



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



Universidad Técnica Federico Santa María

Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Documento de Diseño

Inversor puente H

Estudiante:

Lucas Riquelme

Profesor:

Alan Wilson

Versión: 5.0

Fecha : 13 de marzo de 2023

Prefacio

Alcance del documento	Establece los requisitos funcionales que debe cumplir el diseño del Inversor Puente H. Describe los siguientes aspectos del sistema: requisitos funcionales, arquitectura del sistema a diseñar, características funcionales de cada componente, descripción de cada módulo, incluyendo sus casos de prueba.
Autor	Lucas Riquelme
Lectores	Este documento está dirigido principalmente al supervisor de práctica

Historia del documento

Versión	Fecha	Descripción del cambio	Autor
1.0	05/01/2023	Primer documento $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$	Lucas Riquelme
2.0	17/01/2023	Se agregan secciones principales	Lucas Riquelme
3.0	30/01/2023	Se agrega el desarrollo del módulo inversor y filtro	Lucas Riquelme
4.0	08/02/2023	Se agrega el desarrollo del módulo circuito de medición	Lucas Riquelme
5.0	27/02/2023	Se complementa el desarrollo del circuito de medición y se agrega simulación con rectificador en la sección de filtro de salida	Lucas Riquelme

Índice

1. Descripción y requisitos del sistema	3
1.1. Propósito	3
1.2. Requisitos funcionales	3
1.3. Alcances	3
2. Arquitectura del sistema	4
2.1. Diagrama de bloques	4
2.2. Enumeración de módulos	4
3. Descripción de los módulos	5
3.1. Módulo Inversor monofásico	5
3.1.1. Definición	5
3.1.2. Diagrama del módulo	5
3.1.3. Diseño del módulo	5
3.1.4. Estrategia de prueba del módulo	8
3.2. Módulo Filtro paso bajos	9
3.2.1. Definición	9
3.2.2. Diagrama del módulo	9
3.2.3. Diseño del módulo	9
3.2.4. Estrategia de prueba del módulo	13
3.3. Módulo Circuito de medición	14
3.3.1. Definición	14
3.3.2. Diagrama del módulo	14
3.3.3. Diseño del módulo	14
3.3.4. Estrategia de prueba del módulo	17
3.4. Lista de componentes (BOM)	18

Índice de figuras

1. Diagrama de bloques del sistema	4
2. Diagrama de circuito del módulo Inversor monofásico.	5
3. Esquemático del inversor puente H y modulación PWM unipolar.	6
4. Resultados obtenidos en el módulo inversor monofásico.	7
5. Filtro LC.	9
6. Esquemático del inversor puente H y filtro LC.	10
7. Resultados obtenidos en el módulo filtro de salida.	11
8. Esquemático del inversor más filtro, considerando rectificador.	12
9. Resultados obtenidos utilizando el rectificador de entrada.	12
10. Diagrama de bloques del módulo circuito de medición.	14
11. Circuito de sensor de voltaje.	15
12. Sensor de corriente integrado MLX91221.	15
13. Convertidor DC/DC PDSE2-S24-S5-M.	16

14. Convertidor DC/DC AP7366-W5-7.	16
15. Convertidor DC/DC PEM2-S24-D12-S.	16

Índice de cuadros

1. Módulos del sistema.	4
2. Parámetros base del inversor puente H a modelar.	7

1. Descripción y requisitos del sistema

Esta sección explica el propósito y funcionamiento general del sistema a diseñar, junto con describir los requisitos funcionales y alcances del sistema.

1.1. Propósito

El sistema corresponde a un convertidor DC/AC, el cual debe ser capaz de convertir un voltaje continuo a una tensión alterna de alta frecuencia. Además, de entregar señales acondicionadas para observar las mediciones en la entrada y salida del sistema.

1.2. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales definen el comportamiento del sistema. En otras palabras, estos requisitos mínimos describen que es lo que debe hacer el sistema.

RF1 La tensión continua de entrada de 1kV debe ser convertida en un voltaje conmutado con frecuencia fundamental de 10kHz, el cual debe ser filtrado para obtener un voltaje alterno sin armónicos de alta frecuencia.

RF2 El sistema debe entregar una potencia de hasta 5kW.

RF3 El sistema es capaz de medir voltajes DC y AC de hasta 1kV.

RF4 Las señales análogas de las mediciones generadas por el circuito están adaptadas para rangos de $\pm 5V$ para ser visualizadas en un osciloscopio.

1.3. Alcances

- La entrada del sistema corresponde a un DC-link de 1kV obtenido a partir de un módulo rectificador.
- La salida del sistema debe estar conectada a un transformador, por tanto el voltaje alterno a la salida del sistema debe tener valor medio cero.

2. Arquitectura del sistema

Aquí se presenta la arquitectura que se empleará para desarrollar el Inversor puente H.

2.1. Diagrama de bloques

La siguiente figura muestra los módulos internos y externos del sistema, y sus principales interacciones.

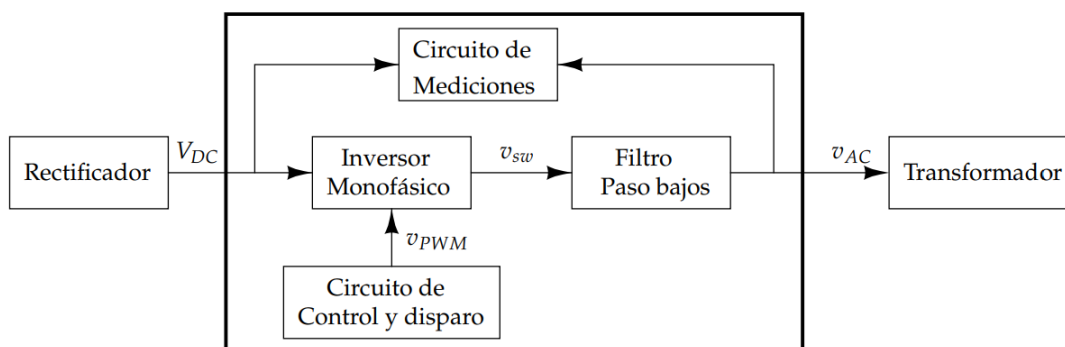


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema

2.2. Enumeración de módulos

La Tabla 1 muestra los bloques de la Figura 1. Por cada módulo se entrega un breve párrafo descriptivo de su propósito.

