

Retrofit Blower AC

Komatsu Chile S.A. - KCH

Informe de Especificaciones Eléctricas y de Control Propuestas para el Sistema AC

21EN025-DC-G-IFI-003-E

Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (AC3E)

Universidad Técnica Federico Santa María

Febrero 2023

Rev. 1.0



CONTROL DE CAMBIOS

Rev.	Fecha	Descripción
1	24/02/2023	Entrega informe preliminar – versión 1
2	13/03/2023	Entrega Informe preliminar – versión 2
3	27/03/2023	Entrega Informe completo EN 3.3 – versión 1
4	18/05/2023	Entrega informe completo EN 3.3 – versión 2

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	5
2	Especificaciones Eléctricas.....	5
2.1	Etapas Es1 - Motores AC.....	6
2.2	Etapas R1 - Inversor Trifásico	7
2.3	Etapas R2 - Convertidor DC/DC Boost Interleaved	9
2.3.1	Inductancia L=470 uH	11
2.3.2	Inductancia L=350mH	13
2.3.3	Inductancia L=280mH	15
2.3.4	Consideraciones elección de inductancia.....	17
2.3.5	Capacitor enlace DC secundario	18
2.3.6	Operación nominal convertidor DC-DC	19
3	Fallas Detectables y Protecciones	22
3.1	Fallas específicas para detectar	22
3.1.1	Sobre o baja tensión de entrada.....	22
3.1.2	Cortocircuito fase DCDC.	22
3.1.3	Sobre o baja tensión DC link secundario.	22
3.1.4	Cortocircuito fases inversor.....	22
3.1.5	Exceso de temperatura en semiconductores.	22
3.2	Protecciones ante fallas y mediciones.	22
3.2.1	Fusibles ultra rápidos.....	22
3.2.2	Disyuntores.....	23
3.2.3	Sensores.....	23
3.2.4	Contactores.....	24
4	Sistema de Control	24
4.1	Requerimientos.....	24
4.2	Diagrama de control.....	24
4.3	Circuitos adicionales.....	25
4.3.1	Sistema de control	25
4.3.2	Alimentación Auxiliar	26
4.3.3	UPS.....	26
4.3.4	Circuito Chopper	26
4.3.5	Circuito de Precarga.....	26
4.3.6	Ventilador	26
5	Resultados Simulación Offline.....	26

5.1	Sistema AC sin circuitos adicionales.....	26
5.2	Implementación primer circuito adicional.....	28
5.3	Implementación segundo circuito adicional.....	31
6	Conclusiones.....	35
7	Referencias.....	35

1 Introducción

A partir de los resultados obtenidos por medio de las simulaciones en el HIL, se reconocieron los límites permitidos de operación por parte del ICP para que la configuración 1.2 sea transparente a este sistema de control del camión.

Este documento pretende plasmar las especificaciones eléctricas y de control necesarias para la implementación de la configuración 1.2. Se pretende analizar la operación nominal del sistema, identificando de esta manera la operación nominal de las componentes fundamentales del sistema, correspondiente de los semiconductores de potencia y componentes pasivas. Posterior a esto, se hará un reconocimiento de las fallas del sistema, que protecciones se deben utilizar y cómo estas deben ser alertadas. Finalmente, se agregará el esquema del sistema de control que no sólo se encargará de la medición y el control de variables eléctricas de la configuración 1.2, sino que permitirá reconocer y actuar frente a las fallas, reconociendo los circuitos adicionales a implementar y su operación en el sistema AC.

2 Especificaciones Eléctricas

Para obtener las especificaciones técnicas de cada etapa y así las características esenciales para los semiconductores de potencia utilizados, se comenzó identificando las diferentes etapas de la configuración 1.2 como se puede ver en la Figura 1. Estas etapas se pueden dividir en:

- Etapa esencial 1: Blowers AC (Es1).
- Etapa de requerimientos 1: Inversor trifásico 2L-VSI (R1).
- Etapa de requerimientos 2: Convertidor DC/DC Boost Interleaved (R2).

Con ayuda de la operación nominal de la etapa esencial se identifica la operación de las etapas requeridas para la operación nominal esperada, lo que permite definir los requisitos de operación nominal para del inversor y posteriormente definir los requisitos de operación nominal para el convertidor DC-DC.

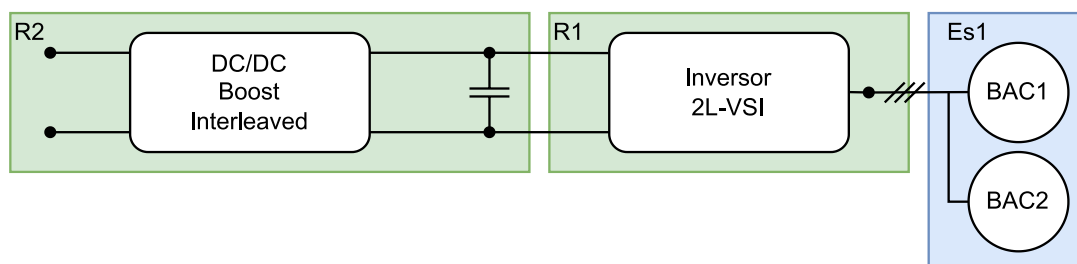


Figura 1. Etapas que componen al sistema AC también conocido como configuración C1.2.

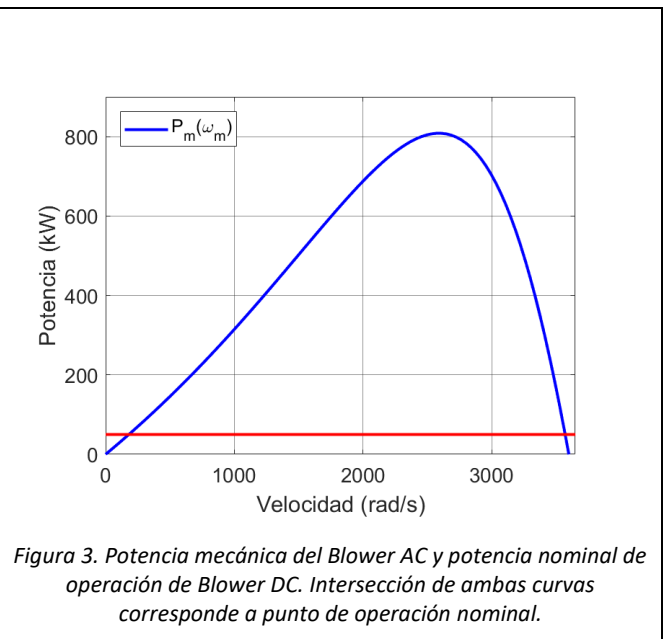
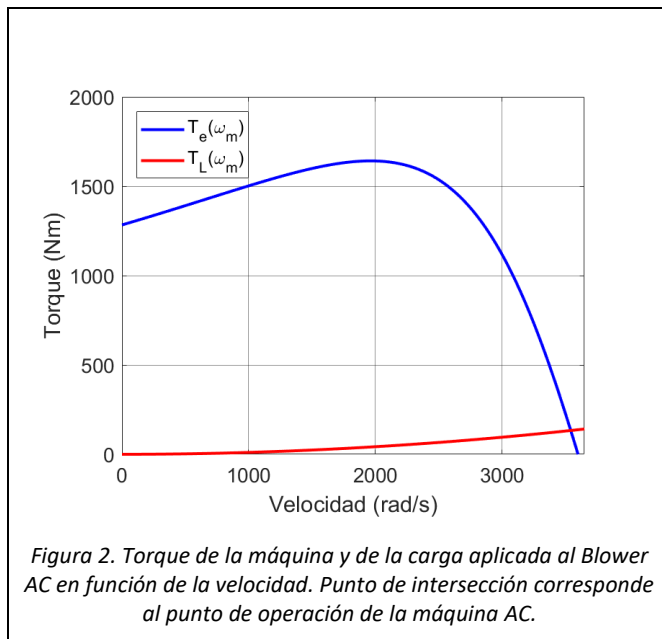
2.1 Etapa Es1 - Motores AC

A continuación, se presentan en los parámetros de los motores AC que fueron simulados en el HIL.

Tabla 1. Parámetros de las máquinas de inducción.

Parámetros Máquina de inducción – Blower AC	
Resistencia de estator R_s	0.0374[Ohm]
Inductancia de dispersión de estator L_s	0.1431[mH]
Resistencia de rotor R_r	0.0996[Ohm]
Inductancia de dispersión de rotor L_r	0.1431[mH]
Inductancia Magnetizante L_m	7.865[mH]
Pares de polos	2[-]

A partir de los parámetros utilizados en la Tabla 1, es posible obtener las características del torque y la potencia de la máquina en función de su velocidad, comparando estas curvas con la curva de torque de la hélice y la potencia requerida, a la salida respectivamente.



A partir del punto de operación para la máquina AC plasmada en la Figura 2 y en la Figura 3, se pueden identificar sus variables en operación nominal, necesarias para el diseño del inversor trifásico.

A partir de la velocidad nominal de la máquina n_{sinc} (3500 rpm), se obtiene su frecuencia nominal:

$$\frac{n_{sinc} \cdot p}{60} = f_e$$

- f_e : Frecuencia [Hz].
- p : Pares de polos [-].

Además, buscando asimilar el comportamiento de los motores del modelo 930E-5, se puede obtener la tensión y corriente nominal de las máquinas. Esto queda plasmado en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables de motor AC en operación nominal.

Operación Nominal Blower AC	
Frecuencia	120 Hz
Potencia activa nominal	50 kW
Tensión nominal línea-línea	443 V
Corriente nominal	85 A
Velocidad nominal	3500 rpm

2.2 Etapa R1 - Inversor Trifásico

Para el diseño de esta etapa, se consideró una tensión de alimentación de 750 V, al igual que la tensión utilizada en el enlace DC secundario del camión 930E-5. En base a las variables mostradas en la Tabla 2, se identifica que es necesaria una potencia de 100 kW.

Este sistema se simula, para obtener las tensiones y corrientes de salida del inversor.

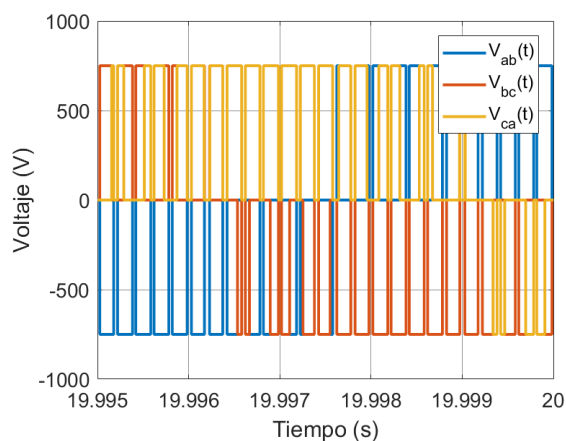


Figura 4. Tensión línea-línea de salida de inversor trifásico en operación nominal.

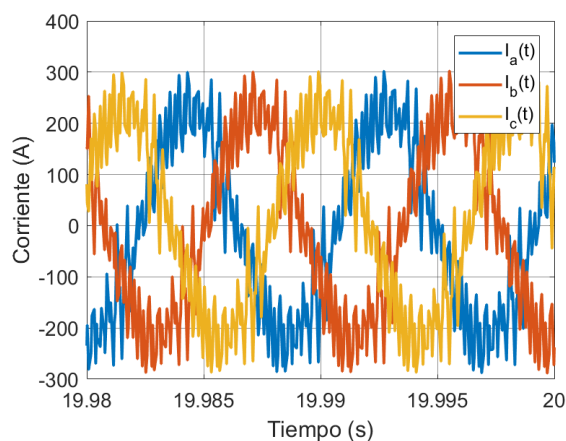


Figura 5. Corriente de fase del inversor trifásico en operación nominal.

