiento

La salida del sensor de corriente de salida TMCS1100A4, requiere adaptar sus niveles de tensión a los del conversor analógico-digital del controlador.

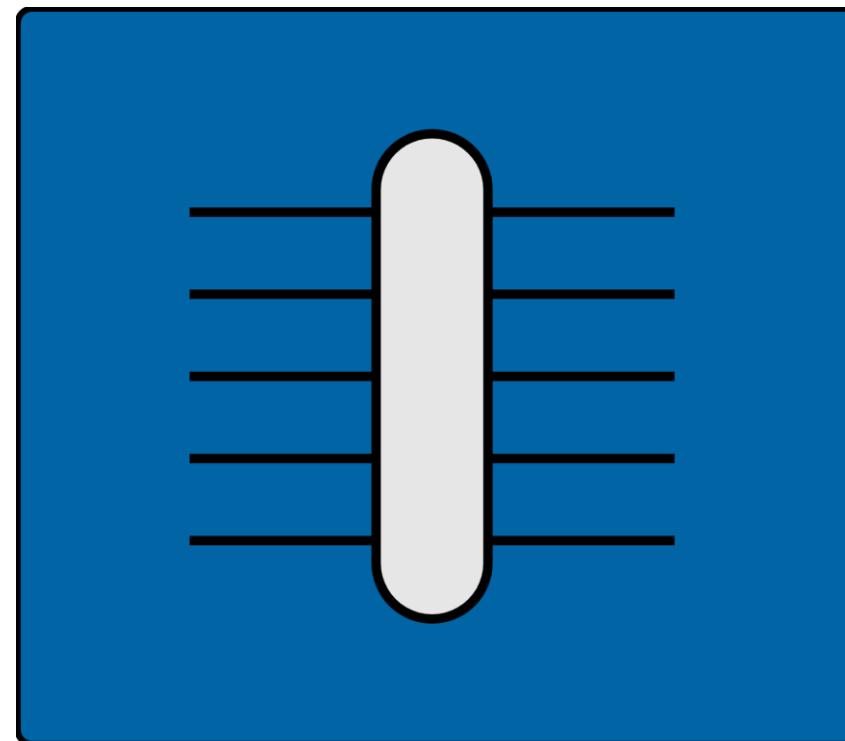
$$G_{cc} = \frac{V_{max(ADC)}}{V_{max(Sensor)}} = \frac{3V}{1,8V} \approx 1,67$$

$$G_{cc} = \frac{Z_3}{R_1} = \frac{Z_4}{R_2} = 1,673$$



Sistema de Medición: Transmisión

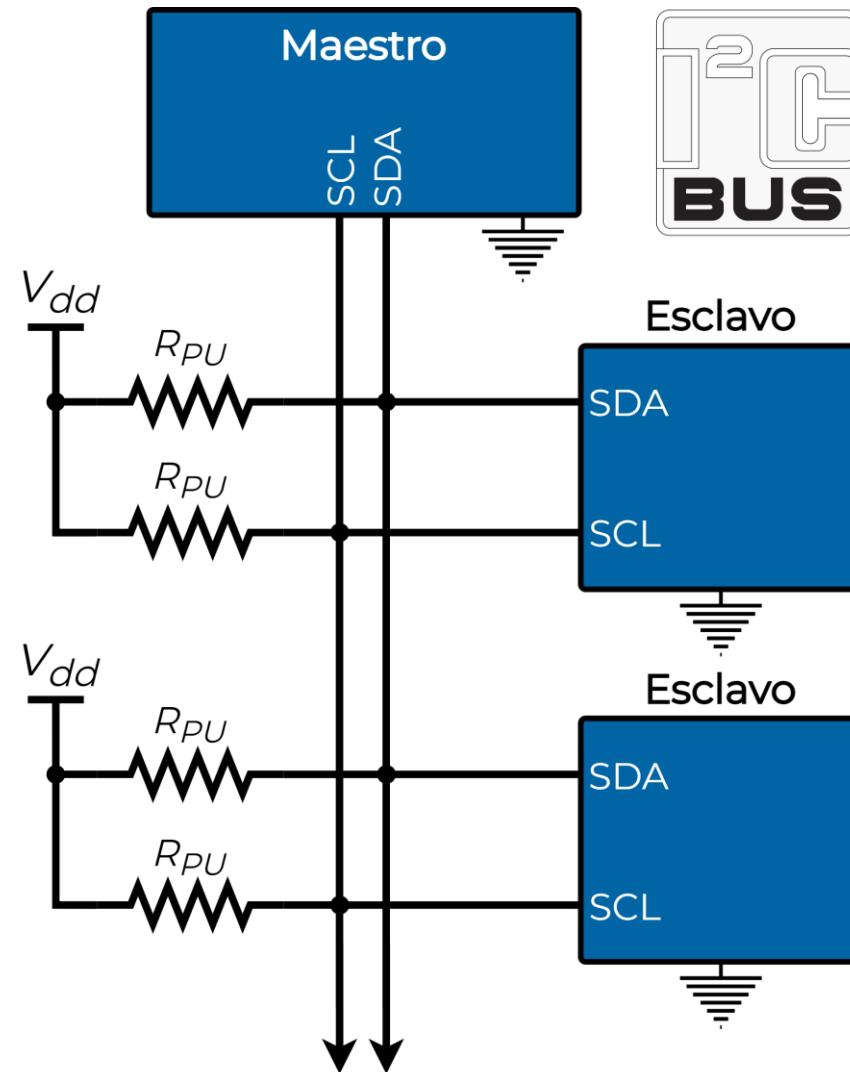
En el caso del LM5056A, no es necesario el acondicionamiento de las señales: su salida de datos ya es digital y compatible con el controlador, mediante el uso del protocolo I²C.



Protocolo I²C

Define un bus de comunicación serie sincrónico y multi-dispositivo, con líneas de datos (SDA) y reloj (SCL) bidireccionales.

- Maestro/Esclavo
- Half-Duplex
- Open-Drain



Etapa de Aislación de Señal

Etapa encargada de separar galvánicamente los componentes y señales digitales de los circuitos de alta corriente de la plataforma:

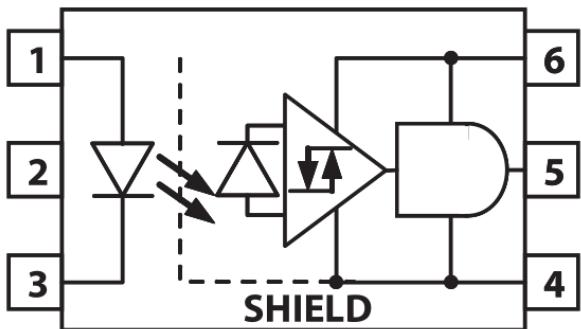
- Señales PWM
- Datos y reloj del bus I²C
- Señal de corriente del TMCS1100
- Fuentes de alimentación

Etapa de Aislación de Señal

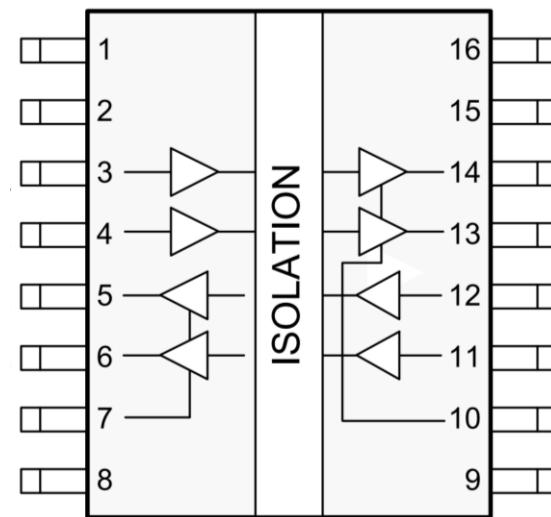
Etapa encargada de separar galvánicamente los componentes y señales digitales de los circuitos de alta corriente de la plataforma:

- **Señales PWM**
- **Datos y reloj del bus I²C**
- Señal de corriente del TMCS1100
- Fuentes de alimentación