Módulo	Propósito
Inversor monofásico	Convertir el voltaje continuo de entrada en una tensión alterna
Filtro paso bajos	Filtrar los armónicos de alta frecuencia de una señal alterna
Circuito de mediciones	Adapta los voltajes de entrada y salida
Circuito de control y disparo	Genera los pulsos de disparo que controlan al inversor

Cuadro 1: Módulos del sistema.

3. Descripción de los módulos

3.1. Módulo Inversor monofásico

3.1.1. Definición

Propósito: Convertir un voltaje dc de 1kV a una tensión alterna de frecuencia 10kHz

3.1.2. Diagrama del módulo

La figura 2 muestra el diagrama del módulo Inversor monofásico.

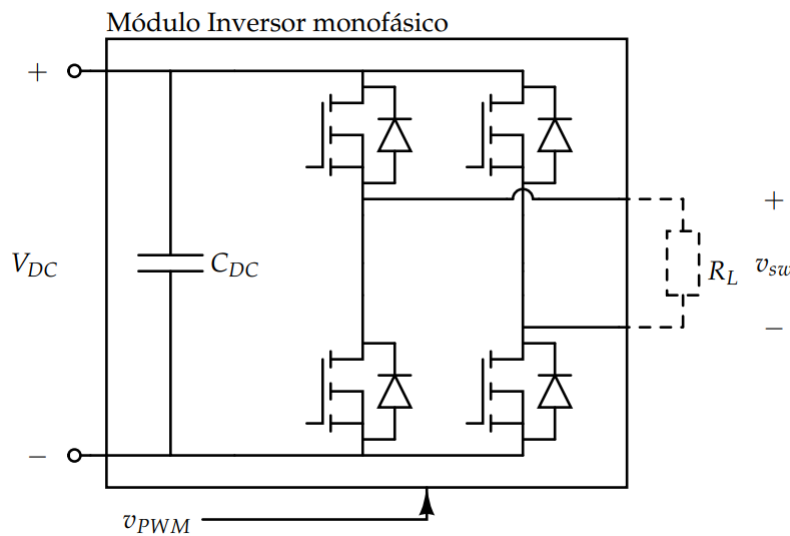


Figura 2: Diagrama de circuito del módulo Inversor monofásico.

3.1.3. Diseño del módulo

Lo primero a considerar es el tipo de modulación a utilizar, dado a que se necesita generar un voltaje alterno con valor medio cero, se utiliza la modulación PWM unipolar para generar una tensión a la salida de tres niveles. Hay que considerar que, al utilizar este tipo de modulación se obtendrá una duplicación aparente de la frecuencia de conmutación a la salida, con lo que se consigue alejar los armónicos de m_f a $2m_f \pm 1$.

Por otro lado, se escoge un índice de modulación par ($m_f = 10$) dado a que permite eliminar los armónicos pares que se generen, con este valor y considerando que la frecuencia de la fundamental es $f_1 = 10\text{kHz}$, es posible obtener el valor de la frecuencia de la portadora a utilizar,

$$f_c = m_f f_1 = 100\text{kHz} \quad (1)$$

Por otro lado, se sabe que el circuito debe entregar una potencia de hasta $P_o = 5\text{kW}$ a una tensión $V_{dc} = 1\text{kV}$, es decir, la carga conectada debe ser una resistencia de,

$$R_L = \frac{(V_{DC})^2}{P} = 200\Omega \quad (2)$$

y por tanto, la corriente en la carga y en el semiconductor es,

$$I_L = \frac{V_{DC}}{R_L} = 5A \quad (3)$$

Para el semiconductor, se utiliza el MOSFET de carburo de silicio dado a que generalmente operan a altas frecuencias y velocidad de conmutación, y soportan una mayor temperatura de juntura. Por otro lado, hay que tener en cuenta que estos deben ser capaces de operar a una frecuencia de 100kHz, soportar un voltaje de 1kV y una corriente de $I_L = 5A$. Dado a que se debe tener un margen de seguridad en caso de algún peak de corriente o voltaje, al momento de escoger un MOSFET se establecen los siguientes criterios,

$$V_{DSS} \geq 1,2 \cdot V_{DC} = 1200V \quad (4)$$

$$I_D \geq 2 \cdot I_L = 10A \quad (5)$$

Finalmente, para el diseño del condensador del DC-link, se considerará un criterio basado en el rizado del voltaje DC, cuya formula esta dada por,

$$C_{DC} = \frac{I_g}{8f_{sw}\Delta V} \quad (6)$$

Donde I_g es la corriente peak y f_{sw} la frecuencia de conmutación, por otro lado,

$$\Delta V = r \cdot V_o \quad (7)$$

Considerando un rizado del 5 % y un valor medio de 1000V, se obtiene que el valor de la capacitancia del DC-link debe ser de $0.12\mu F$.

Se escoge un SiC-MOSFET SCT4062KRHR de Rohm Semiconductor, el cual cumple con las características anteriormente nombradas. Utilizando su modelo en PLECS se simula el convertidor para observar las pérdidas totales en el semiconductor, su temperatura de juntura, voltaje, corriente y potencia en la carga.