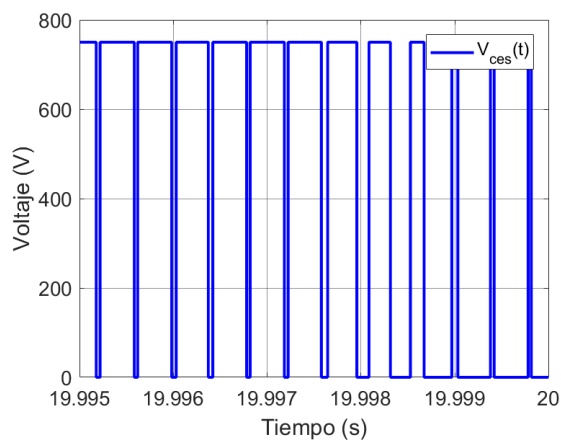


Figura 6. Tensión a través de uno de los semiconductores de potencia utilizado en esta simulación.

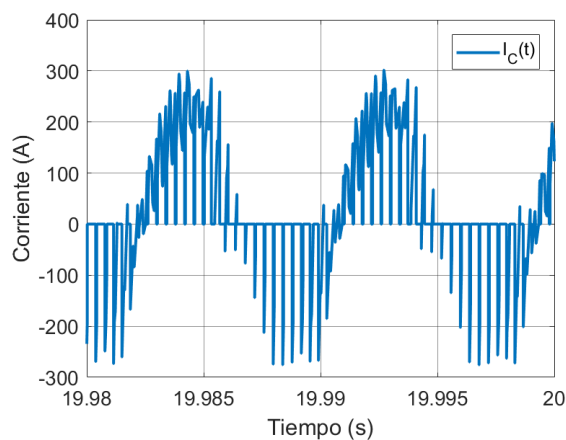


Figura 7. Corriente a través del semiconductor de potencia.

La Figura 4 y Figura 5, muestran el comportamiento de la tensión y corriente de salida del inversor cuando son conectados a éste ambos motores AC. En este punto de operación, se identifica la tensión y la corriente del semiconductor de potencia utilizado, tal como se muestran en la Figura 6 y la Figura 7, respectivamente.

A partir de esta simulación, se obtienen las especificaciones técnicas del inversor trifásico que permiten dar con la operación nominal de ambos blowers AC.

Tabla 3. Variables de inversor trifásico de dos niveles en operación nominal.

Operación Nominal Inversor 2L-VSC	
Tensión de entrada, DC	750 V
Tensión de salida, línea-línea	540 V
Tensión de salida, línea-línea (frecuencia fundamental)	435 V
Corriente de salida, RMS	165 A
Corriente de salida, peak	300 A
Frecuencia de conmutación	2.5 kHz

En este punto de operación nominal determinado para el inversor trifásico y con ayuda de las variables eléctricas observadas en la Figura 6 y la Figura 7, se obtienen las especificaciones técnicas para los semiconductores de potencia que permitirán realizar la búsqueda comercial de esta componente, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Variables eléctricas para semiconductor de potencia utilizado en el inversor trifásico.

Operación Nominal Semiconductor de Potencia – Etapa R1	
Tensión mínima de bloqueo	750 V
Tensión promedio	375 V
Corriente peak de conducción	307 A
Corriente promedio	47 A
Corriente RMS	124 A
Frecuencia de Conmutación	2.5 kHz

- Dentro de los equipos a considerar que permitan cumplir con estos requisitos [1], se encuentran:
- El convertidor de Danfoss [VACON](#).
- El convertidor de Danfoss [EC-C1200](#).

[HES880](#)

2.3 Etapa R2 - Convertidor DC/DC Boost Interleaved

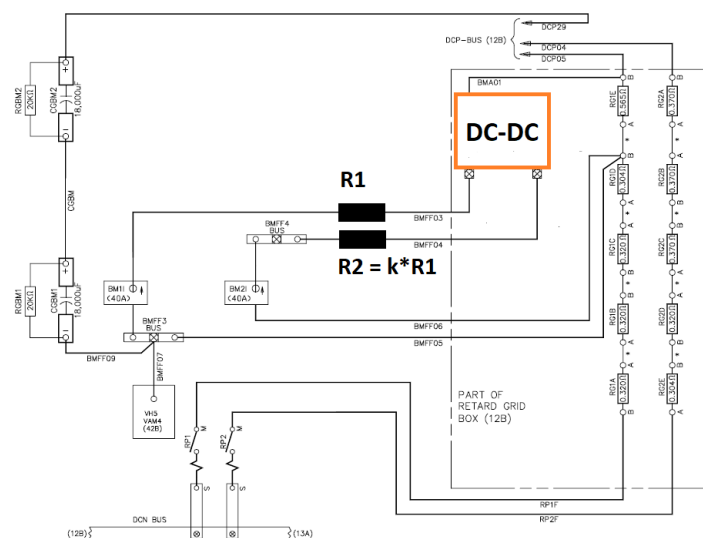


Figura 8. Conexión ramas BMFF03 y BMFF04 al convertidor DC-DC, incluyendo resistencias de balance [2].

Dada la operación nominal del inversor trifásico, cuyas variables se muestran en la Tabla 3, se diseña la etapa R2 con la finalidad de poder lograr dicho punto de operación.

Para ello, esta etapa se debe conectar en paralelo a una de las resistencias de la parrilla de retardo. Una de sus conexiones será a través de los sensores BM11 y BM21 por medio de las resistencias R1 y R2, como se muestra en la Figura 8. Tal como se mencionó en [2], el objetivo es que las corrientes a través de estos sensores se distribuye de forma equitativa asumiendo que R1 sea igual a R2, aunque podría existir una diferencia en estas resistencias que produzca un desbalance entre las corrientes. Dicho desbalance entre corrientes no debe superar los 35 A. Por lo tanto, en estas simulaciones se mantendrá una diferencia de un 20% de R2 sobre R1 ($k=1.2$), tal como se estableció en [2], con tal de verificar el comportamiento de las corriente frente a esta diferencia.

A partir de los resultados de simulación obtenidos con ayuda del HIL, se conoce el rango de operación de las variables eléctricas de entrada, tal como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Variables de entrada del convertidor DC/DC.

Rango Variables de entrada Convertidor DC/DC	
Tensión enlace DC principal 940E-4.	1000 - 1500 V
Tensión de entrada convertidor DC-DC.	260 - 360 V
Corriente de entrada convertidor DC-DC.	110 - 280 A

Es necesario considerar en esta etapa el consumo eléctrico que debe tener el sistema AC, el cuál debe estar acotado dentro de los rangos impuestos por el ICP, con tal de que no se dispare alguna alarma. Las alarmas en consideración son las que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de códigos de alarmas relacionadas con la operación de los blowers DC luego de 1.5 s [2].

Código de alarma	Descripción	Límites
36/01	Blower 1 detenido (sobre consumo)	B1AMPSI \geq 300 A
36/02	Blower 2 detenido (sobre consumo)	B2AMPS \geq 300 A
36/03	Blower 1 abierto (bajo consumo)	B1AMPS \leq 70 A
36/04	Blower 2 abierto (bajo consumo)	B2AMPS \leq 70 A
36/05	Diferencia de consumo entre Blowers muy alta	B1AMPS – B2AMPS \leq 35 A

Con la información respecto a la operación de las variables del convertido DC-DC, se diseñan las inductancias de fase del convertidor de potencia, utilizando la siguiente inecuación:

$$L \geq \frac{V_{in} T_s D}{\Delta I_L}$$

- L : Inductancia.
- V_{in} : Tensión de entrada.
- D : Ciclo de trabajo.
- T_s : Periodo de muestreo.
- ΔI_L : Corriente de rizado a través de inductancias de fase.

Se eligen 3 diferentes porcentajes de rizado en la corriente de fase ΔI_L respecto a la corriente de entrada I_{in} , lo que permitirá obtener 3 diferentes valores para las inductancias de fase. Además, se simulará el convertidor DC-DC sin considerar un desfase entre portadoras, o sea, sin operación interleaved, considerando de esta forma la implementación que se tiene a través del HIL por limitaciones de hardware. Luego se generará un desfase entre las portadoras que permitan dar con el modo de operación interleaved.

La finalidad de estas pruebas es conocer los escenarios factibles de operación del sistema.

2.3.1 Inductancia $L=470 \mu\text{H}$

Este valor de inductancia es seleccionado considerando un rizado de corriente de fase equivalente al 30% de la corriente nominal de entrada ($\Delta I_L = 79 \text{ [A]}$). Con este valor, se procede a simular y obtener el comportamiento de la corriente de entrada en operación nominal para el modo no interleaved y el modo interleaved, analizando las corrientes a través de los sensores BM1I y BM2I.

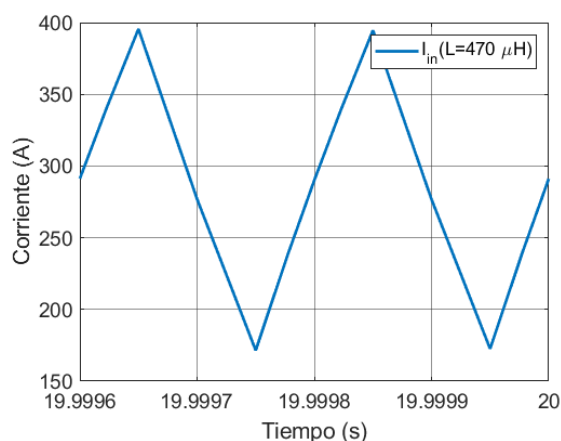


Figura 9. Corriente de entrada convertidor DC-DC, Modo no interleaved.

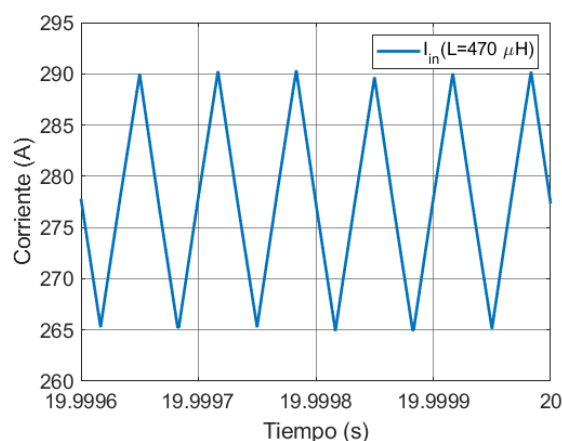


Figura 10. Corrientes de entrada del convertidor DC-DC, modo interleaved.

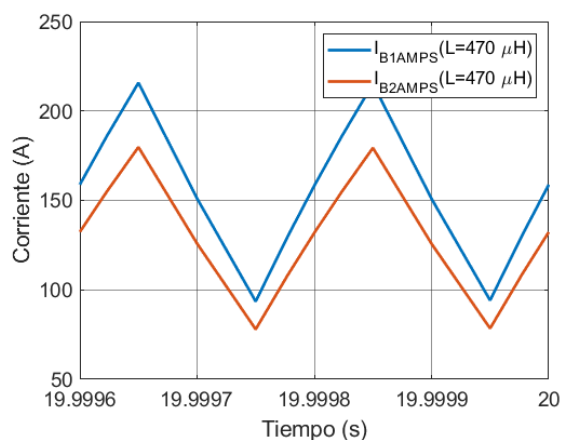


Figura 11. Corrientes a través de sensores B1AMPS y B2AMPS, modo no interleaved.