Aisladores Seleccionados



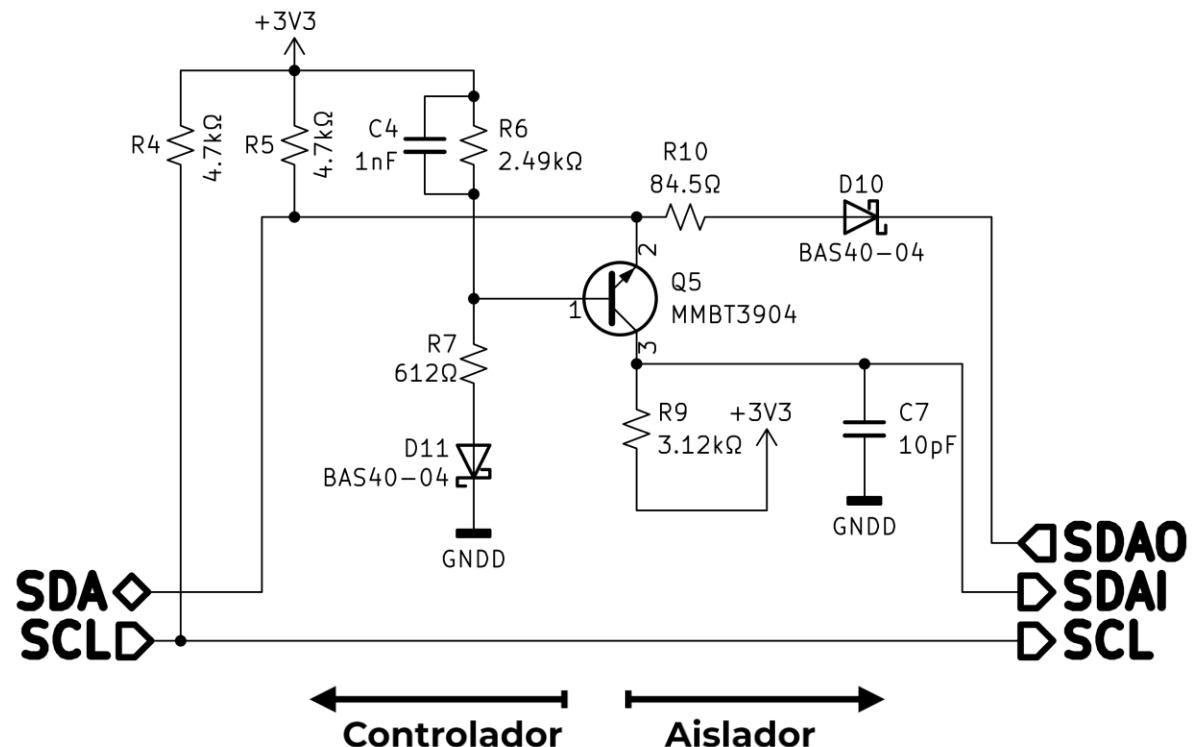
Optoacoplador
ACPL-P480
Señales PWM



Aislador Digital SiO₂
ISO7242C
Datos y reloj I²C

Separación de Línea de Datos I²C

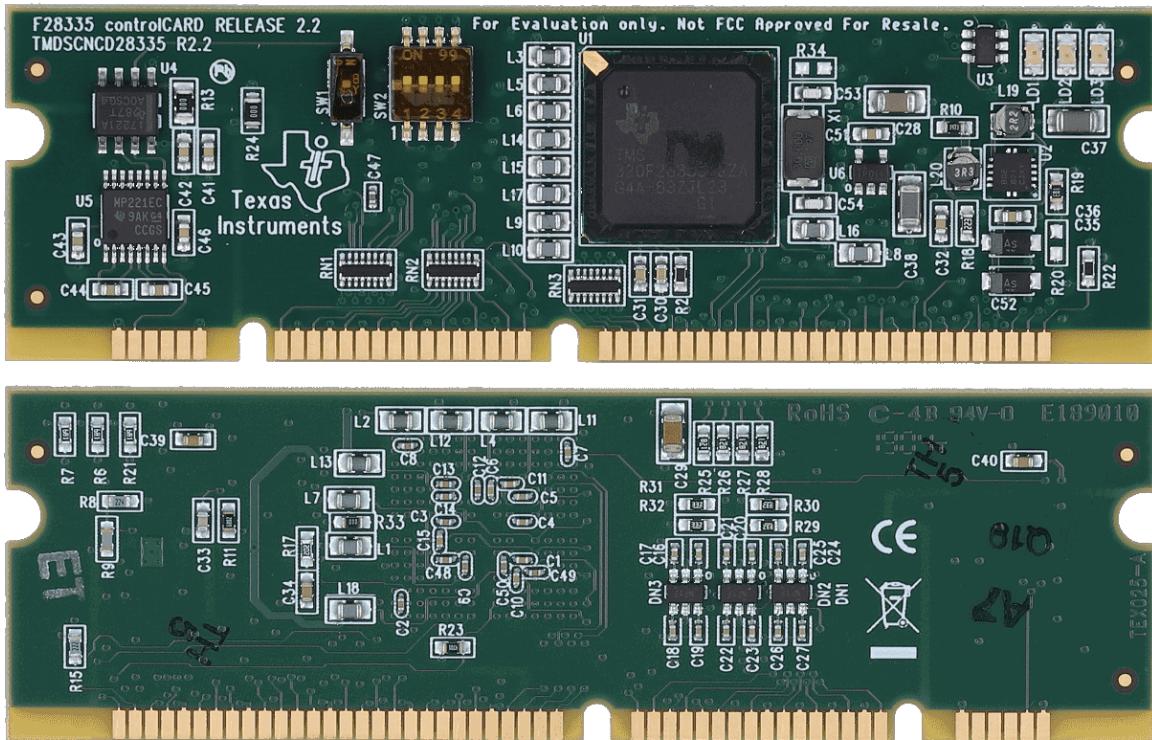
Circuito que divide la línea de datos bidireccional SDA del bus en dos líneas unidireccionales, SDAO y SDAI. Necesario para poder utilizar el bus I²C con el aislador unidireccional ISO7242C.



Sistema de Control

Se utilizó un controlador digital de señales (DSC) TMS320F28335 de la serie C2000® de controladores de 32 bits de tiempo real de Texas Instruments.

- Hasta 150 MHz
- Memoria flash 256K x 16 bits
- Arquitectura Harvard

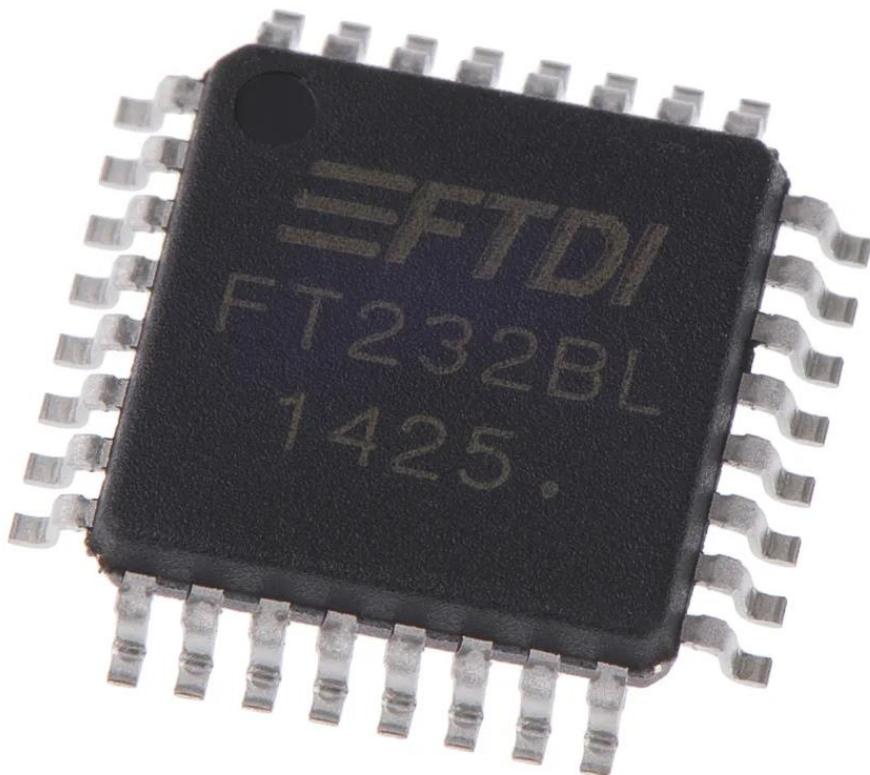


Periféricos Importantes

- Módulo ePWM de 6 canales
- Conversor A-D de 12 bits y 80 ns
- Bus I²C
- Módulo UART (SCI)
- 88 puertos GPIO configurables

Comunicación USB

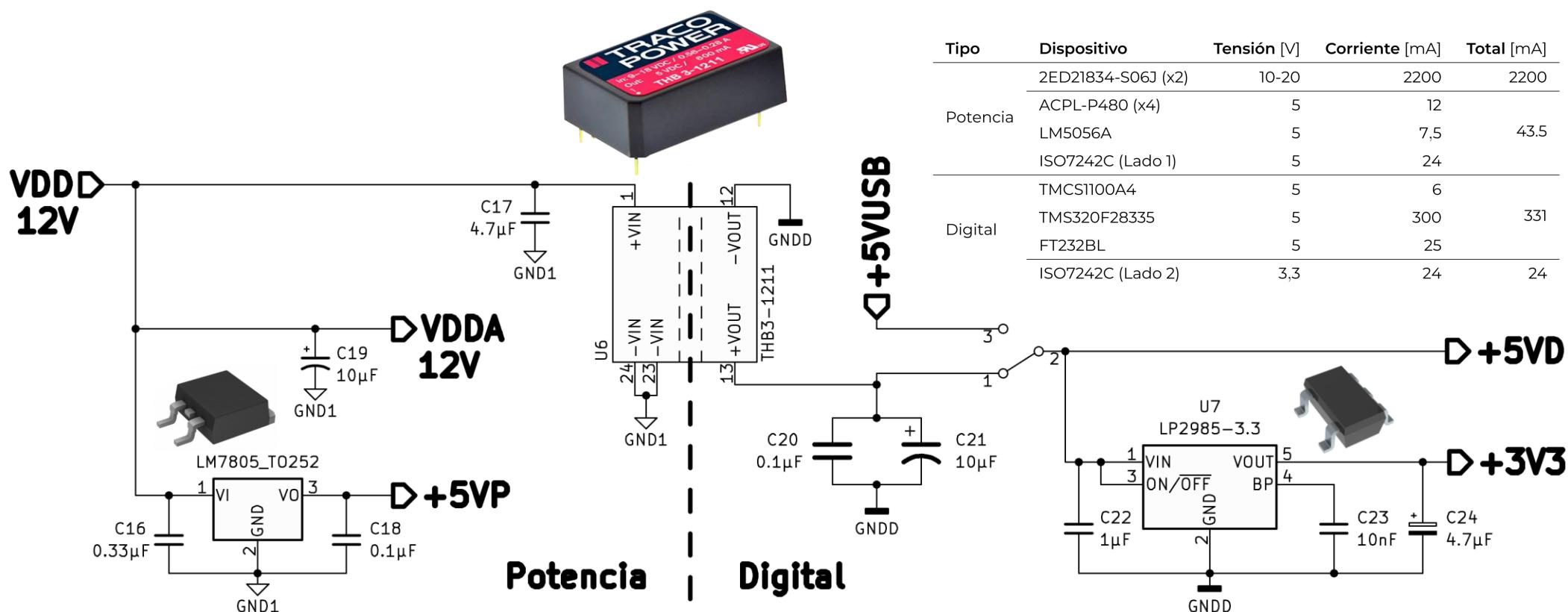
Se utilizó el integrado UART-USB FT232BL de FTDI Chip y un módulo UART del controlador para implementar comunicación a través de un puerto USB.