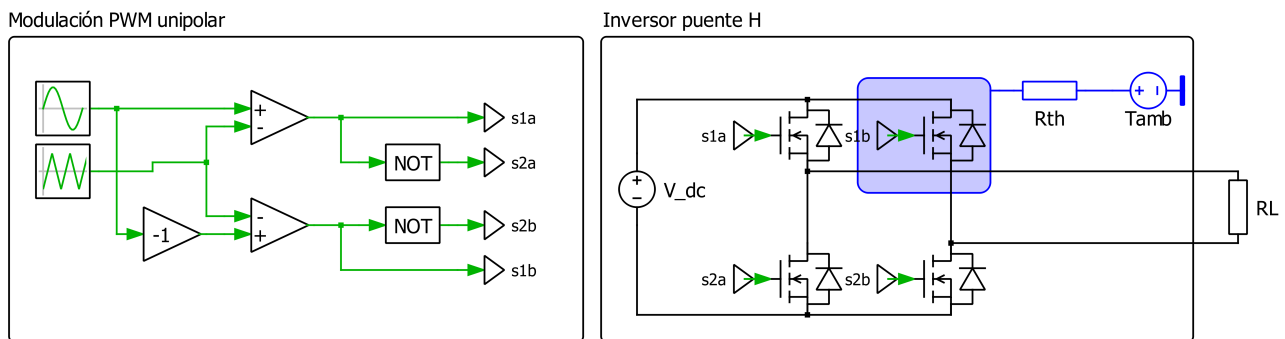


Figura 3: Esquemático del inversor puente H y modulación PWM unipolar.

Cabe mencionar que para la simulación, se utilizaron los siguientes parámetros mostrados en la tabla 2,

Cuadro 2: Parámetros base del inversor puente H a modelar.

Descripción	Parámetro	Valor
Voltaje en la fuente DC	V_{DC}	1000 V
Resistencia en la carga	R_L	200 Ω
Frecuencia fundamental	f_1	10 kHz
Frecuencia de portadora	f_c	100 kHz
Índice de modulación (amplitud)	m	1
Resistencia térmica del disipador	$R_{thc,ca}$	7 C °/W
Temperatura ambiente	T_{amb}	25 C °

Obteniendo los siguientes resultados de simulación,

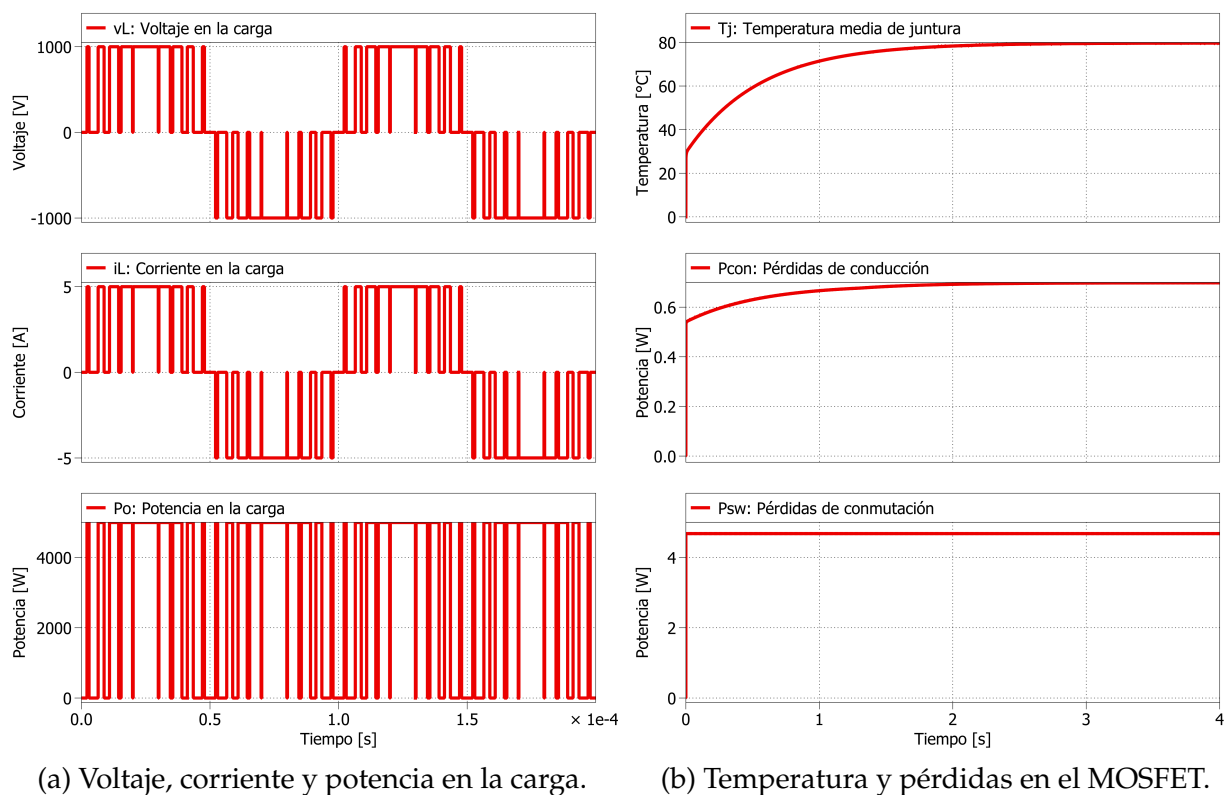


Figura 4: Resultados obtenidos en el módulo inversor monofásico.