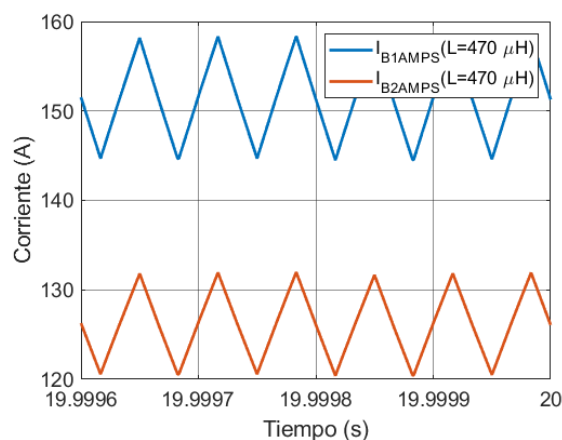


Figura 12. Corrientes a través de sensores B1AMPS y B2AMPS, modo interleaved.

En modo no interleaved, como se puede ver a través de la Figura 9 y la Figura 11, se obtienen las siguientes corrientes:

- Corriente de entrada:
 - Valor medio= 278 [A].
 - Valor máximo= 396 [A].
 - Valor mínimo= 171 [A].
- Corriente B1AMPS:
 - Valor medio= 155 [A].
 - Valor máximo= 216 [A].
 - Valor mínimo= 94 [A].
- Corriente B2AMPS:
 - Valor medio= 129 [A].

- Valor máximo= 180 [A]
 - Valor mínimo= 78 [A]
- Diferencia B1AMPS y B2AMPS:
 - Diferencia valor medio= 26 A
 - Diferencia valor máximo= 36 A
 - Diferencia valor mínimo= 16 A

En modo interleaved, se obtienen los siguientes valores para las corrientes, como se puede ver a través de la Figura 10 y la Figura 12:

- Corriente de entrada:
 - Valor medio= 278 [A].
 - Valor máximo= 290 [A].
 - Valor mínimo= 265 [A].
- Corriente B1AMPS:
 - Valor medio= 151 [A].
 - Valor máximo= 158 [A].
 - Valor mínimo= 145 [A].
- Corriente B2AMPS:
 - Valor medio= 126 [A].
 - Valor máximo=132 [A].
 - Valor mínimo=120 [A]
- Diferencia B1AMPS y B2AMPS:
 - Diferencia valor medio= 25 A.
 - Diferencia valor máximo= 26 A.
 - Diferencia valor mínimo= 25 A.

2.3.2 Inductancia $L=350\text{mH}$

Este valor de inductancia es seleccionado considerando un rizado de corriente de fase equivalente del 40% de la corriente nominal de entrada, equivalente a $\Delta I_L = 105 \text{ [A]}$. Se repite el proceso de la subsección anterior, para determinar el comportamiento de las corrientes.

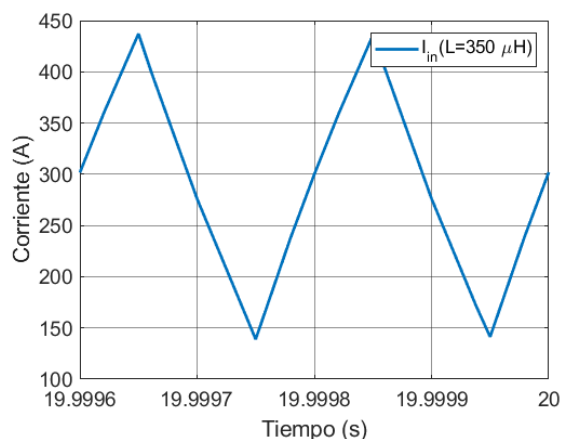


Figura 13. Corriente de entrada convertidor DC-DC, modo no interleaved.

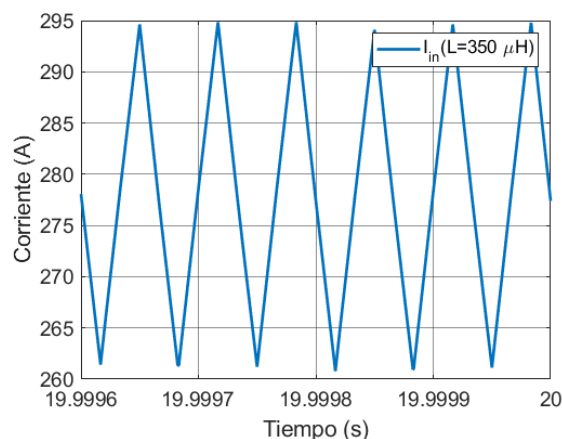


Figura 14. Corriente de entrada del convertidor DC-DC, modo interleaved.

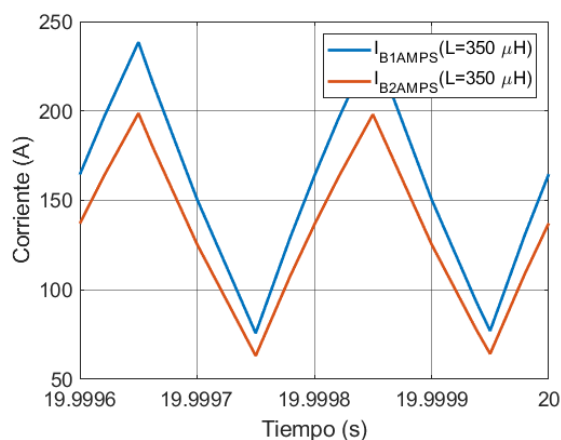


Figura 15. Corrientes a través de sensores B1AMPS y B2AMPS, modo no interleaved.

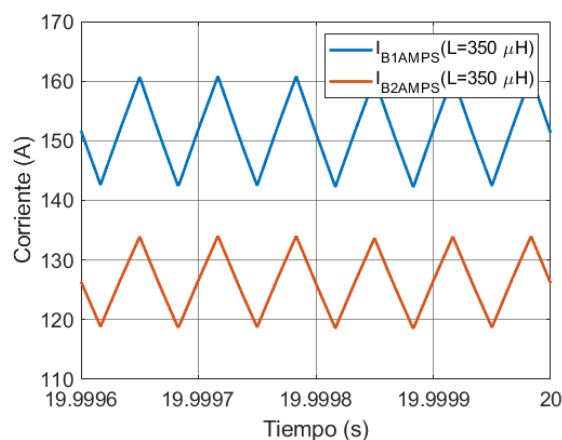


Figura 16. Corrientes a través de sensores B1AMPS y B2AMPS, modo interleaved.

En modo no interleaved, se obtienen los siguientes valores para las corrientes, como se puede ver a través de la Figura 13 y la Figura 15:

- Corriente de entrada:
 - Valor medio= 289 A
 - Valor máximo= 437 A
 - Valor mínimo= 138 A
- Corriente B1AMPS:
 - Valor medio= 158 A
 - Valor máximo= 238 A
 - Valor mínimo= 76 A
- Corriente B2AMPS:

- Valor medio= 131 A
 - Valor máximo= 198 A
 - Valor mínimo= 63 A
- Diferencia B1AMPS y B2AMPS:
 - Diferencia valor medio= 27 A
 - Diferencia valor máximo= 40 A
 - Diferencia valor mínimo= 13 A

En modo interleaved, (Figura 14 y Figura 16), las corrientes son:

- Corriente de entrada:
 - Valor medio= 278 A
 - Valor máximo= 295 A
 - Valor mínimo= 261 A
- Corriente B1AMPS:
 - Valor medio= 152 A
 - Valor máximo= 161 A
 - Valor mínimo= 142 A
- Corriente B2AMPS:
 - Valor medio= 126 A
 - Valor máximo=134 A
 - Valor mínimo=119 A
- Diferencia B1AMPS y B2AMPS:
 - Diferencia valor medio= 26 A
 - Diferencia valor máximo= 27 A
 - Diferencia valor mínimo= 23 A

2.3.3 Inductancia $L=280\text{mH}$

Por último, se evalúa una inductancia de 280 mH considerando un rizado de corriente de fase equivalente del 50% de la corriente nominal de entrada, ($\Delta I_L = 132 \text{ [A]}$).

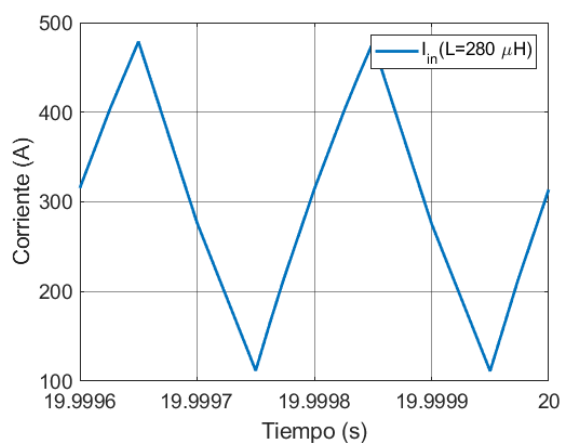


Figura 17. Corriente de entrada convertidor DC-DC, modo no interleaved.

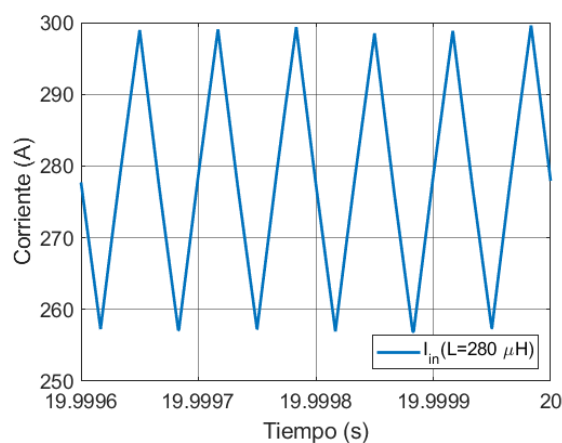


Figura 18. Corriente de entrada del convertidor DC-DC, modo interleaved.

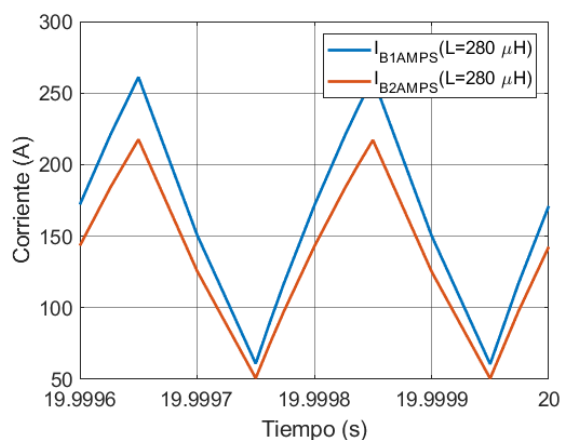


Figura 19. Corrientes a través de sensores B1AMPS y B2AMPS, modo no interleaved.