Círculo de Alimentación

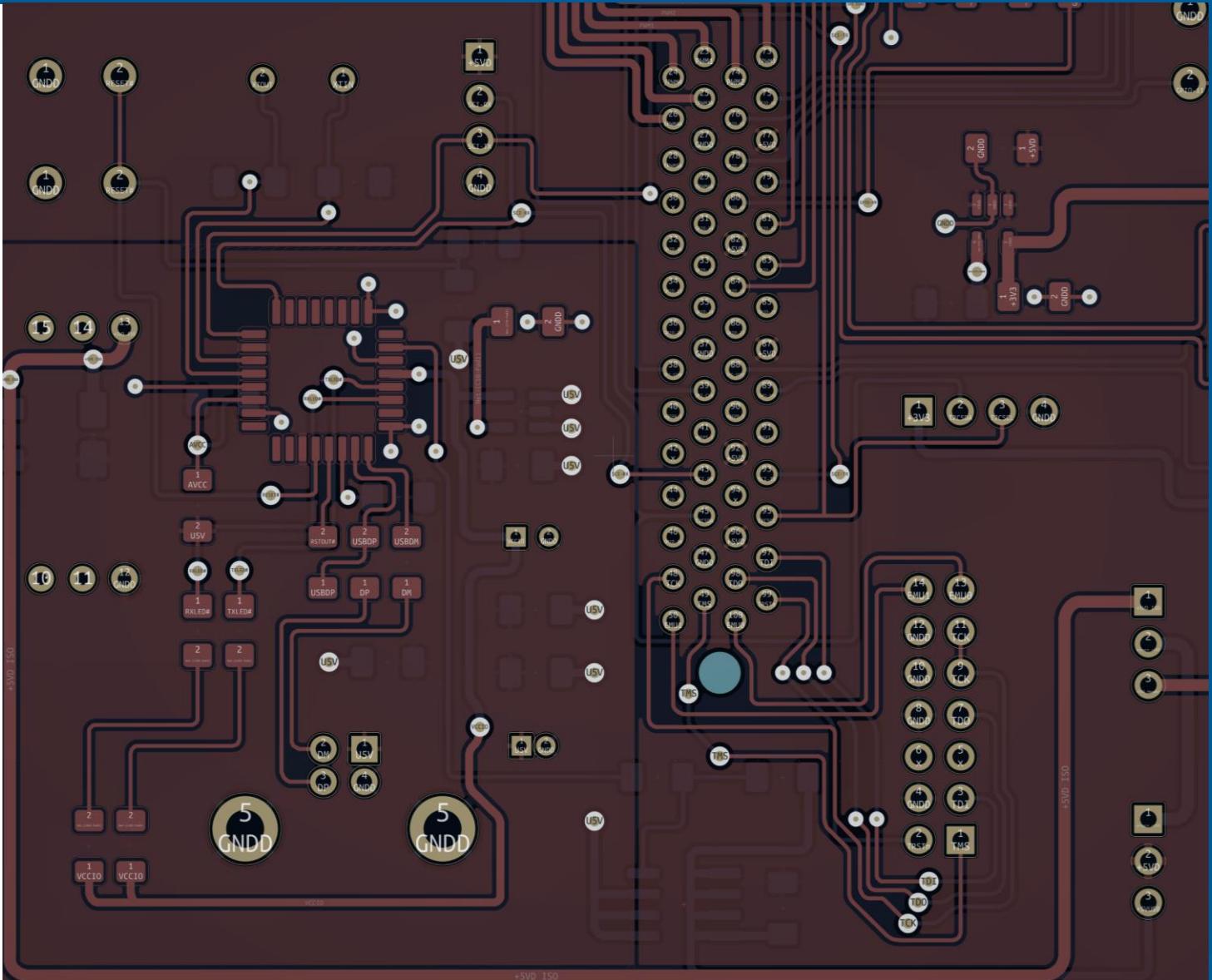
Tipo	Dispositivo	Tensión [V]	Corriente [mA]	Total [mA]
Potencia	2ED21834-S06J (x2)	10-20	2200	2200
	ACPL-P480 (x4)	5	12	
	LM5056A	5	7,5	43.5
	ISO7242C (Lado 1)	5	24	
Digital	TMCS1100A4	5	6	
	TMS320F28335	5	300	331
	FT232BL	5	25	
	ISO7242C (Lado 2)	3,3	24	24

Circuito de Alimentación

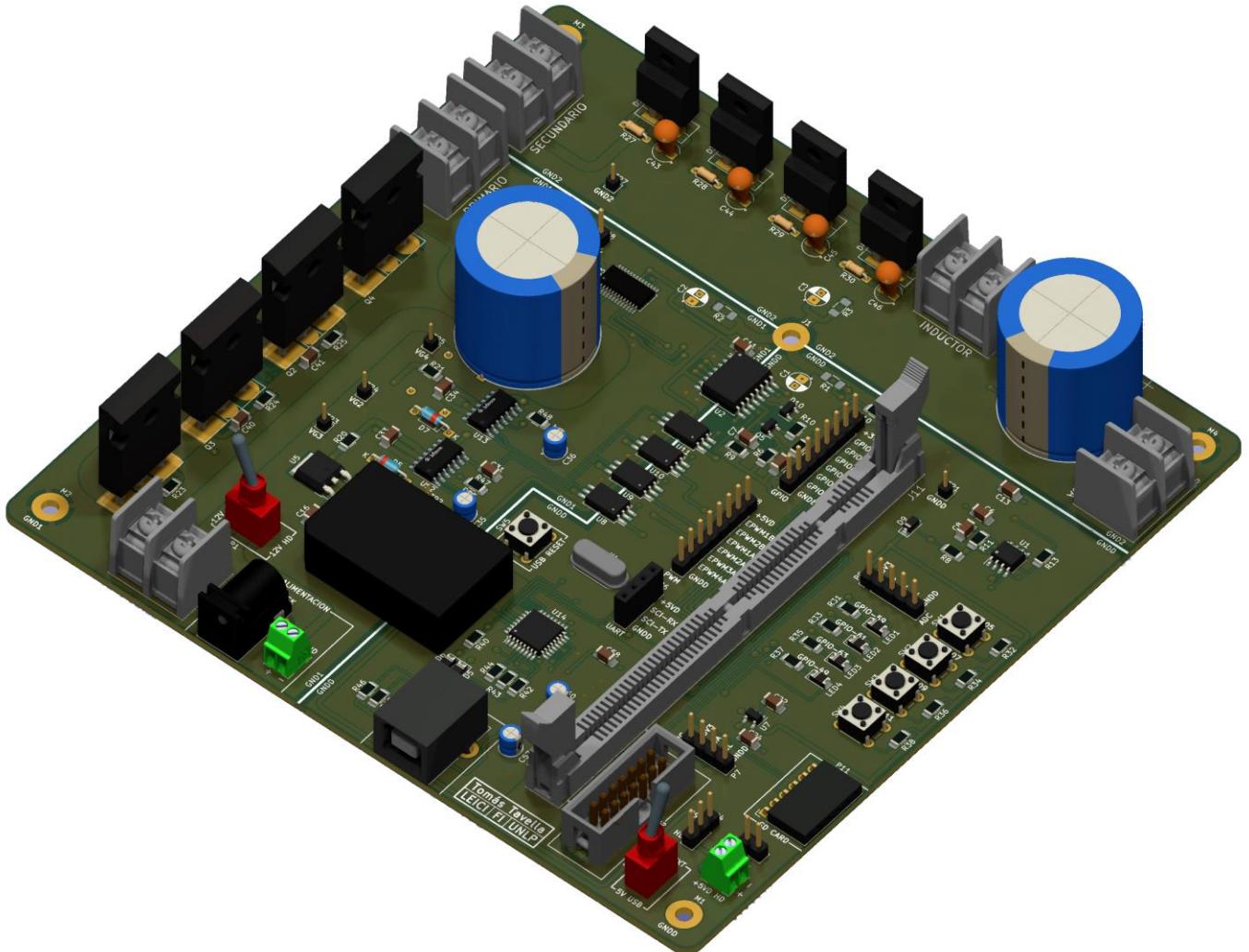


Contenidos

- I. Motivación
- II. Planteo
- III. Diseño
- IV. Implementación**
- V. Ensayos
- VI. Conclusiones