En la figura 4.b se observa que el MOSFET alcanza una temperatura media de juntura de 79.7 C °, la cual esta dentro de lo especificado en el datasheet. Por otro lado, se observa que las pérdidas de conducción llega a 0.6981W y las pérdidas de conmutación llega a 4.6785W, dando unas pérdidas totales de 5.3766W.

Cabe mencionar que, la resistencia térmica que se considero para el “heat sink” fue obtenida a partir de un disipador encontrado en el mercado, el cual cumple con las dimensiones del SiC-MOSFET (TO-247-4L).

3.1.4. Estrategia de prueba del módulo

Para la prueba del módulo se utilizara una fuente de tensión DC que sea capaz de suministrar 1000V a la entrada del inversor puente H, además de utilizar un microcontrolador para generar los pulsos de disparo que controlaran al puente H. Para finalmente medir la señal de salida antes del filtro para observar su voltaje y frecuencia.

3.2. Módulo Filtro paso bajos

3.2.1. Definición

Propósito: Filtrar las componentes armónicas de alta frecuencia del voltaje de salida del convertidor.

3.2.2. Diagrama del módulo

La figura 5 muestra el diagrama del módulo Filtro de salida.

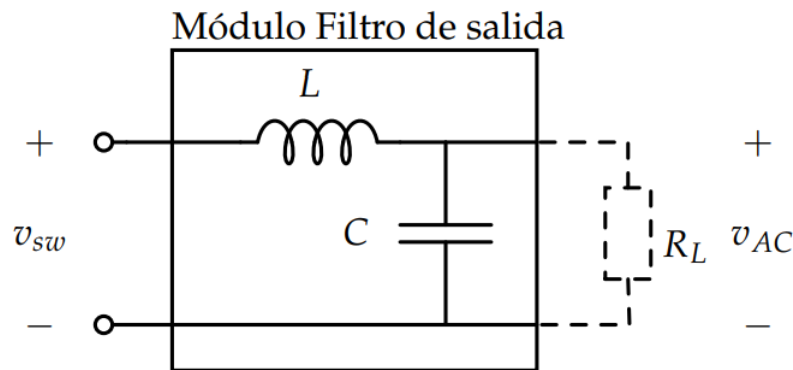


Figura 5: Filtro LC.

3.2.3. Diseño del módulo

Se escoge un filtro del tipo LC a la salida debido a que permite eliminar los armónicos de alta frecuencia y a su facilidad de diseño.

Analizando el circuito en utilizando la transformada de Laplace, se obtiene la siguiente función de transferencia,

$$\frac{V_f(s)}{V_{sf}(s)} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

Por definición, las ecuaciones para el factor de amortiguación y la frecuencia de corte del filtro LC son:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10)$$

Despejando L y C en función de los valores conocidos,

$$C = \frac{1}{2\xi R \omega_o} \quad (11)$$

$$L = \frac{2\xi R}{\omega_o} \quad (12)$$

Donde $R = 200\Omega$ y se escoge $\zeta = 1/\sqrt{2}$. Para la frecuencia de corte se escoge una década menos que la frecuencia del voltaje de salida, es decir,

$$f_o = \frac{2f_c}{10} = 20\text{kHz} \quad (13)$$

Reemplazando estos valores en las ecuaciones (11) y (12), se obtiene,

$$C = 2,8\text{nF} \quad (14)$$

$$L = 2,3\text{mH} \quad (15)$$

Si bien estos no son valores comerciales, se pueden obtener valores cercanos con condensadores en paralelo o inductores en serie. Además hay que considerar que el inductor debe ser capaz de soportar corrientes mayores a 5.5A y el condensador voltajes mayores a 1200V, de forma de tener un margen de seguridad. En el mercado se encontraron valores cercanos, para el condensador un valor de 10000pF y para el inductor un valor de 500μH. Por lo tanto, utilizando dos inductores en serie y 3 condensadores en paralelo se obtienen resultados óptimos en el voltaje alterno de salida.

A continuación se muestra el esquema utilizado para la simulación, donde se utilizó un valor de capacitancia $C = 30000\text{pF}$ y una inductancia de 1mH para el filtro LC, además de conectar la carga a la salida de 200Ω,

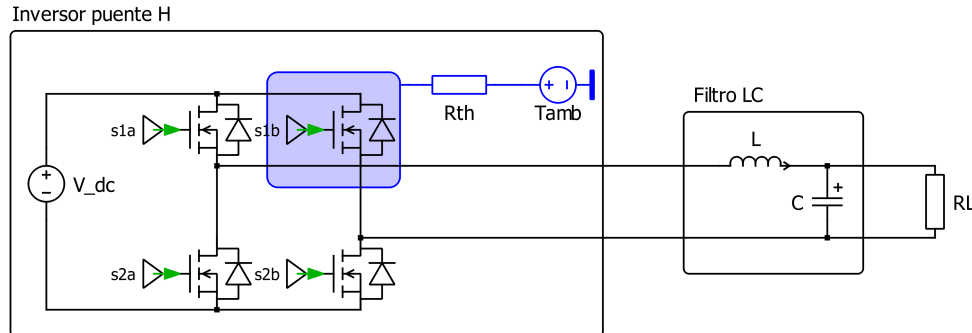


Figura 6: Esquemático del inversor puente H y filtro LC.

Al simular se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la figura 7 donde se destaca que,

- En la figura 7.a y 7.b se observa que se obtiene un voltaje alterno sinusoidal a la salida, donde se eliminan todas las armónicas de alta frecuencia.
- Por otro lado, se observa que al utilizar el filtro de salida la temperatura media de junta disminuye a 61.5344 C°. Además, las pérdidas totales del semiconductor disminuyen a 3.5886W.