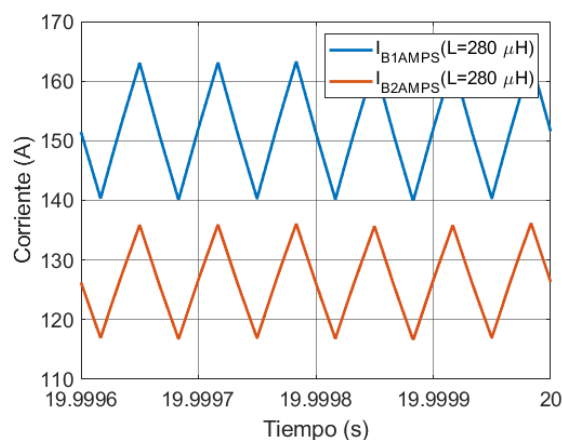


Figura 20. Corrientes a través de sensores B1AMPS y B2AMPS, modo interleaved.

En modo no interleaved, (Figura 17 y Figura 19), las corrientes son:

- Corriente de entrada:
 - Valor medio= 296 A
 - Valor máximo= 479 A
 - Valor mínimo= 111 A
- Corriente B1AMPS:
 - Valor medio= 162 A
 - Valor máximo= 261 A
 - Valor mínimo= 61 A
- Corriente B2AMPS:
 - Valor medio= 135 A

- Valor máximo= 218 A
- Valor mínimo= 51 A
- Diferencia B1AMPS y B2AMPS:
 - Diferencia valor medio=27 A
 - Diferencia valor máximo= 43 A
 - Diferencia valor mínimo= 10 A

En modo interleaved (Figura 18 y Figura 20), las corrientes son:

- Corriente de entrada:
 - Valor medio= 278 A
 - Valor máximo= 300 A
 - Valor mínimo= 257 A
- Corriente B1AMPS:
 - Valor medio= 152 A
 - Valor máximo= 163 A
 - Valor mínimo= 140 A
- Corriente B2AMPS:
 - Valor medio= 126 A
 - Valor máximo=136 A
 - Valor mínimo=117 A
- Diferencia B1AMPS y B2AMPS:
 - Diferencia valor medio=26 A
 - Diferencia valor máximo= 27 A
 - Diferencia valor mínimo= 23 A

2.3.4 Consideraciones elección de inductancia

Frente a los resultados mostrados anteriormente, se destaca que ninguna de las inductancias dentro del rango señalado hace posible trabajar en modo no interleaved, ya que esto podría gatillar una alarma del ICP, en específico la alarma 36/05, la cual se relaciona a la diferencia de corriente que no debe ser superior a 35 A. La inductancia más cerca de cumplir este requerimiento es la de 470 uH, por lo que un valor superior a esta podría permitir la utilización del modo no interleaved sin gatillar la alarma 36/05. Además, se debe considerar que se utilizaron resistencias $R_1 = 10[m\Omega]$ y $R_2 = 12[m\Omega]$, por lo que se podría tolerar una diferencia menor estas ($k < 1.2$) para lograr estar por debajo de los 35 A de diferencia entre las corrientes. Respecto a los otros dos inductores, estos además podrían gatillar alarmas relacionadas al bajo consumo (36/03 y 36/04).

En el caso de la operación en modo interleaved, cualquier inductancia permite la operación normal del sistema AC sin gatillar ninguna alarma del ICP. Respecto a la corriente de fase del convertidor de potencia, esta se puede ver en la Figura 21, mostrando el rizado otorgado por cada inductancia, cuyo valor medio de la corriente corresponde a 93 A.

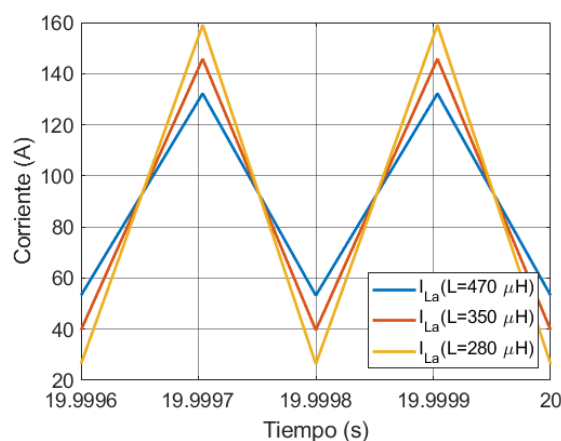


Figura 21. Corriente de fase a, convertidor DC-DC en modo interleaved, para los tres diferentes valores de inductancias obtenidas.

Frente a esto, considerando un modo de operación interleaved, se decide utilizar la inductancia de 280 uH, producto de que, si es necesario aumentar el valor de esta inductancia, aún se podría considerar una de las otras dos opciones. Sin embargo, se tiene en consideración de que esta opción otorga un mayor rizado en las corrientes de fase del convertidor DC-DC. A continuación, las consideraciones a tener en la elección del inductor para operación nominal.

Tabla 7. Operación nominal de inductor.

Operación Nominal – Inductor	
Inductancia	280 uH
Tensión RMS	372 V
Corriente de rizado	132 A
Corriente DC	93 A
Corriente RMS	38 A
Frecuencia de Conmutación	5 kHz

2.3.5 Capacitor enlace DC secundario

Para la elección del capacitor de enlace DC, la siguiente inecuación permite relacionar parámetros y variables del convertidor con el capacitor de salida necesario:

$$C \geq \frac{DV_o}{R\Delta V_o F_s}$$

- R : Resistencia de 5.36 [Ohm], cuyo consumo es equivalente al consumo de las etapas Es1 y R1 de la Figura 1 en operación nominal.
- ΔV_o : Tensión de rizado.

- V_o : Tensión de salida.
- F_s : Frecuencia de conmutación.

Con estas consideraciones, se obtiene un condensador de 1500 [uF], obteniendo un rizado de tensión a la salida de 12 V aproximadamente, lo que corresponde aproximadamente a un 1.3% de la tensión de salida nominal.

Con este valor de capacitor, se realiza la simulación del convertidor DC-DC, para verificar el comportamiento de las variables de esta componente.

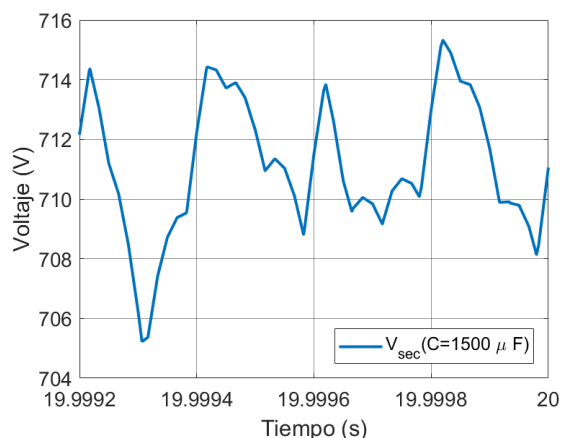


Figura 22. Voltaje Enlace DC secundario, convertidor DC-DC.

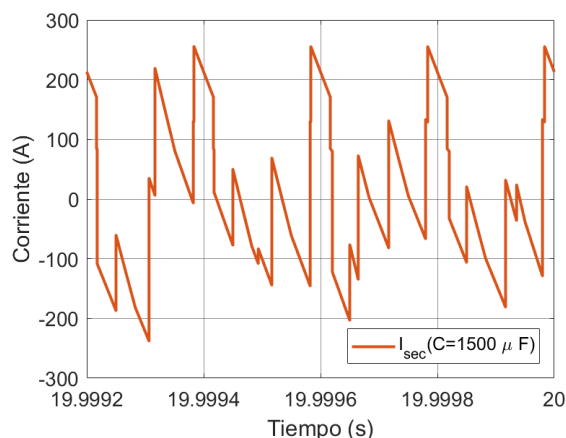


Figura 23. Corriente Enlace DC Secundario, convertidor DC-DC.

De esta forma se distingue la operación nominal del condensador, datos que se en la Tabla 8:

Tabla 8. Operación nominal del capacitor de enlace DC secundario.

Operación Nominal – Capacitor	
Capacitor	1500 uF
Tensión DC	710 V
Tensión de rizado	10 V
Corriente RMS	125 A
Corriente máxima	258 A
Corriente mínima	-250 A

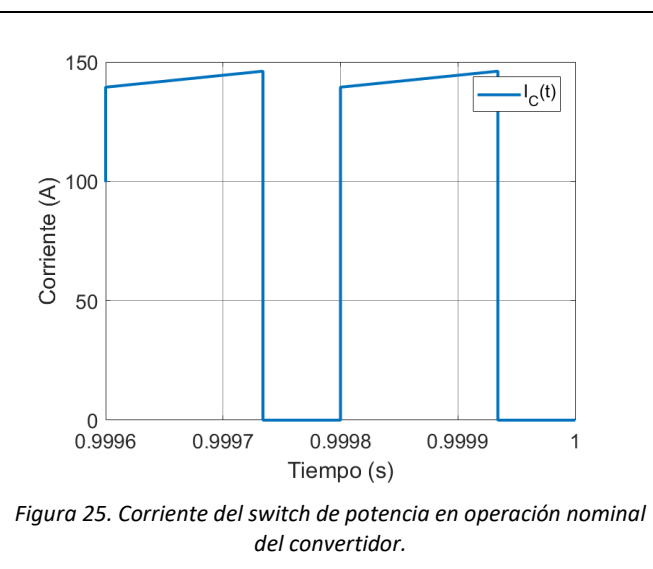
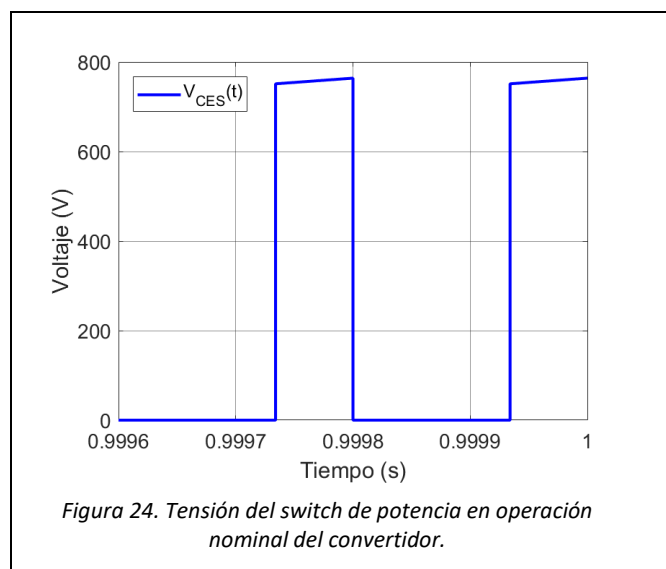
2.3.6 Operación nominal convertidor DC-DC

Por medio de simulación, se obtiene el perfil de operación nominal para el convertidor DC/DC que permitirá entregar la potencia exigida por el inversor trifásico. Se consideró el comportamiento de activación del interruptor RP1 obtenido a partir de las simulaciones con el sistema del control del camión ICP. Esto se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Variables nominales del convertidor DC/DC.

Operación Nominal y Convertidor DC-DC	
Tensión enlace DC principal 940E-4	1000 - 1500 V
Tensión de entrada, DC	260 - 360 V
Tensión de salida, DC	400 - 707 V
Rizado tensión de salida	8 V
Corriente de entrada	117 - 280 A
Rizado corriente de entrada	44 A
Corriente de fase, DC	92 A
Rizado corriente de fase	132 A
Frecuencia de conmutación	5 kHz

A partir del punto de operación del convertidor DC/DC, se visualizan las variables de los semiconductores de potencia, haciendo la distinción entre el switch de potencia y el diodo utilizado.