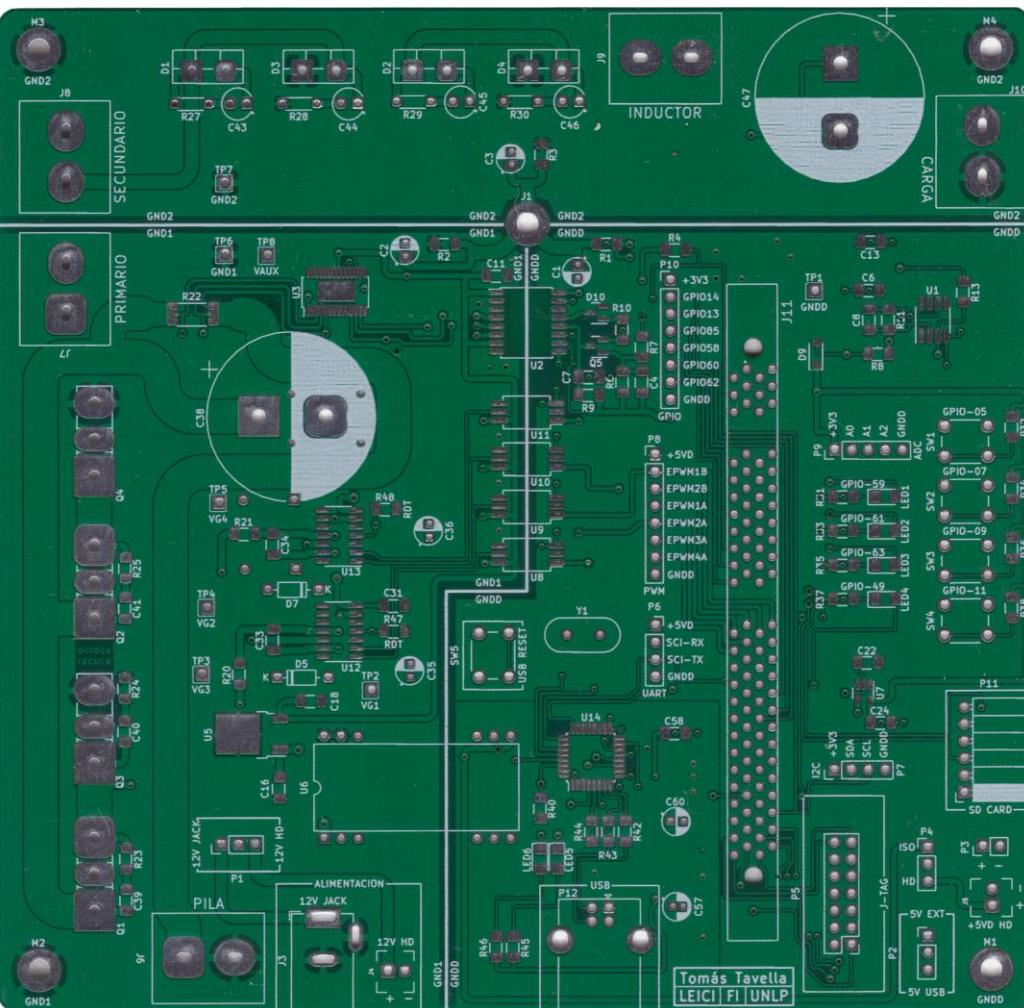


Implementación



Placa de Circuito Impreso (PCB)

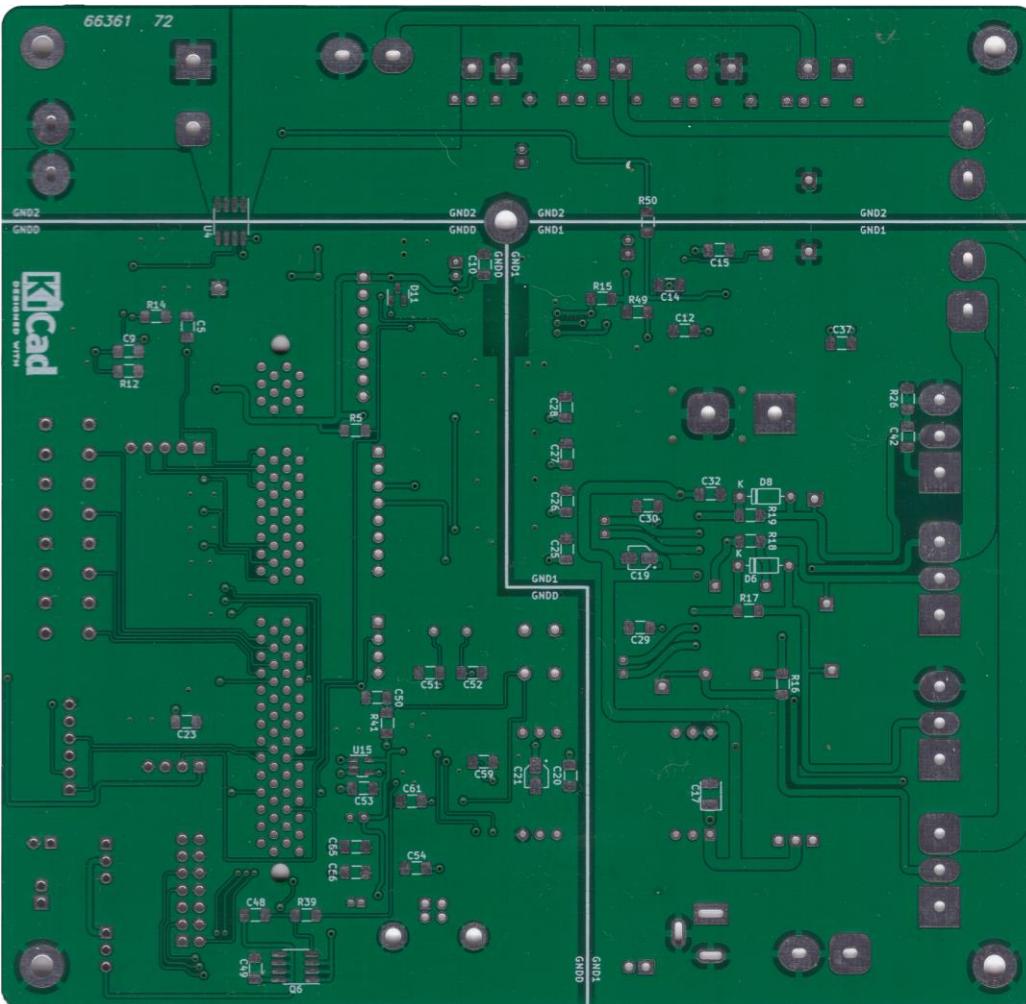
- Doble capa de cobre de 0,035 mm
- Dieléctrico FR-4 de 1,51 mm
- Máscaras anti-estaño de 0,01 mm
- 15 cm x 15 cm (450 cm²)
- Vías y orificios PTH

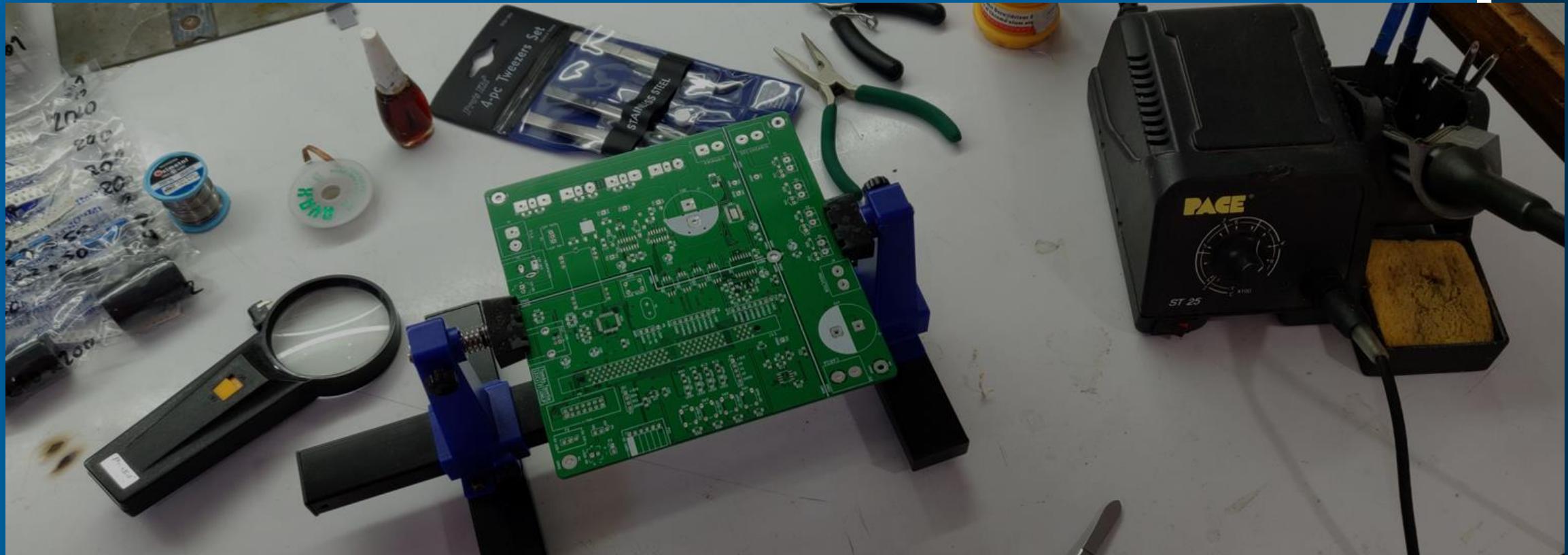


Placa de Circuito Impreso (PCB)