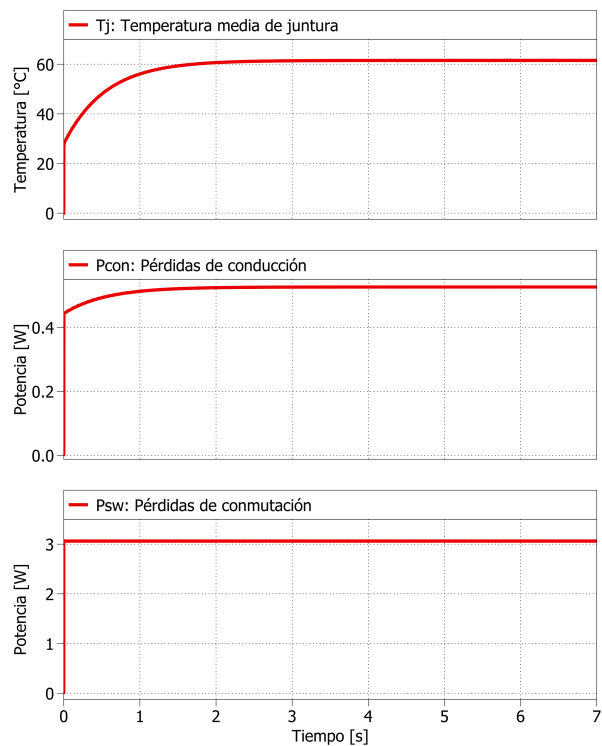
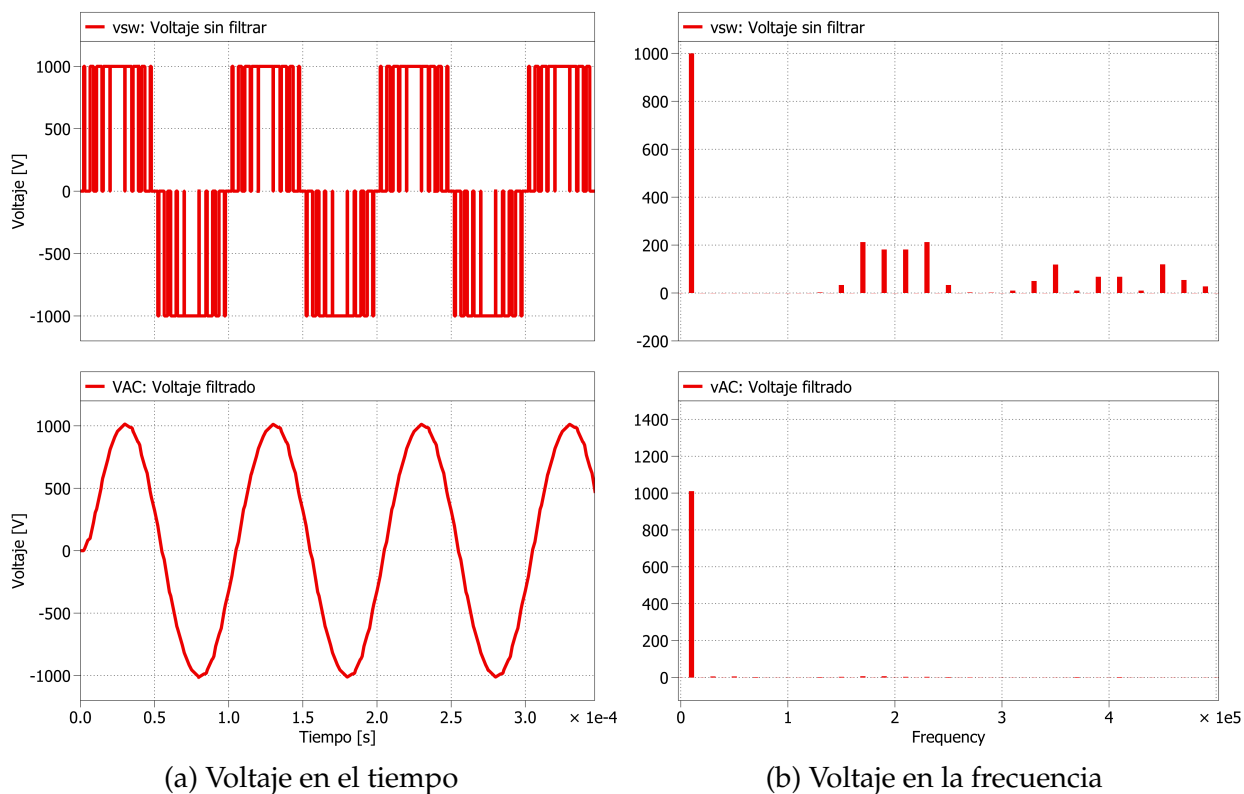


Figura 7: Resultados obtenidos en el módulo filtro de salida.

Para finalizar, se simulará el inversor más filtro, considerando que en la entrada tiene un rectificador trifásico puente, considerando un voltaje de entrada de 545V, de forma de obtener aproximadamente un voltaje medio a la del rectificador de 1000V, tal como se muestra en la siguiente expresión,