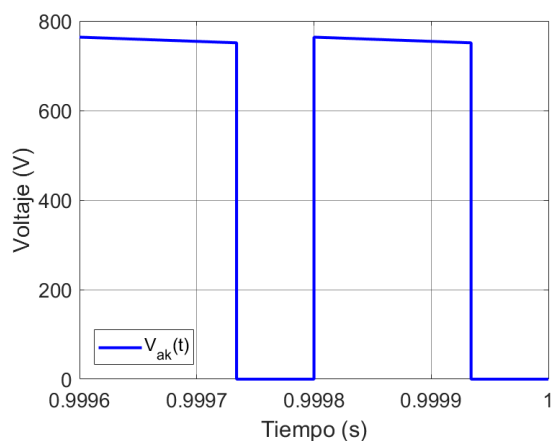


Figura 26. Tensión de bloqueo diodo de potencia en operación nominal del convertidor.

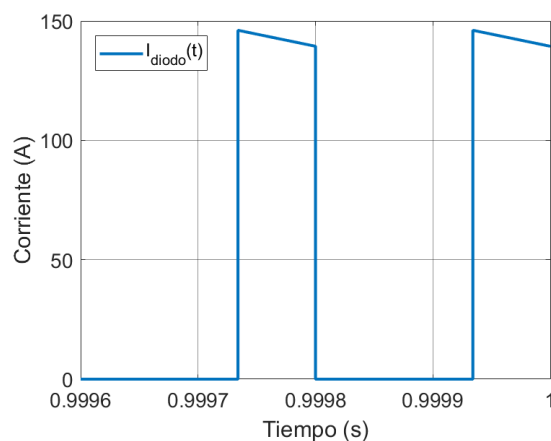


Figura 27. Corriente a través de diodo de potencia en operación nominal del convertidor.

Las cuatro figuras anteriores permiten determinar la operación nominal para los semiconductores de potencia, información que es plasmada a través de la Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10. Variables nominales para switch de potencia.

Operación Nominal - Switch de potencia de fase	
Tensión mínima de bloqueo	750 V
Tensión promedio	250 V
Corriente peak	147 A
Corriente promedio	92 A
Corriente RMS	115 A
Frecuencia de Conmutación	5 kHz

Tabla 11. Variables nominales para diodo de potencia.

Operación Nominal – Diodo de fase	
Tensión máxima de bloqueo	750 V
Corriente máxima	147 A
Corriente promedio	47 A

Corriente RMS	83 A
Frecuencia de Conmutación	5 kHz

3 Fallas Detectables y Protecciones

3.1 Fallas específicas para detectar

A continuación, se presentan las fallas que serán identificadas dentro de la configuración 1.2.

3.1.1 Sobre o baja tensión de entrada.

Si la tensión de entrada al sistema AC no se encuentra dentro del rango que originalmente se consideraba, se podrían tener problemas con la operación de los blowers AC en caso de una tensión muy baja o con un aumento excesivo en la tensión del enlace DC secundario, lo que podría ocasionar un daño en el capacitor utilizado como enlace DC secundario. Esto podría tener relación con el evento de falla 46 – *Retard Short Circuit* del camión 930E-4 [3], que tiene relación con un cortocircuito en la parrilla de retardo, lo que podría significar una sobretensión de entrada.

3.1.2 Cortocircuito fase DCDC.

En caso de que uno de los semiconductores de potencia del convertidor DC/DC fallaran, podría existir un cortocircuito en una de las fases del convertidor, lo que podría además dañar al inductor de la fase producto del exceso de corriente originado.

3.1.3 Sobre o baja tensión DC link secundario.

Es necesario considerar los niveles de tensión en el enlace DC secundario, con la finalidad de considerar si se está entregando la tensión de línea necesaria para las maquinas o si se tiene un exceso de tensión que pueda dañar al enlace DC secundario.

3.1.4 Cortocircuito fases inversor.

En caso de que alguno de los semiconductores de potencia del inversor falle, se podría originar un exceso de corriente por alguna de las fases dañadas del inversor, lo que podría dañar al semiconductor complementario y evitar que los motores funcionen de forma correcta.

3.1.5 Exceso de temperatura en semiconductores.

Debido a las pérdidas de conducción o conmutación, las cuales se expresan en un aumento de la temperatura de los semiconductores de potencia, se podría originar una falla de estos a razón de un exceso de temperatura, provocando la inutilización de algún convertidor.

3.2 Protecciones ante fallas y mediciones.

Dentro de las fallas a reconocer, se consideran las siguientes protecciones y puntos de medición:

3.2.1 Fusibles ultra rápidos

Los fusibles ultra rápidos permiten proteger a los semiconductores de potencia frente a cortocircuitos originados. Cuentan con una alta capacidad de corriente de corte (hasta 300 kA), lo que permite prevenir el estrés térmico y eléctrico del resto de las componentes.

Esta componente será diseñada para la una corriente de cortocircuito superior a la corriente nominal, con la finalidad de que pueda actuar rápido, evitando el deterioro de algún semiconductor.



Figura 28. Fusible ultra rápido Weg, modelo FNH00.

3.2.2 Disyuntores

Los disyuntores tienen la función de proteger principalmente a los semiconductores de potencia incorporados en el sistema AC de sobre corriente mediante protección magnética. La idea es que este dispositivo sea diseñado para proteger una sobre corriente de varias veces la corriente nominal del circuito, pero inferior a la corriente del fusible ultra rápido, debido a que su velocidad de acción es más lenta. Por lo tanto, se conectará un disyuntor en serie a un fusible, con la finalidad de abarcar así un rango mayor de fallas.



Figura 29. Disyuntor para motores Schneider Electric, modelo GV3P P50.

3.2.3 Sensores

Para analizar el comportamiento de las variables y determinar acciones de control, se utilizarán sensores de corriente y tensión en los puntos del sistema AC en donde puedan existir posibles fallas. Además, se utilizarán mediciones de temperatura como termocuplas, que permitan analizar la temperatura en los semiconductores utilizados.

3.2.4 Contactores

El sistema AC contará con contactores que podrán ser controlados desde el sistema de control, resguardando el equipo en caso de comportamientos anómalos detectados por medio de los sensores incorporados.

4 Sistema de Control

El sistema de control no solo debe ser utilizado para el control de las variables eléctricas del sistema, sino que además debe considerar acciones frente a las fallas comentadas anteriormente.

4.1 Requerimientos

- **Alimentación**

La alimentación debe provenir de un equipo que sea capaz de entregarle una tensión continua, considerando además que, a pesar de que el camión no se encuentre funcionando, el sistema de control sea capaz de entregar información sobre los datos almacenados del funcionamiento del sistema AC. Una de las propuestas es que el sistema de alimentación se conecte al mismo punto del sistema AC (en paralelo a resistencia de parrilla de retardo), lo que considera que el sistema de control sólo funcionará cada vez que el contactor RP1 se cierre. Esto involucrará un retardo de encendido de la plataforma de control.

Otra alternativa es que la alimentación auxiliar se conecte a un punto de alimentación interna del camión que le permita tener alimentación de forma tal que la plataforma de control se encuentre continuamente operativo, independiente si el sistema AC se encuentra en operación o no.

- **Mediciones (sensores)**

Los sensores mencionados anteriormente serán utilizados para implementar acciones de control que permitan dar con el desempeño esperado o dar a conocer anomalías del sistema. Estos sensores consideran sensores de voltaje, sensores de corriente y sensores de temperatura para los módulos de potencia. Para la lectura de las señales provenientes de estos sensores, la plataforma de control deberá contar con acondicionamiento de las señales medidas para conectarse a los ADCs que contenga esta plataforma de control.

- **Actuaciones**

Las actuaciones principales corresponden al funcionamiento de los semiconductores de potencia de los convertidores internos, además de otros interruptores dentro del sistema AC que permitan resguardar su funcionamiento.

- **Comunicaciones**

La comunicación considerará un protocolo serial que permita identificar diferentes eventos como los estados de conmutación de los switches de potencia y la lectura de los diferentes sensores, considerando de esta forma alguno de los principales reportes que se deben obtener a partir del sistema de control.

4.2 Diagrama de control

Considerando las fallas a tener, protecciones y las características del sistema de control propuesto, se propone el siguiente esquema de control, que incorpora las medidas y soluciones para hacer frente a las fallas y poder realizar el control necesario del sistema.

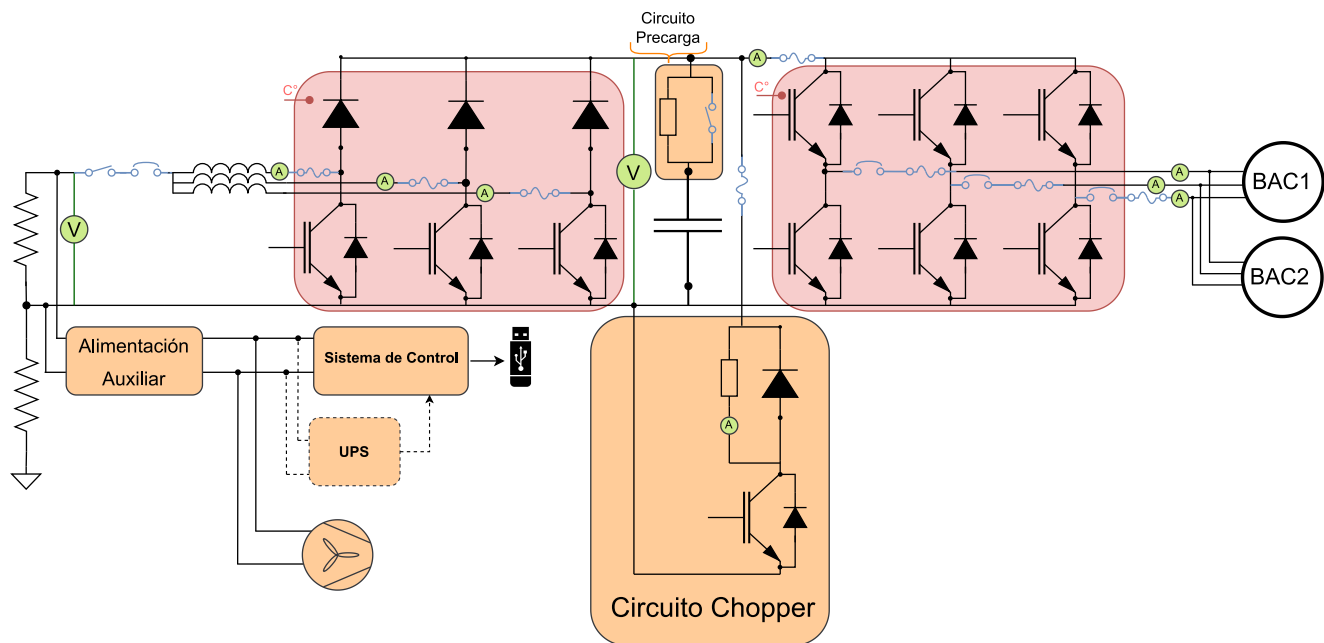


Figura 30. Esquema general de la configuración 1.2 implementada.

Del diagrama que se observa en la Figura 30, se puede observar las diferentes componentes implementadas, señalando:

- Protecciones eléctricas como contactores, disyuntores y fusibles (color azul).
- Medición de variables eléctricas (color verde).
- Medición de temperatura (color rojo).
- Equipos adicionales al sistema AC (color naranja).

4.3 Circuitos adicionales

A continuación, se comentan sobre los circuitos adicionales dentro del sistema AC.