Para el proceso de diseño de la placa de circuito impreso, se siguió el siguiente proceso:

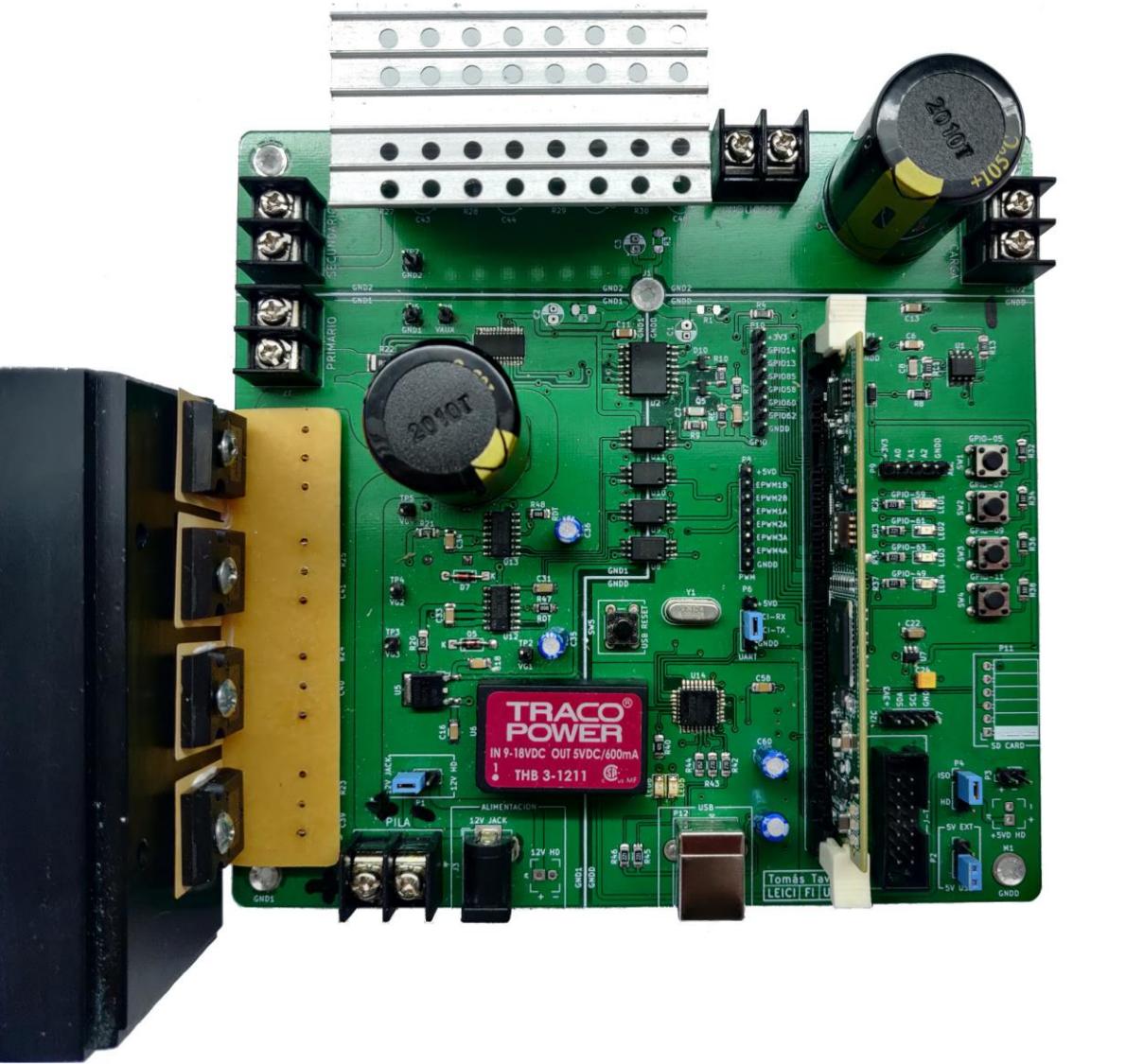
- Asignación de *footprints* a cada componente
- Disposición de cada footprint
- Trazado y dimensionamiento de las pistas de cobre