$$V_o = \frac{3\sqrt{3}V_i}{\pi} = 901V \quad (16)$$

A continuación se muestra el esquemático utilizado en la simulación,

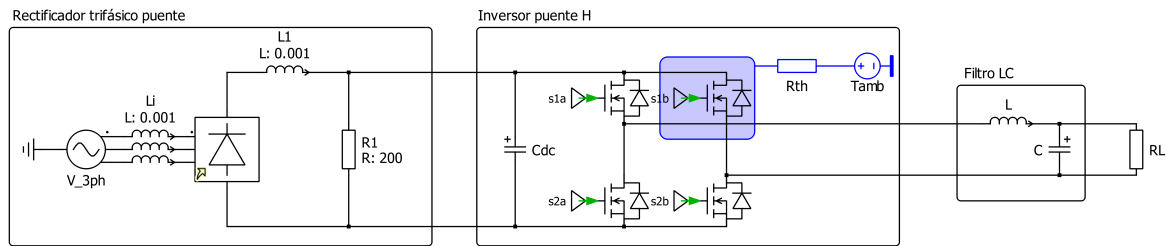
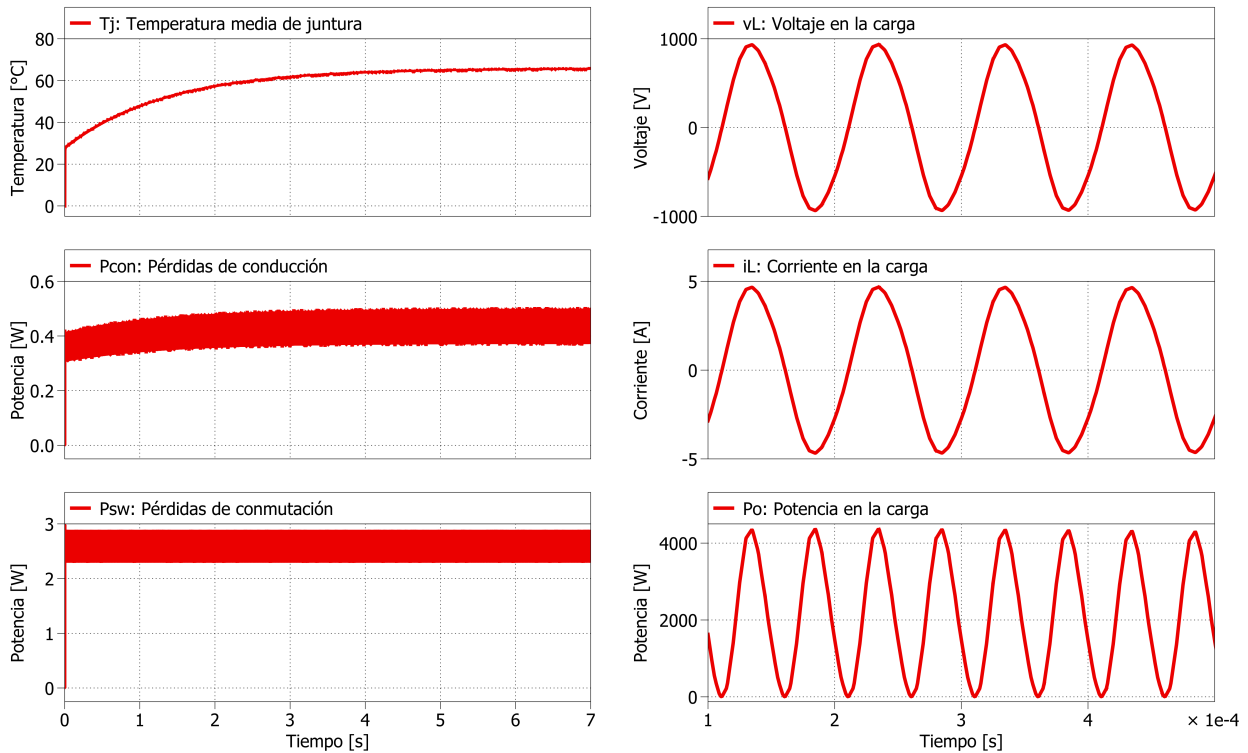


Figura 8: Esquemático del inversor más filtro, considerando rectificador.



(a) Temperatura y pérdidas en el MOSFET.

(b) Voltaje, corriente y potencia en la carga.

Figura 9: Resultados obtenidos utilizando el rectificador de entrada.

- En la figura 9.a se observa que la temperatura de juntura llega hasta los 65 C ° y que las pérdidas totales llegan a 3.3568W.

- En la figura 9.b se observa que el voltaje, corriente y potencia no varía en comparación a no utilizar el rectificador, alcanzando valores similares.

3.2.4. Estrategia de prueba del módulo

Para probar el correcto funcionamiento del módulo, se procederá de la misma forma que en el caso anterior, con la diferencia que esta vez se medirá el voltaje obtenido a la salida del filtro, el cual deberá tener unos valores similares a los obtenidos mediante simulación.

3.3. Módulo Circuito de medición

3.3.1. Definición

Propósito: Adaptar las señales de voltaje y corriente de entrada y salida

3.3.2. Diagrama del módulo

La figura 10 muestra el diagrama del módulo Circuito de medición.