4.3.1 Sistema de control

Sistema de control cuya función principal corresponde a medición de variables eléctricas, térmicas y acción frente a la conmutación de los semiconductores de potencia, además de la activación y desactivación de interruptores de seguridad. Dado el esquema de la Figura 30, la plataforma de control debe permitir:

- Lectura de 10 mediciones de variables eléctricas (8 sensores de corriente, 2 sensores de voltaje).
- Lectura de medición de temperatura de los módulos de potencia (2 mediciones de sensores de temperatura).
- Envío de 10 señales de disparo (3 para DC-DC, 6 para DC-AC, una para chopper).
- Señal para contactor de circuito de precarga.
- Señal para contactor de habilitación sistema AC.

Frente a cualquier falla interna del sistema AC, se abrirá el contactor de habilitación del sistema AC, lo que activará una falla de bajo consumo como pueden ser las fallas 36/03 y/o 36/04 plasmadas en la Tabla 6.

Se considerará además que la plataforma de control entregue información que pueda ser rescatada con posterioridad.

4.3.2 Alimentación Auxiliar

Equipo que tiene como función alimentar los circuitos adicionales incorporados en el sistema AC. Dentro de las consideraciones está el hecho de que se conecte al mismo punto de la configuración 1.2 ó que se tenga otro punto de alimentación separado, que le permita entregar la potencia necesaria a los equipos.

4.3.3 UPS

En caso de que no se tenga alimentación a partir del sistema auxiliar, se propone la incorporación de una UPS que permita alimentar al sistema de control con tal de extraer información relacionada a los diferentes reportes generados a partir de sus eventos y de la medición de los sensores y que el sistema de control no dependa de la alimentación proveniente de la parrilla de retardo (si es que la opción de conexión del sistema de alimentación auxiliar considera la conexión a la parrilla de retardo).

4.3.4 Circuito Chopper

Circuito límites de activación y desactivación se fijaron en 800V y 600V, para evitar que el enlace DC secundario tenga variaciones excesivas en su tensión. El cálculo de la resistencia depende de la estimación de energía regenerada y el tiempo en que se quiera disipar, por lo que se decidió utilizar una resistencia de $10\ \Omega$.

4.3.5 Circuito de Precarga

El requisito funcional del circuito de precarga es minimizar la corriente de entrada al momento de la partida del sistema. Durante la precarga, el voltaje aumentará de forma lenta con la finalidad de que la corriente de encendido nunca exceda el máximo permitido. Una vez completada la precarga, se desconecta la resistencia de precarga y se añade un camino de baja impedancia una vez que la tensión en el enlace DC secundario haya llegado al valor deseado.

4.3.6 Ventilador

Tiene por objetivo extraer el aire caliente desde el interior del gabinete donde se tenga implementado este sistema AC para los motores, buscando proteger los equipos de temperaturas excesivas por operación.

5 Resultados Simulación Offline

5.1 Sistema AC sin circuitos adicionales

A continuación, se muestran resultados de simulación del sistema AC completo sin la incorporación de circuitos o equipos adicionales. Se hace énfasis que la activación del contactor RP1 se asemejó al comportamiento analizado en las simulaciones con el HIL, considerando que éste se cierra cuando la tensión del enlace DC principal llega a 1000 V app. Además, se consideró un escenario en donde el convertidor DC-DC opera en modo interleaved, considerando este modo de operación para los escenarios posteriores.

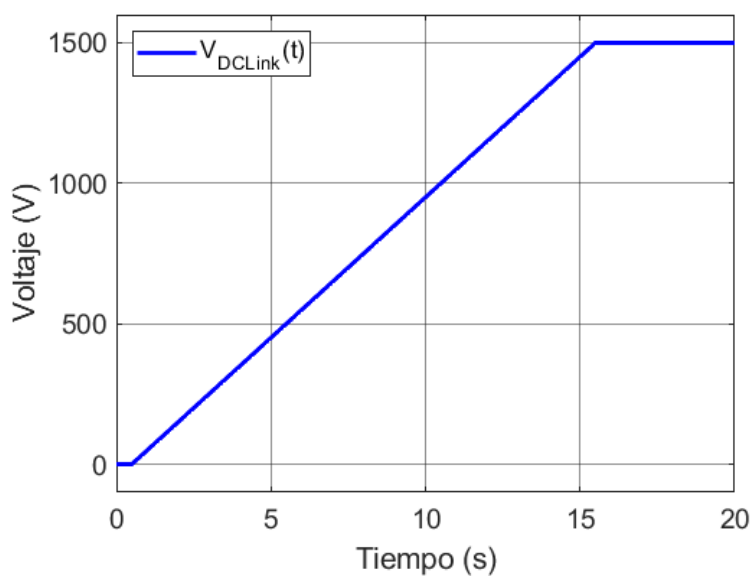


Figura 31. Voltaje de DC Link principal utilizado para la simulación.

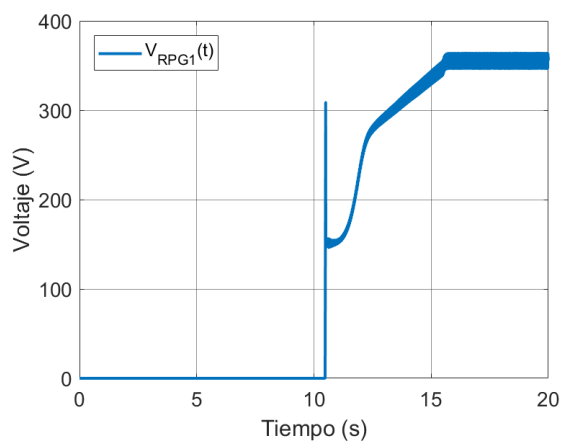


Figura 32. Voltaje de entrada del sistema AC.

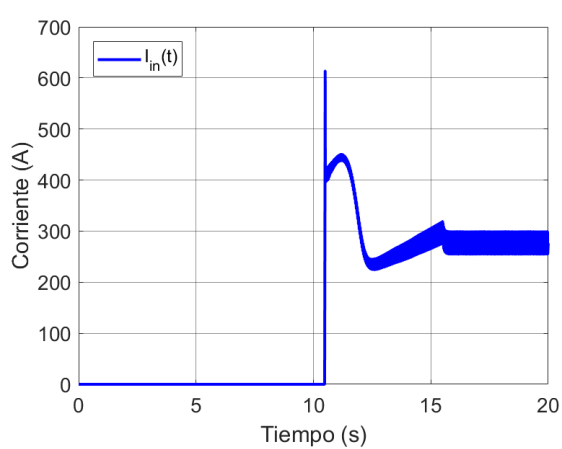


Figura 33. Corriente de entrada del sistema AC.

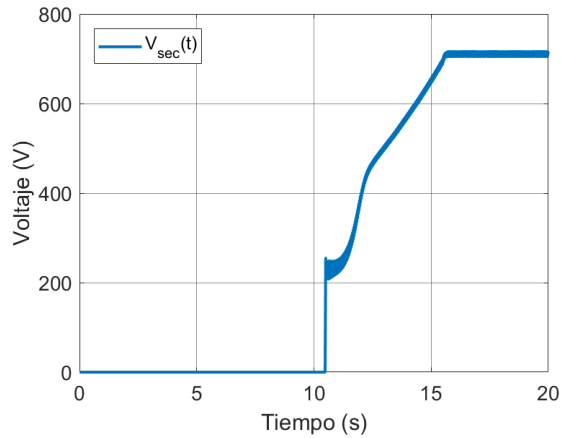


Figura 34. Tensión enlace DC secundario.

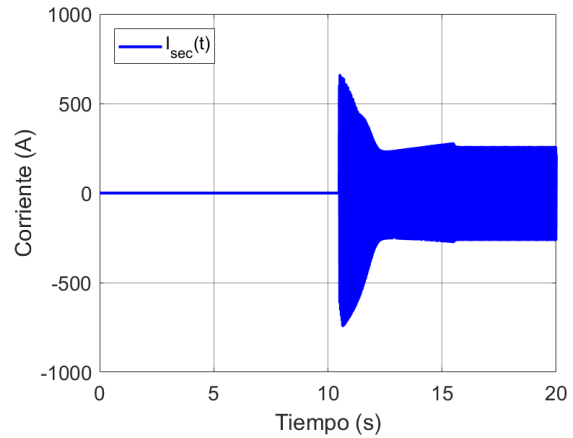


Figura 35. Corriente enlace DC secundario.

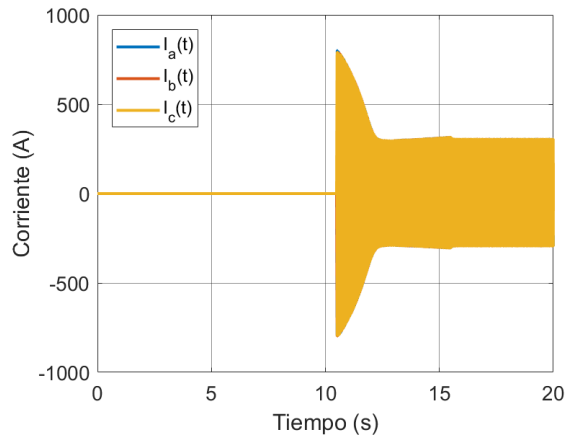


Figura 36. Corrientes de salida inductor trifásico.

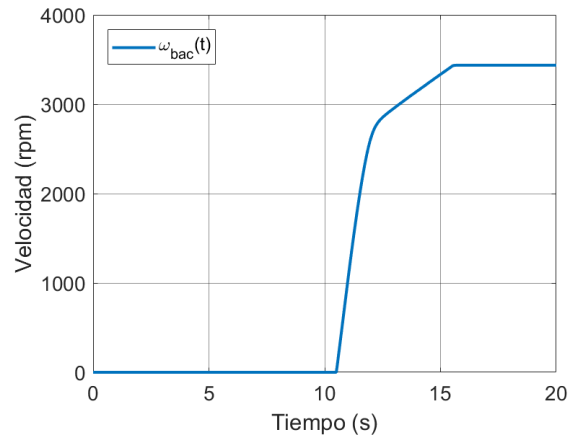


Figura 37. Velocidad de blower AC.

Se observa a través de la Figura 37 que los motores logran llegar a la velocidad esperada. Sin embargo, el comportamiento de las variables eléctricas internas del sistema AC puede ser mejorado con la incorporación de los circuitos adicionales.

5.2 Implementación primer circuito adicional

Anteriormente en [2], se propuso y se diseñó un circuito chopper con la finalidad de mantener acotada la tensión en el enlace DC secundario. Se propuso que el circuito chopper operara cuando la tensión fuera superior a 800 V e inferior a 600 V, cuya resistencia tiene un valor igual a $R_{ch} = 10[\Omega]$.

A continuación, se observará el comportamiento de las variables mostradas anteriormente con la incorporación de este circuito.

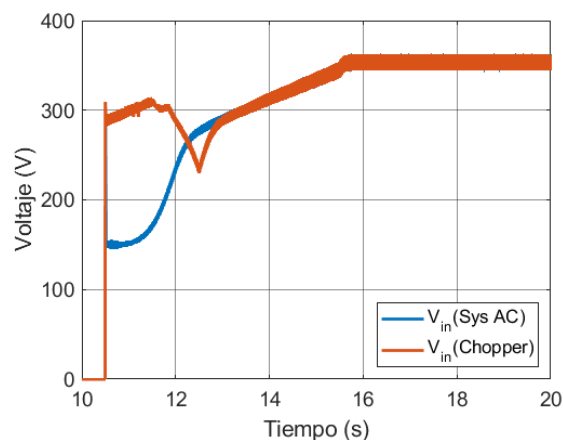


Figura 38. Comparación tensión de entrada para el sistema AC original (Sys AC) y el sistema AC con la incorporación del chopper.