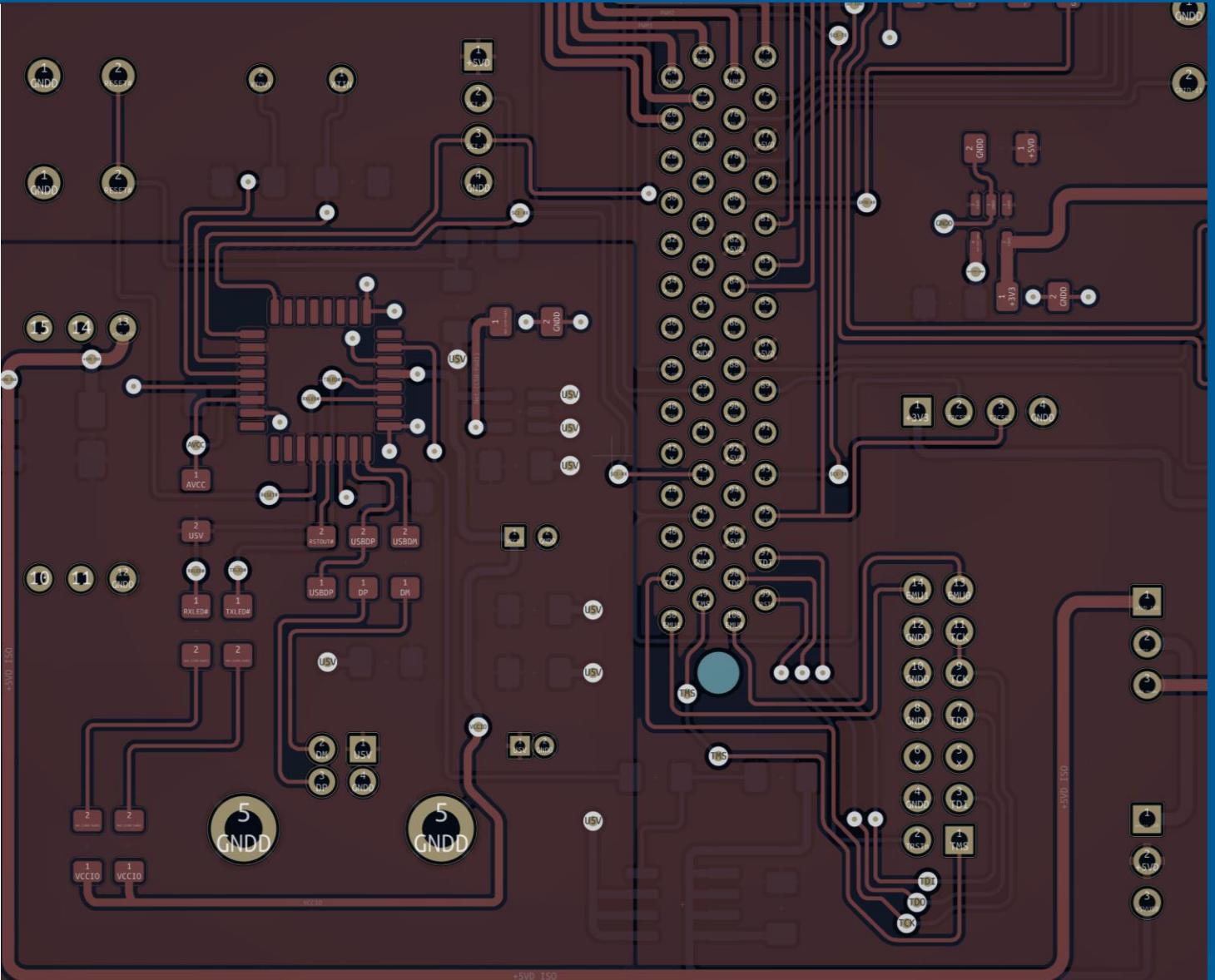
Soldadura de Componentes

Resultado Final



Contenidos

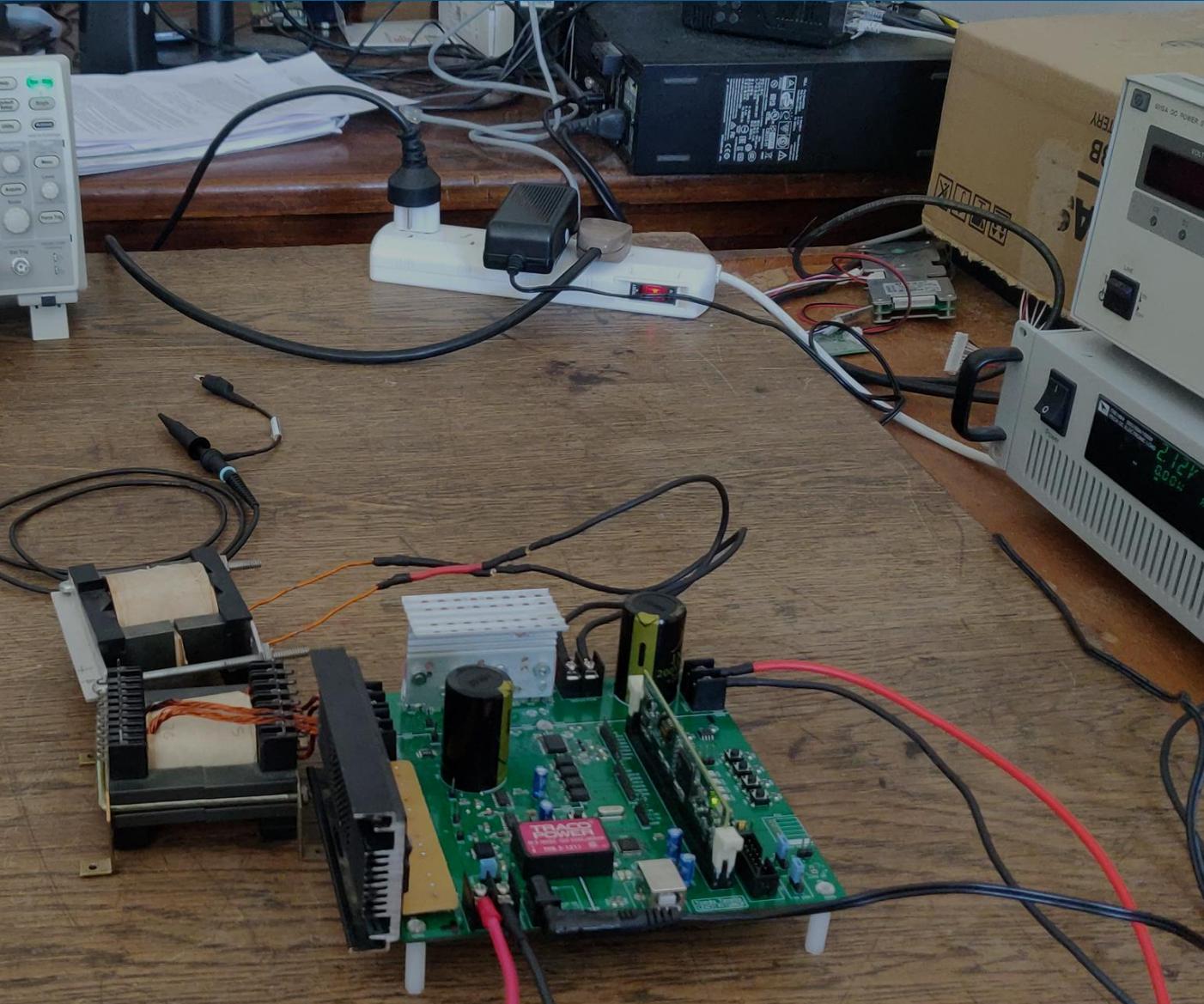
- I. Motivación
- II. Planteo
- III. Diseño
- IV. Implementación
- V. Ensayos**
- VI. Conclusiones



Ensayos

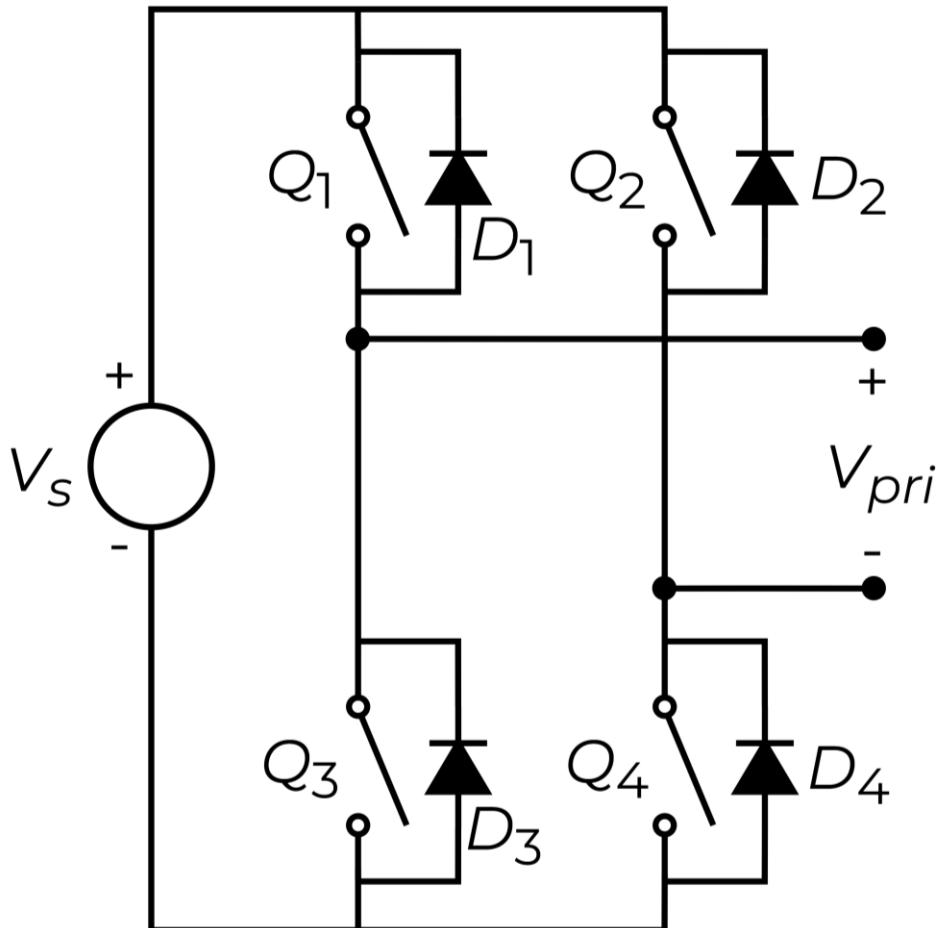
Se realizaron ensayos sobre la plataforma, principalmente para verificar el funcionamiento del convertidor y sistema de control:

- Sin carga
- Con carga



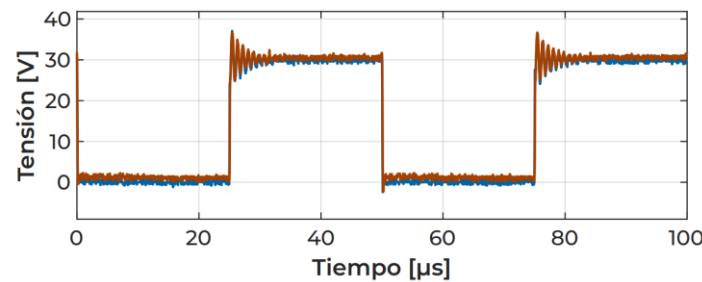
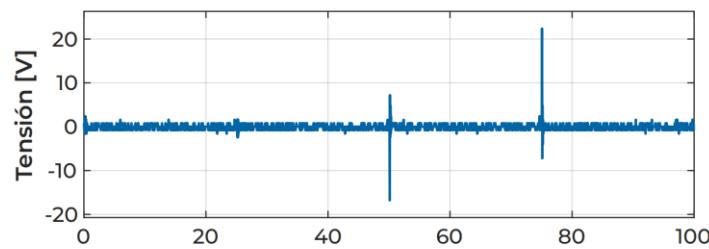
Ensayo sin Carga

Para este ensayo, se configuró el convertidor sin ningún tipo de carga, y con el circuito secundario desconectado, se midieron algunos parámetros del circuito.

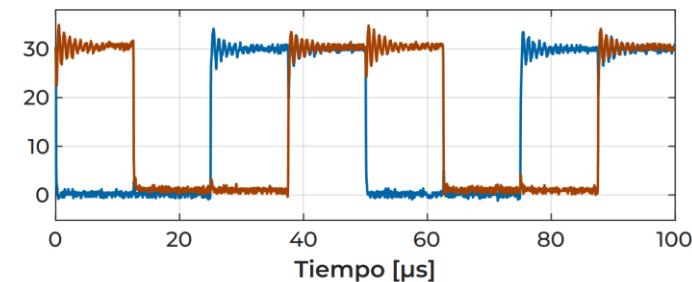
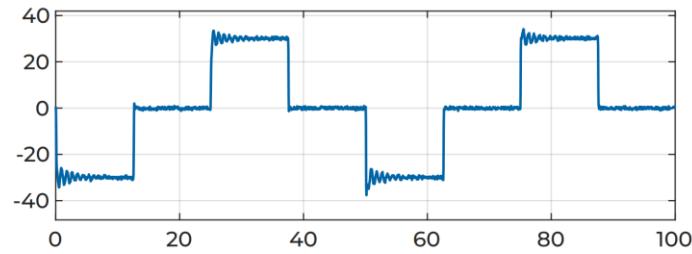