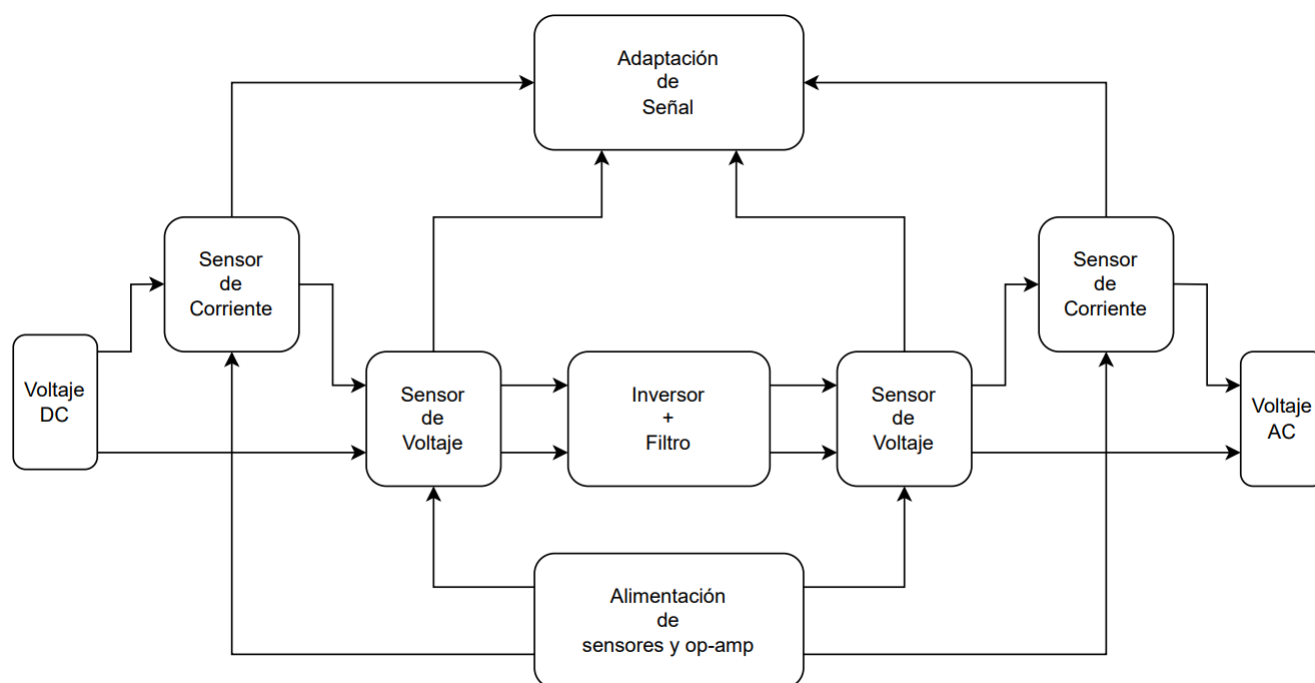


Figura 10: Diagrama de bloques del módulo circuito de medición.

3.3.3. Diseño del módulo

A continuación se muestran los detalles generales por bloque del diagrama de la figura 10.

- **Sensor de voltaje:** Corresponde a un sensor capaz de medir tensiones de hasta 1kV, donde la señal de entrada es el voltaje $\pm V_{DC}$ (sensor de entrada) y $\pm V_{AC}$ (sensor de salida). Las señales de salida van a una etapa de adaptación de señal.

En esta etapa se utilizó un amplificador de aislamiento, dado a que permite justamente aislar la medición de voltaje del circuito inversor, además generalmente estos tienen un alto ancho de banda. Se escogió el modelo ACPL-790B-300E dado a su precio, su alto ancho de banda (200 kHz) y la salida es adaptable tanto para el rango entre 0-3.3V y $\pm 5V$.

Este amplificador tiene como rango de entrada $\pm 200mV$, por lo que se utiliza un arreglo de resistencias para adaptar la señal de 1kV al rango deseado, tal como se muestra en el siguiente esquema,

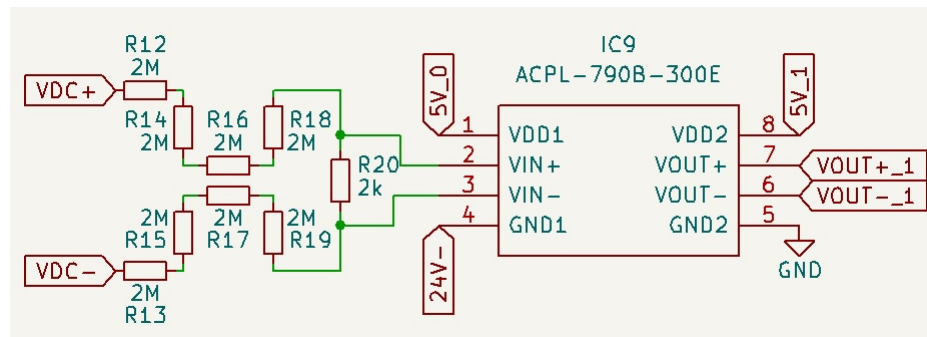


Figura 11: Circuito de sensor de voltaje.

Este arreglo ajusta la señal de 1000kV a 125mV, por datasheet, se desprende que este amplificador tiene una ganancia de 8, por lo que el voltaje a la salida es de 1V, y este voltaje luego pasará a una etapa de adaptación de señal. Además, cabe mencionar que para el funcionamiento del amplificador se debe utilizar una alimentación de 5V.

- **Sensor de corriente:** Corresponde a un sensor capaz de medir corrientes en un rango de hasta 25A, cuyas señales de entrada son la corriente que recibe una carga conectada en serie a la entrada del DC-link (sensor de entrada) y salida del filtro LC (sensor de salida). Las señales de salida van a una etapa de adaptación de señal.

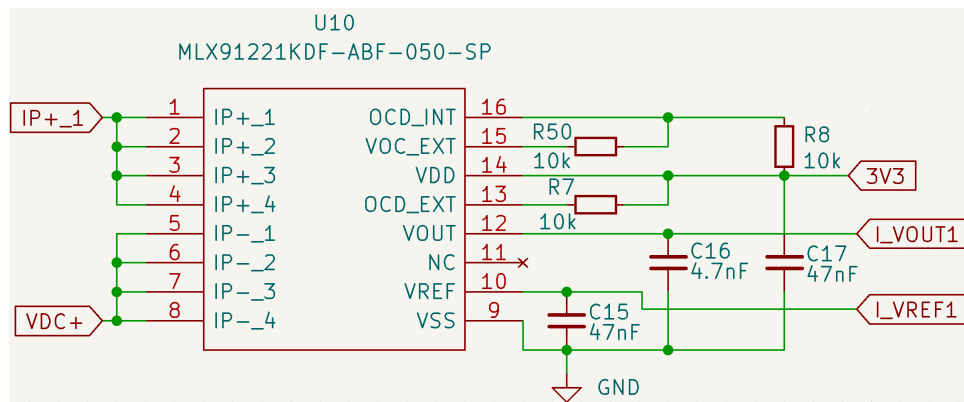


Figura 12: Sensor de corriente integrado MLX91221.