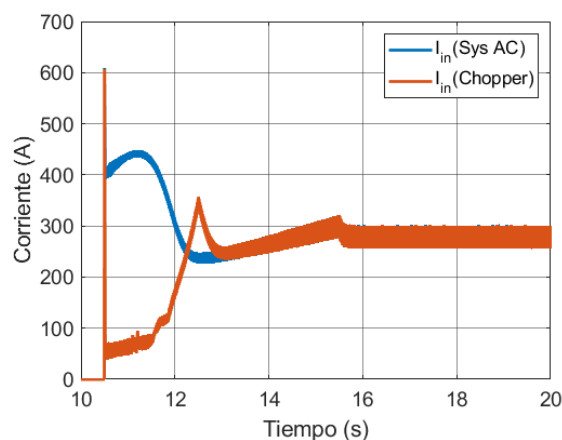


Figura 39. Comparación corriente de entrada para el sistema AC original (Sys AC) y el sistema AC con la incorporación del chopper.

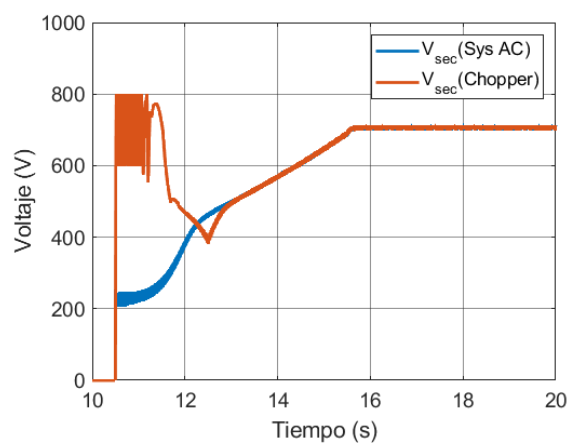


Figura 40. Comparación de la tensión de enlace DC secundario, sistema AC original (Sys AC) y sistema AC con chopper incorporado.

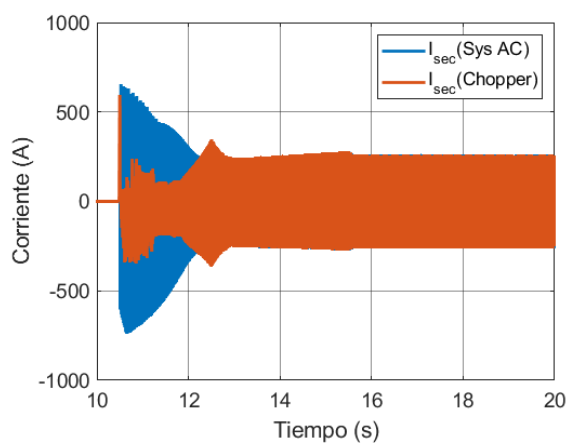


Figura 41. Comparación de corrientes de enlace DC secundario, sistema AC original (Sys AC) y sistema AC con chopper incorporado.

A partir de los resultados graficados anteriormente, se observa que el chopper permite obtener el mismo punto de operación nominal al sistema AC. Además, se posible limitar la tensión en el enlace DC secundario con la finalidad de poder cargarlo de forma más rápida. Esto además permitió disminuir la corriente inicial del condensador de enlace DC secundario.

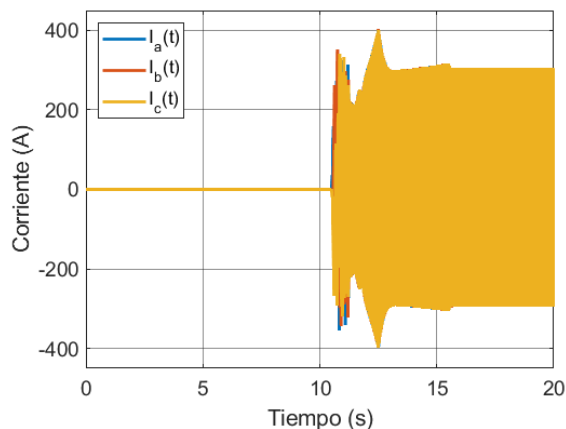


Figura 42. Corrientes de entrada a los blower, con chopper incorporado al sistema AC.

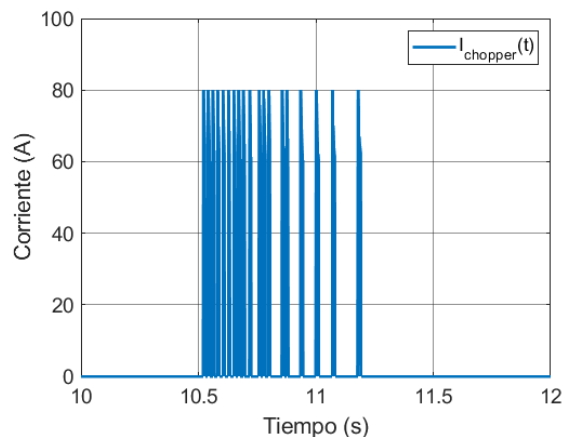


Figura 43. Corriente a través de la resistencia del chopper.

Además, la corriente inicial exigida por los blowers cuando se incorpora el chopper (Figura 42) disminuye considerablemente en comparación con el consumo original visto en la Figura 36. Por último, se analiza la corriente a través de la resistencia chopper por medio de la Figura 43, cuya potencia promedio equivale a 2 kW y la potencia peak puede alcanzar los 64 kW, operando a una tensión que varía entre 600 a 800 V, tal como se observa en la Figura 44. Este consumo se obtiene producto del arranque del sistema AC, ya que al obtener una tensión cercana y estable a 700 V en el enlace DC secundario, y sin que se active nuevamente el circuito chooper producto de una tensión por sobre los 800 V, el circuito deja de operar.

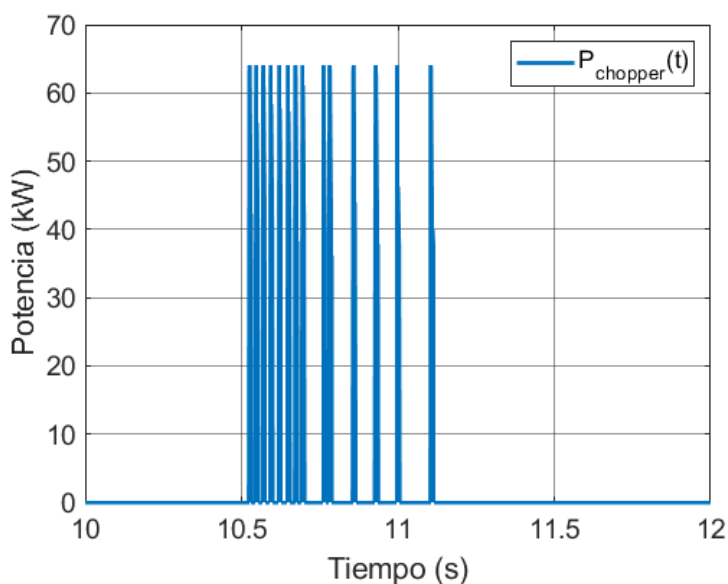


Figura 44. Potencia consumida por el chooper durante su activación.

A pesar de las ventajas de incorporar el circuito chopper como primer circuito adicional, se puede mejorar el di/dt en la partida para los semiconductores de potencia involucrados en el convertidor DC-DC y del enlace DC secundario, ya que la incorporación del chopper mantiene el mismo comportamiento inicial, tal como se observa en la Figura 41, Figura 45 y Figura 46.

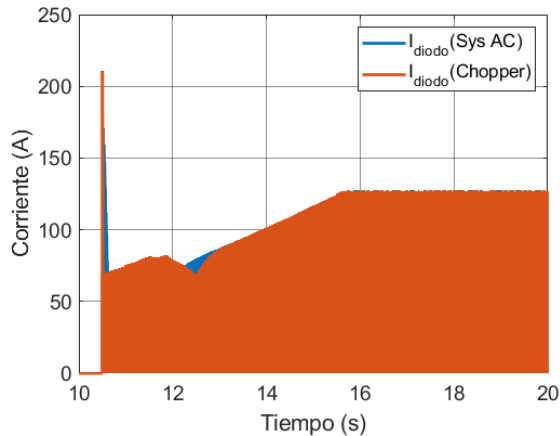


Figura 45. Comparación de corrientes en el diodo para el sistema AC original (Sys AC) y el sistema AC con el chopper incorporado.

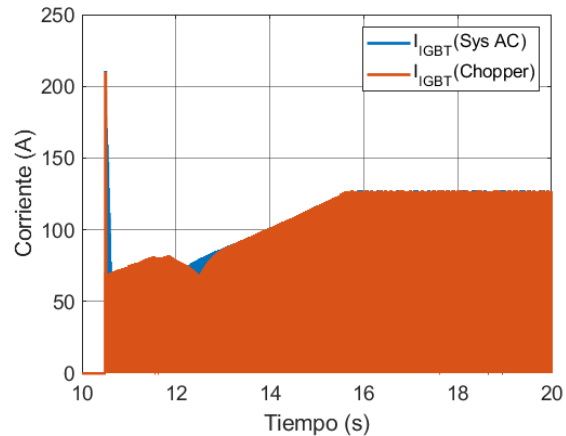


Figura 46. Comparación de corrientes en el IGBT de una fase del convertidor DC-DC para el sistema AC original (Sys AC) y el sistema AC con chopper incorporado.

Esto hace necesario considerar la incorporación de un segundo circuito adicional al sistema AC, para mejorar este comportamiento.

5.3 Implementación segundo circuito adicional

Se agrega un circuito de precarga al sistema AC en conjunto con el chopper, con la finalidad de corregir algunos comportamientos mostrados anteriormente. Para el diseño del circuito de precarga, se consideran diferentes valores de resistencia y con ello, se analizará el cambio en el transiente de diferentes variables internas del sistema AC, para dar con un desempeño que mejore los casos anteriores.

Se analizará la corriente a través de la resistencia de precarga elegida en cada caso y se compararán con el caso en que sólo se utilice el chopper sin el circuito de precarga, indicando en la variable medida este escenario (ej: $V_{in}(\text{Chopper})$ indica que se realizó la medición de V_{in} sin considerar el circuito de precarga, sólo considerando la incorporación del chopper). Además se analizará la potencia peak, potencia promedio y tiempo de operación del circuito de precarga de precarga, analizando la corriente medida a través de la resistencia de precarga.

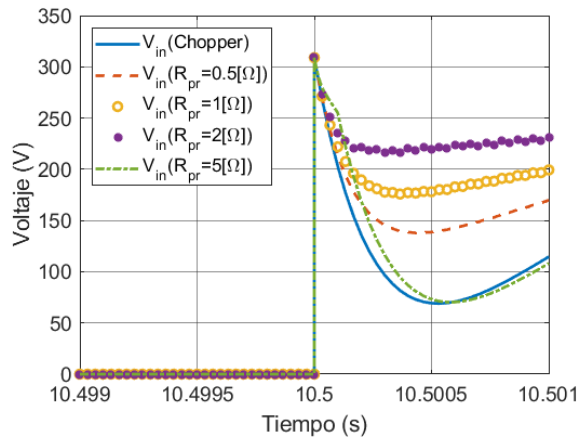


Figura 47. Voltaje de entrada para la incorporación de un circuito de precarga con diferentes valores en su resistencia.