Ensayo sin Carga

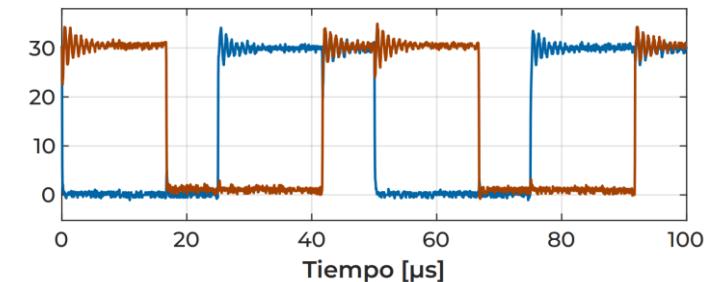
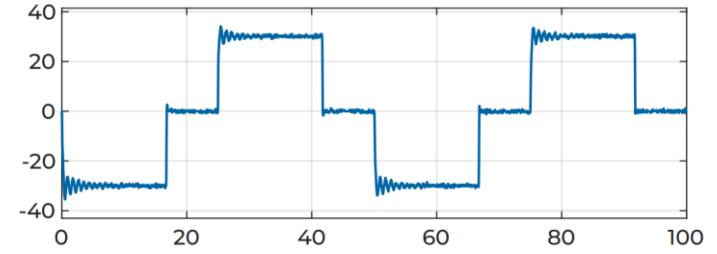
Tensión de bobinado primario V_{pri} , y tensiones de medios puentes V_{pri}^+ y V_{pri}^-



Fase Relativa 0°



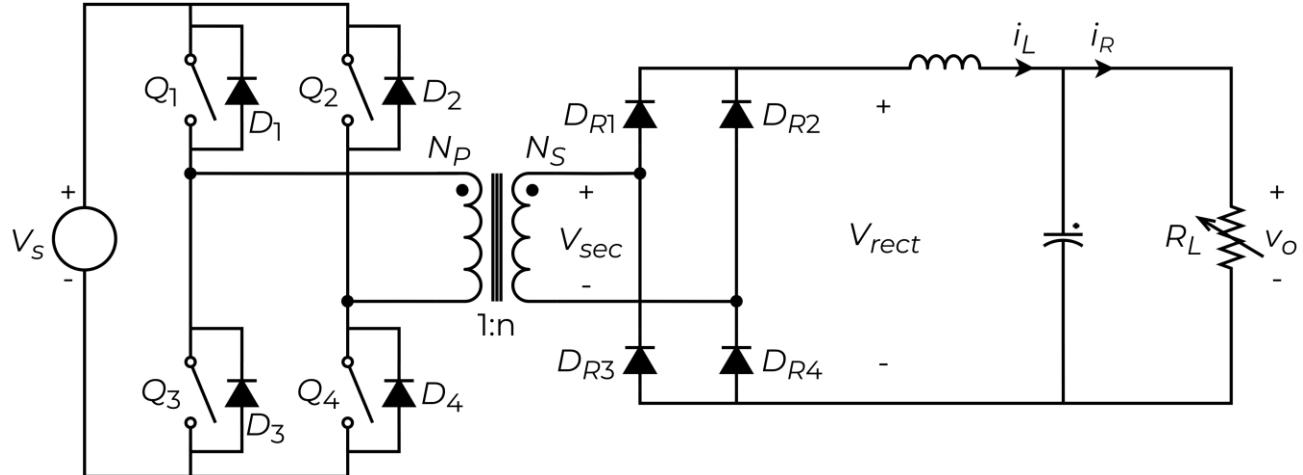
Fase Relativa 90°



Fase Relativa 120°

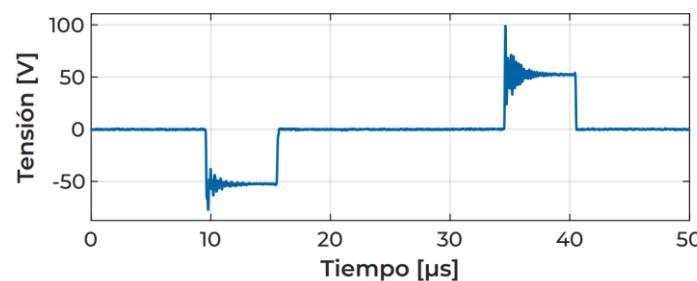
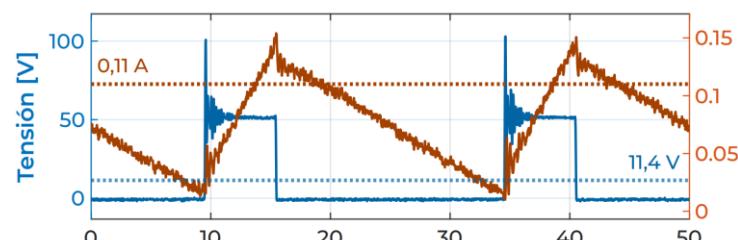
Ensayo con Carga

En esta prueba, se conectó el circuito completo del convertidor, incluyendo una carga variable a la salida, y se midieron parámetros del secundario.

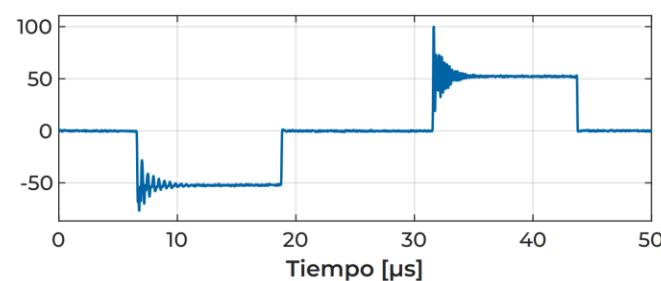
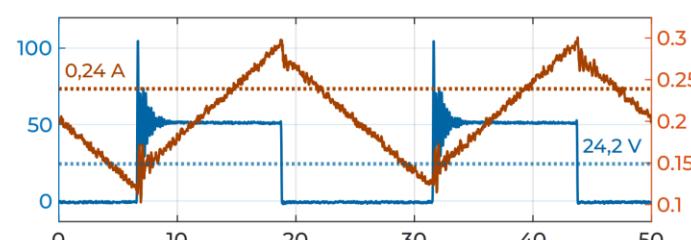


Ensayo con Carga – 15 V

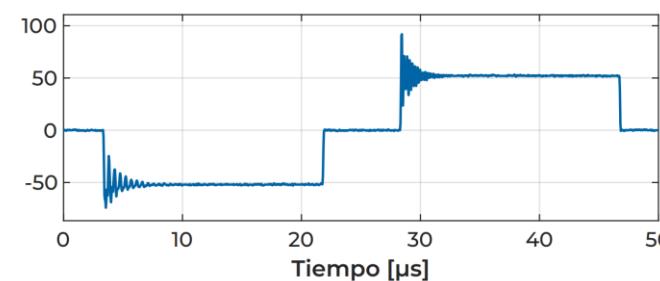
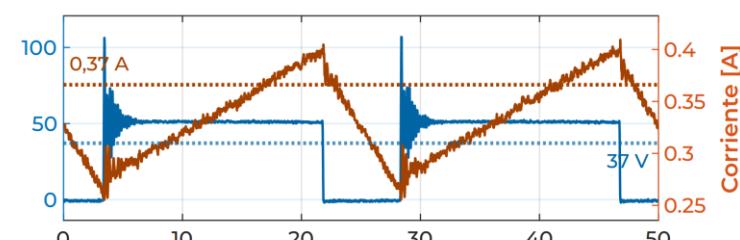
Tensión rectificada V_{rect} , corriente de inductor I_{Lf} y tensión de bobinado secundario V_{sec}



Ciclo de Trabajo 25 %
Rendimiento 92,6 %



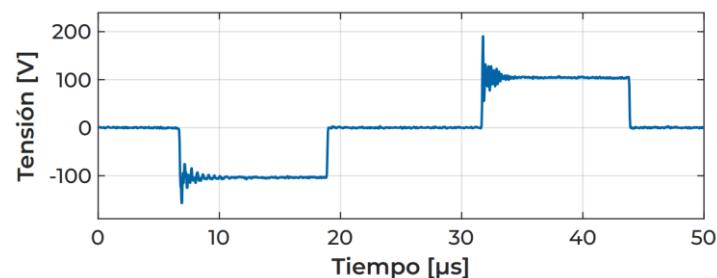
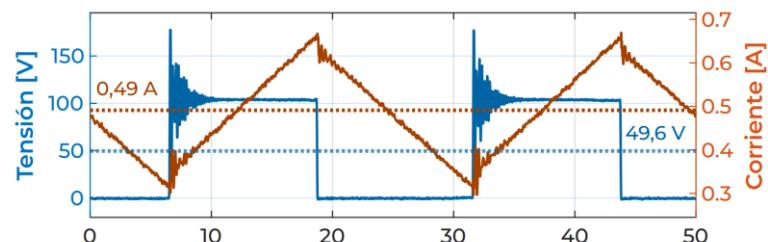
Ciclo de Trabajo 50 %
Rendimiento 91,7 %



Ciclo de Trabajo 75 %
Rendimiento 93,3 %

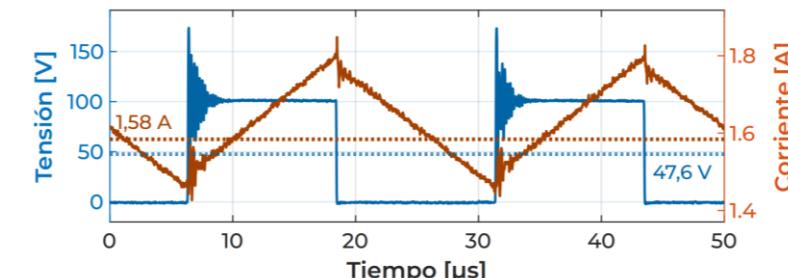
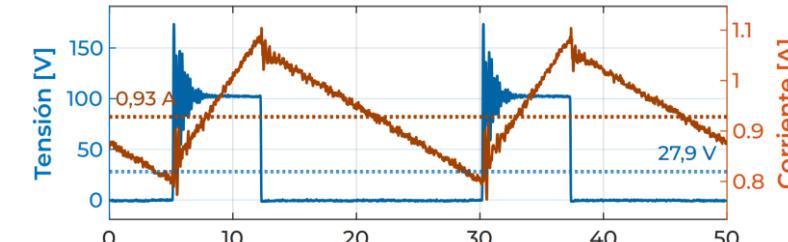
Ensayo con Carga – 30 V