Cabe mencionar, que la configuración utilizada en la figura 12, es la recomendada por el datasheet y esta va conectada en serie a la entrada y salida del inversor más filtro, donde el voltaje I_{VOUT1} y I_{VREF1} corresponden a un voltaje proporcional a la corriente medida, los cuales tienen una amplitud de 1.65V.

- **Alimentación de sensores y op-amp:** Corresponden a un conjunto de convertidores DC-DC aislado capaz de transformar la tensión de entrada de 24V a 5V (para alimentar a los sensores) y $\pm 12V$ (para alimentar los acondicionadores de señal).

Considerando que se tendrá una fuente de alimentación de 24V, se utilizarán tres modelos de convertidores DC/DC aislados,

- Convertidor DC/DC PDSE2-S24-S5-M (24V a 5V): Para alimentar el sensor de voltaje.

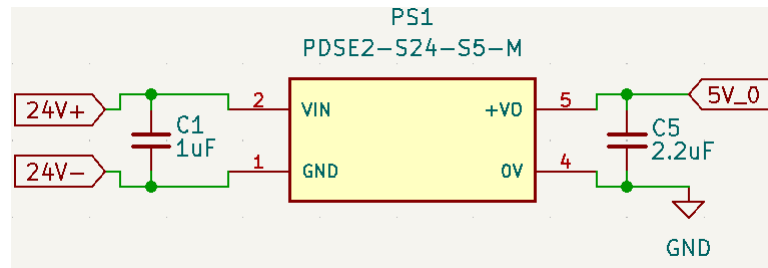


Figura 13: Convertidor DC/DC PDSE2-S24-S5-M.

- Convertidor DC/DC AP7366-W5-7 (5V a 3.3V / 1.65V): Para alimentar el sensor de corriente y el otro para adaptar la señal.

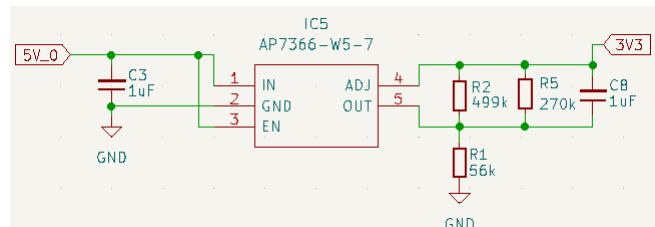


Figura 14: Convertidor DC/DC AP7366-W5-7.

En este caso, se utilizó un arreglo de resistencia recomendado por el datasheet, cuya fórmula está dada por (considerando la figura 14):

$$V_{OUT} = 0,8 \left(1 + \frac{R_2 // R_5}{R_1} \right) \quad (17)$$

- Convertidor DC/DC PEM2-S24-D12-S (24V a $\pm 12V$): Para alimentar los amplificadores operacionales utilizados para adaptar las señales.

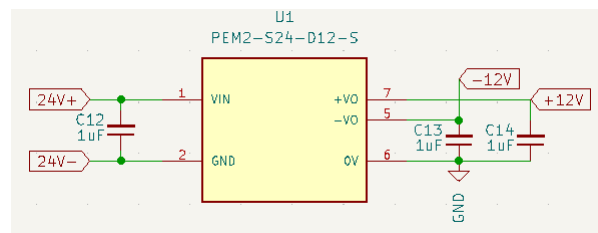


Figura 15: Convertidor DC/DC PEM2-S24-D12-S.

Cabe mencionar, que todos los condensadores utilizados en esta etapa fueron obtenidos a partir de los recomendados por la hoja de datos de cada modelo.

- **Adaptación de señal:** Corresponde a un conjunto de amplificadores operacionales que adaptan las señales recibidas por los sensores a un rango entre 0-3.3V ó $\pm 5V$.

3.3.4. Estrategia de prueba del módulo

- **Sensor de voltaje:** Se corrobora que las tensiones esperadas en el divisor resistivo estén dentro del rango observado en simulación (por ejemplo, LTspice) y el diseñado teóricamente, para esto se hace uso de un tester digital para medir los voltajes DC de forma experimental. Luego, para ratificar el correcto funcionamiento del sensor, se utiliza una generador de funciones para designar una señal de entrada al sensor que posea un rango entre 0 y 2V, con el fin de observar a la salida del mismo una tensión lineal y proporcional al cambio en la entrada, ya que la principal característica del sensor es su alta linealidad.
- **Sensor de corriente:** Se corrobora conectando una carga variable en serie junto a una fuente de voltaje, de forma de variar la corriente y verificar, ya sea con un multímetro o un osciloscopio, que los valores de salida entregados sean proporcionales a la corriente medida.
- **Conversión de voltaje:** Se corrobora que los convertidores DC-DC adquiridos estén operando correctamente, utilizando un tester digital para medir y verificar que la tensión a la salida de los convertidores sea la correcta.
- **Acondicionamiento de voltaje:** Se conecta un generador de funciones a la entrada con amplitudes similares a las generadas en la etapa anterior, para verificar mediante un osciloscopio y/o microcontrolador que el voltaje se adapte a los valores deseados.

3.4. Lista de componentes (BOM)

A continuación se adjunta la lista de materiales y su ubicación, en el siguiente link.