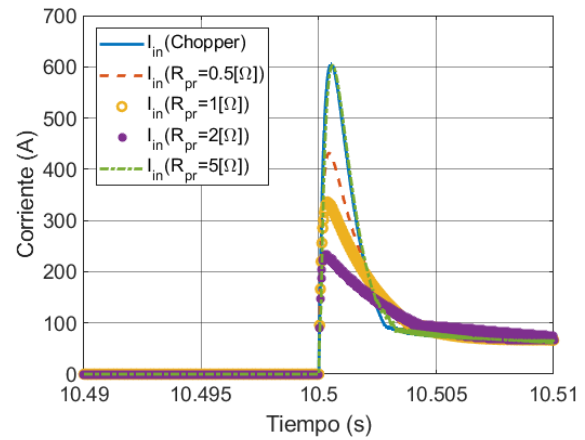


Figura 48. Comparación de corriente de entrada para diferentes resistencias en el circuito de precarga.

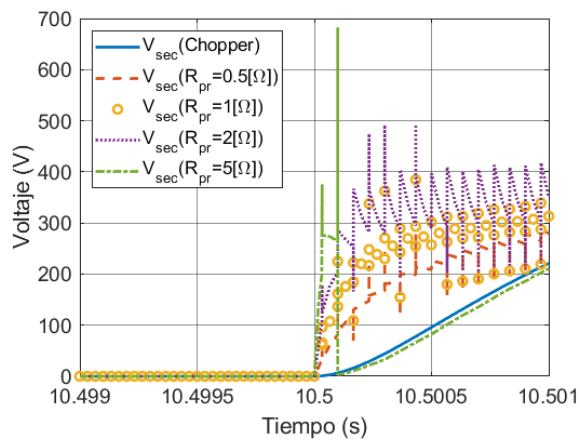


Figura 49. Tensión en el enlace DC secundario para diferentes resistencias en el circuito de precarga.

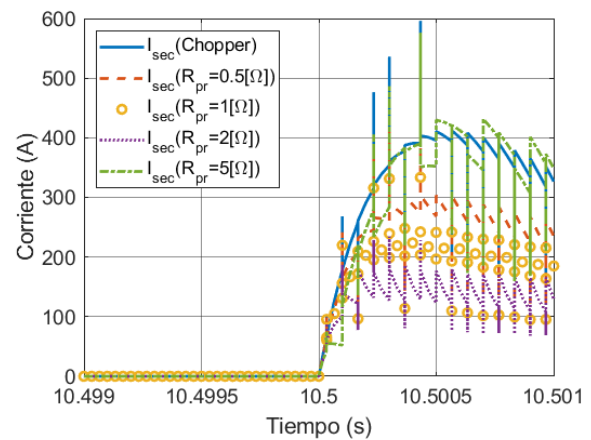


Figura 50. Corriente en enlace DC secundario para diferentes resistencias en el circuito de precarga.

La incorporación muestra el desempeño del transiente de las variables frente a la incorporación del circuito de precarga. Se puede determinar que existe un rango en el que esta resistencia permite otorgar una reducción en los di/dt mostrados en las figuras Figura 48 y Figura 50, reconociendo el mejor de los casos para la resistencia de $2[\Omega]$.

Para el caso de los semiconductores de potencia utilizados en el convertidor DC-DC, se puede observar en la Figura 51 y la Figura 52 la reducción que puede traer la incorporación del circuito de precarga, disminuyendo incluso a la mitad del valor original.

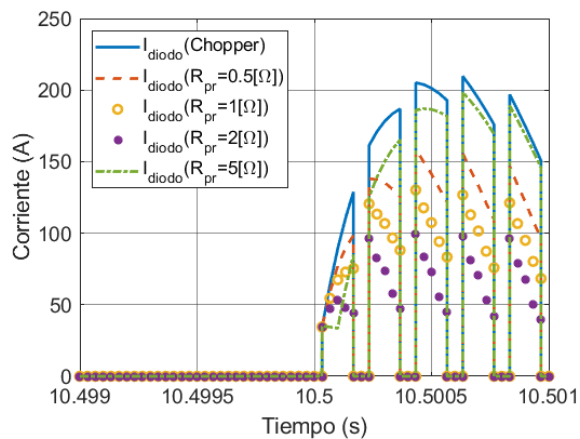


Figura 51. Variación de corriente del diodo de fase del convertidor DC-DC para diferentes valores en la resistencia de precarga.

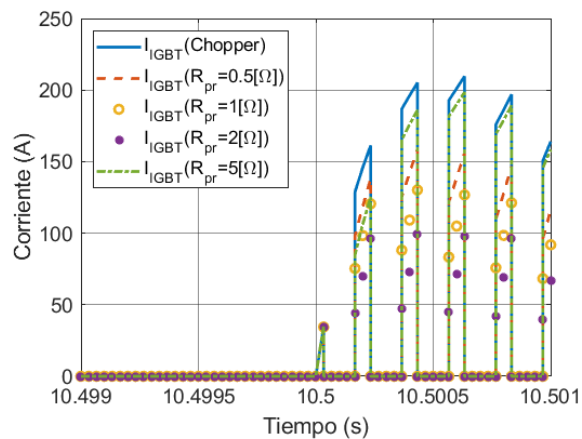


Figura 52. Variación corriente del IGBT de fase del convertidor DC-DC para diferentes valores en la resistencia de precarga.

Además, se analizan las corrientes a través de la resistencia de precarga, con tal de determinar la potencia peak y potencia promedio consumida por este sistema.

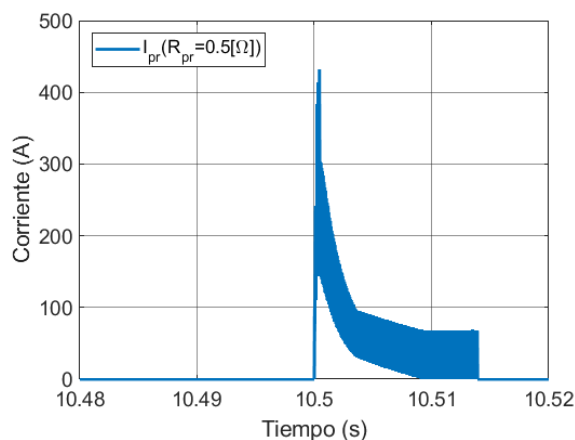


Figura 53. Corriente a través de circuito de precarga, para $R_{pr} = 0.5[\Omega]$.

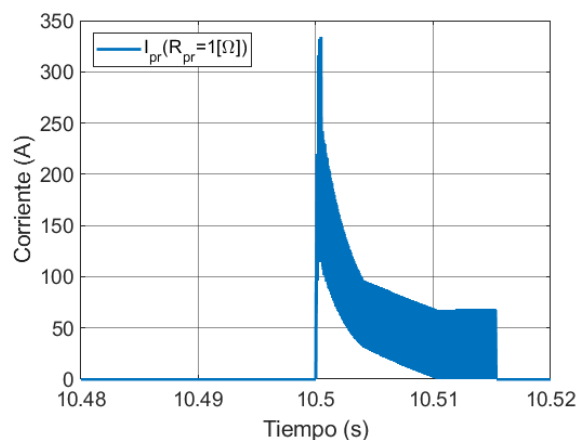


Figura 54. Corriente a través de circuito de precarga, para $R_{pr} = 1[\Omega]$.

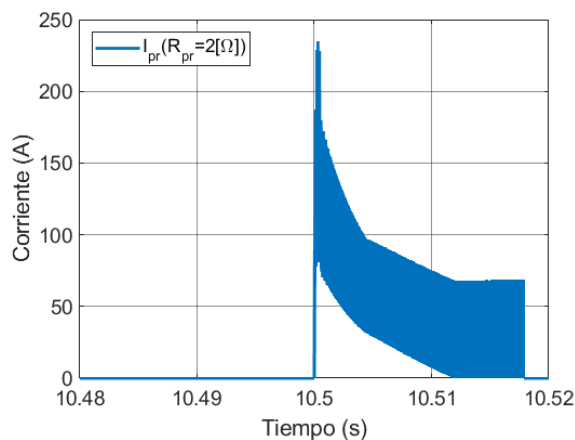


Figura 55. Corriente a través de circuito de precarga, para $R_{pr} = 2[\Omega]$.

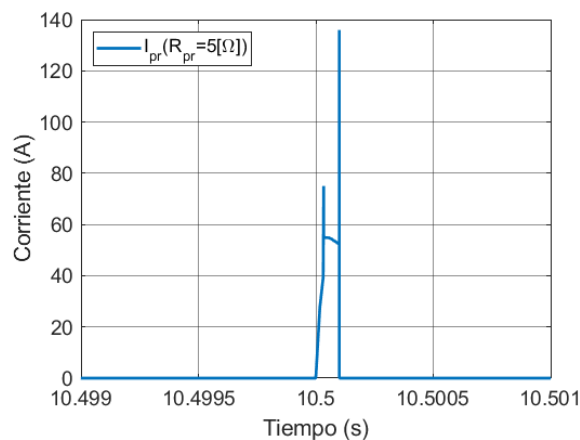


Figura 56. Corriente a través de circuito de precarga, para $R_{pr} = 5[\Omega]$.

Frente a las variaciones de corriente mostradas en las figuras anteriores, se obtienen los siguientes consumos de las resistencias:

- Resistencia 0.5 Ohm:
 - Potencia promedio= 2.4 kW
 - Potencia peak= 93 kW
 - Tiempo de funcionamiento= 18.89 ms

KRCC

21EN025

- Resistencia 1 Ohm:
 - Potencia promedio = 3.8 kW
 - Potencia peak = 110 kW
 - Tiempo de funcionamiento= 20.08 ms
- Resistencia 2 Ohm:
 - Potencia promedio = 5.4 kW
 - Potencia peak = 110 kW
 - Tiempo de funcionamiento= 12.5 ms
- Resistencia 5 Ohm:
 - Potencia promedio = 9.6 kW
 - Potencia peak = 92.4 kW
 - Tiempo de funcionamiento= 0.21 ms

Con estas consideraciones, se elige la resistencia de 2 ohms, la cual puede ser elaborada con ayuda de las resistencias de parrilla ($3 \times 0.565 + 1 \times 0.304$).

6 Conclusiones

Este informe tuvo por objetivo analizar la implementación de la configuración 1.2. Para ello, se analizaron las especificaciones técnicas de cada etapa interna del sistema AC, para conseguir información respecto a las especificaciones técnicas de las componentes básicas esenciales que permitirán llevar a cabo la implementación del sistema AC. A partir de esta información y de los resultados de simulación, se dieron a conocer los circuitos adicionales que permitan corregir aspectos como en los transitorios, resguardando de esta forma la operación de las componentes internas del sistema AC, estableciendo una operación segura. Para ello, se consideró una plataforma de control local, la cual permitirá reconocer diferentes fallas internas del sistema AC, reportando eventos a través de comunicación serial.

Con esto se plasman las características esenciales del sistema de control para poder realizar su implementación.

7 Referencias

- [1] AC3E, «Informe de Evaluación de Factibilidad de Soluciones Propuestas,» 2022.
- [2] AC3E, «Informe Resultados de Pruebas en Simulador Camión Minero,» 2022.
- [3] KCH, «Eventos Shop Manual 930E-4».