Tensión rectificada V_{rect} , corriente de inductor I_{Lf} y tensión de bobinado secundario V_{sec}



Carga de 100Ω

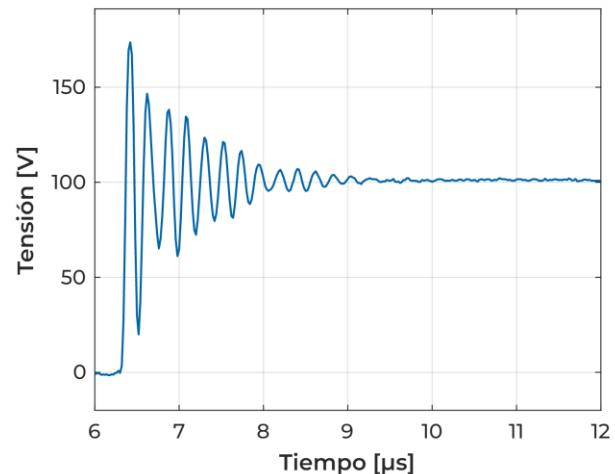
Rendimiento 93,4 %



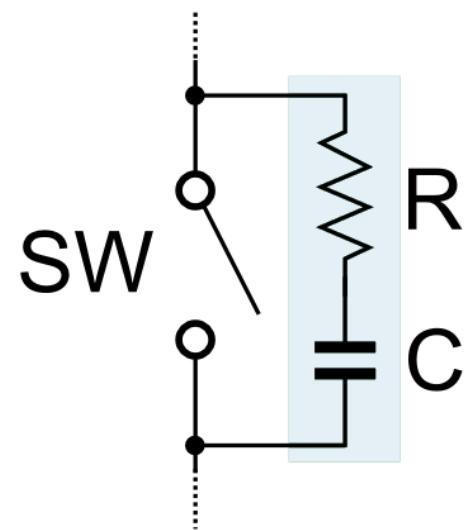
Carga 30Ω

Rendimiento 90 % y 91,1 %

Distorsiones de Forma de Onda



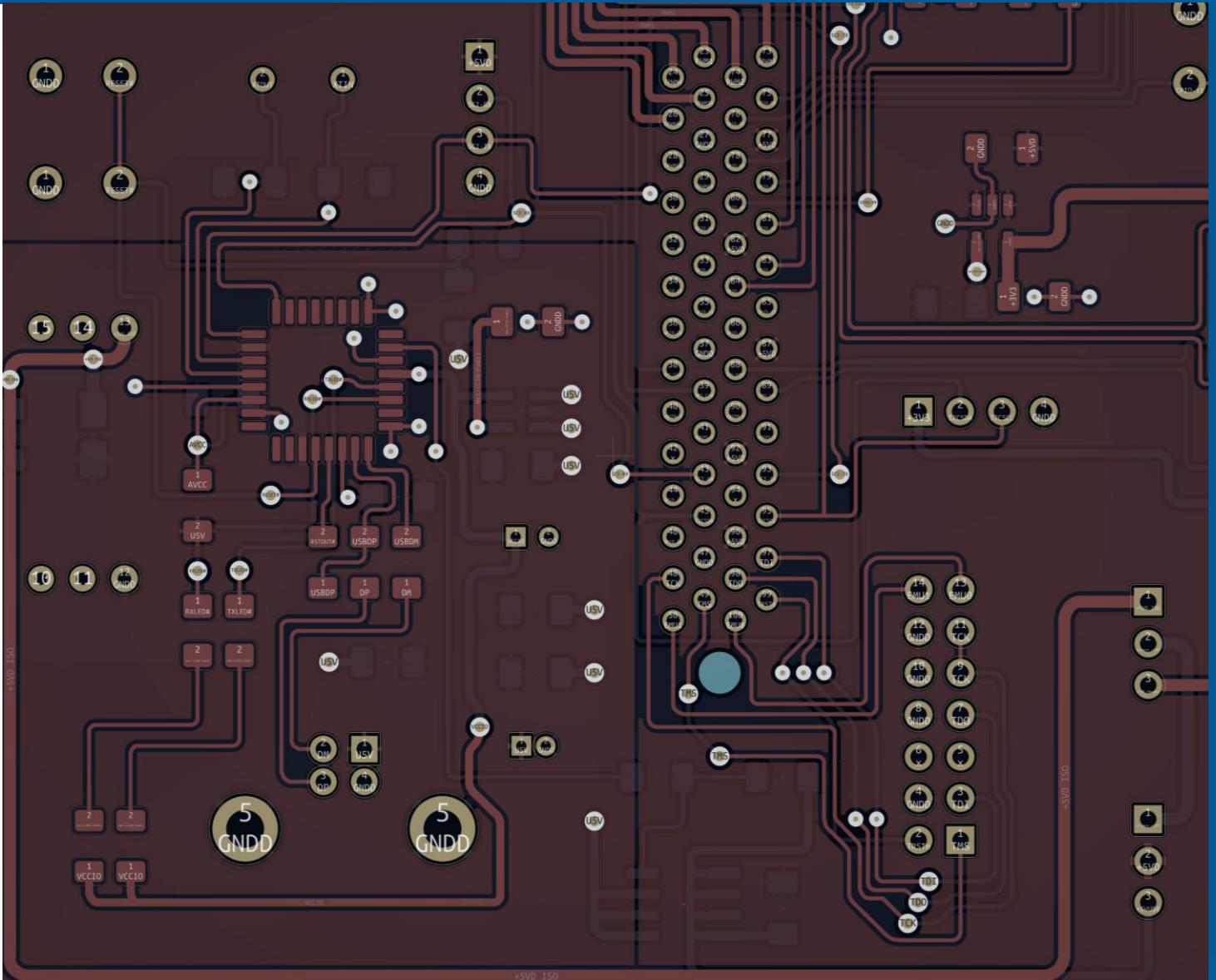
Efecto de *ringing* en conmutación



Circuito *snubber* RC

Contenidos

- I. Motivación
- II. Planteo
- III. Diseño
- IV. Implementación
- V. Pruebas
- VI. Conclusiones**



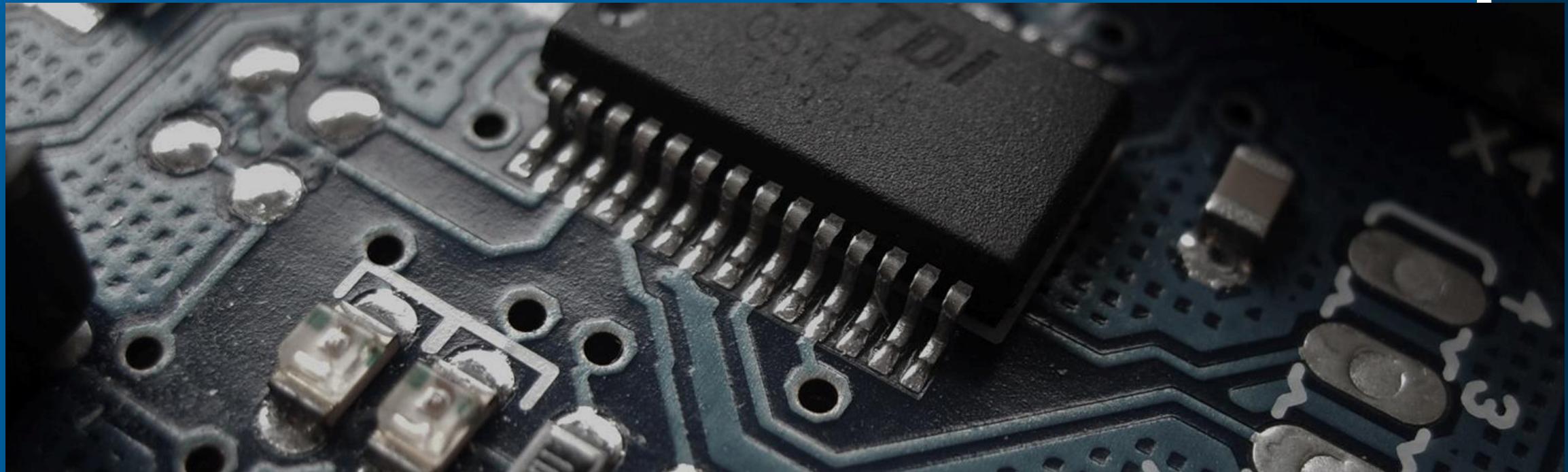
Conclusiones

Objetivos Cumplidos

- Diseñar un sistema de acondicionamiento y control de potencia para pilas de combustible.
- Proveer la capacidad de evaluar distintos algoritmos de control para aplicación en sistemas reales.

Desarrollo a Futuro

- Programación de firmware y distintos algoritmos de control para su evaluación.
- Corrección de errores menores en el diseño de hardware de la plataforma.



¡Muchas Gracias!

¿Preguntas?