

Proyecto Fin de Máster

Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Sistema electrónico de control de accionamientos
multifásicos basado en el microcontrolador
TMS320F28379D

Autora: Marta García Vivancos

Tutores: Federico José Barrero García

Cristina Martín Torres

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Electrónica

**Sistema electrónico de control de accionamientos
multifásicos basado en el microcontrolador
TMS320F28379D**

Autora:

Marta García Vivancos

Tutores:

Federico José Barrero García

Profesor titular

Cristina Martín Torres

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Máster: Sistema electrónico de control de accionamientos multifásicos basado en el
microcontrolador TMS320F28379D

Autora: Marta García Vivancos

Tutores: Federico José Barrero García
Cristina Martín Torres

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Llegado este momento, me gustaría agradecer todo el apoyo recibido durante este año, a mi familia, a los nuevos amigos y a los no tan nuevos.

Agradecer especialmente a mis tutores, Federico y Cristina, por la ayuda incondicional, la paciencia y marcarme el camino en todo momento.

También a Mario, por dedicarle tiempo a mis dudas aun en la distancia.

Y por supuesto a Juan José Arcos Rodríguez, con el que he compartido laboratorio estos últimos meses y ha colaborado en la realización de las placas de adaptación.

Resumen

Los accionamientos multifásicos han experimentado un auge en las últimas décadas, pues han sido propuestos en aplicaciones donde se requiere una elevada confiabilidad global del sistema, combinado con una reducción de potencia distribuida por fase. A su vez, los microprocesadores están en constante crecimiento apareciendo por consiguiente DSPs más potentes, siendo común su uso para controlar los convertidores de potencia que alimentan dichos accionamientos. Es por ello por lo que, grupos tanto del departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla como del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Málaga pertenecientes al equipo de investigación ACE-TI han centrado los últimos años sus investigaciones en este sector, concretamente en máquinas de inducción multifásica de 5 y 6 fases.

Con este Trabajo Fin de Máster se pretende extender estas investigaciones a máquinas de inducción de hasta un máximo de 12 fases, para ello se propone un sistema electrónico basado en el DSP TMS320F28379 que permita controlar el variador multifásico. También se busca mejorar el sistema experimental, en este caso, incorporando un sistema de medición de par que permitirá mejorar el control de la máquina, dispositivo que no se había utilizado hasta el momento en estos grupos de investigación mencionados.

Palabras Claves. - DSP, accionamientos multifásicos, sistema de control.

Abstract

Multiphase drives have experienced a boom in recent decades, as they have been proposed in applications where a high global reliability of the system is required, combined with a power reduction distributed by phase. At the same time, the microprocessors are constantly growing, resulting in more powerful DSPs commonly used to control the power converters that supply the aforementioned drives. For this reason, groups from the Department of Electronic Engineering of the University of Seville and the Department of Electrical Engineering of the University of Malaga, which belongs to the ACE-TI research group, have focused their research in this topic in recent years, specifically in 5-phase and 6-phase multiphase induction machines.

With this Master Thesis, we intend to expand this research to induction machines with a maximum of 12 phases, for which an electronic system based on the DSP TMS320F28379 is proposed to control the multiphase variator. It also seeks to improve the experimental system, in this case, incorporating a torque measurement system that will improve the control of the machine, a device that had not been used so far in the aforementioned research groups.

Keywords. - DSP, multiphase drives, control system.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Introducción	21
1.1 Antecedentes	22
1.1.1 Accionamientos multifásicos.....	23
1.1.2 Dispositivos de control	25
1.2 Motivación	26
1.3 Objetivos	27
1.4 Organización del documento	28
2 Versión inicial del sistema experimental	29
2.1 Sistema experimental de la Universidad de Sevilla	29
2.1.1 Motor multifásico	30
2.1.2 Convertidor de tensión	31
2.1.3 Fuente de alimentación.....	32
2.1.4 Encoder.....	33
2.1.5 Sistema de control. Esquema de placa única	34
2.1.6 Armario eléctrico.....	36
2.2 Sistema experimental de la Universidad de Málaga	38
2.2.1 Sistema de control. Esquema modular.....	39
2.2.2 Armario eléctrico.....	41
3 DSP	45
3.1 Selección del Nuevo DSP	45
3.1.1 Pruebas realizadas.....	51
3.2 Diferencias con el DSP inicial	52
4 Sistema experimental	55
4.1 Sistema de control	57
4.1.1 Placa base	60
4.1.2 Placa de adaptación de la sonda Hall.....	62
4.1.2.1 Diseño de la Placa de Circuito Impreso	63
4.1.2.2 Componentes de la placa	64
4.1.2.3 Montaje de la placa	65
4.1.2.4 Ensayo de la placa.....	67

4.1.2	Placa de adaptación de tensión	72
4.1.2.1	Diseño de la Placa de Circuito Impreso.....	72
4.1.2.2	Componentes de la placa.....	73
4.1.2.3	Montaje de la placa.....	75
4.1.3	Placa de gestión de los contactores.....	76
4.1.4	Placa de adaptación del Convertidor	77
4.1.4.1	Diseño de la Placa de Circuito Impreso.....	78
4.1.4.2	Componentes de la placa.....	78
4.1.4.3	Montaje de la placa.....	79
4.1.4.4	Ensayo de la placa	81
4.1.5	Placa de adaptación del Encoder.....	85
4.1.5.1	Diseño de la Placa de Circuito Impreso.....	86
4.1.5.2	Componentes de la placa.....	86
4.1.5.3	Montaje de la placa.....	87
4.1.6	Placa de adaptación DIMM180-DIMM100	88
4.1.7	Conjunto Final de Placas	90
4.2	Armario eléctrico	93
4.3	Medición de par	96
4.3.1	Selección sensor de par	98
5	Conclusiones	103
5.1	Trabajos futuros	104
	Referencias	105
	Anexos.....	107
	Anexo A. Tablas de correspondencia	107
	Anexo A.1. Conector Eurocard	107
	Anexo A.2. Tarjeta de control TMS320F28335 DIMM100	108
	Anexo B. Fichas técnicas	111
	Anexo B.1. Convertidor de tensión SKS 22F	111
	Anexo B.2. Driver del convertidor de tensión	112
	Anexo B.3. Sonda Hall del convertidor de tensión	113
	Anexo B.4. Encoder	114
	Anexo B.5. Convertidor de tensión SKS 46F	116
	Anexo B.6. Sensor de par	117
	Anexo C. Placas de circuito impreso	119
	Anexo C.1. Placa de adaptación de la sonda Hall	119
	Anexo C.2. Placa de adaptación de voltaje	121
	Anexo C.3. Placa de adaptación del convertidor	123
	Anexo C.4. Placa de adaptación del encoder	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Opciones de DSPs valoradas	47
Tabla 2. Diferencias entre DSP TMS320F28335 y DSP TMS320F28379D	52
Tabla 3. Componentes placa adaptación Sonda Hall	65
Tabla 4. Variables placa sonda Hall - placa base.	68
Tabla 5. Variables placa sonda Hall - sonda Hall.	68
Tabla 6. Ensayo de la placa de adaptación de la Sonda Hall versión 1	71
Tabla 7. Ensayo de la placa de adaptación de la Sonda Hall versión 2	72
Tabla 8. Componentes placa de adaptación tensión	74
Tabla 9. Componentes de la placa de adaptación del convertidor	79
Tabla 10. Variables placa convertidor - placa base.	82
Tabla 11. Variables placa convertidor – convertidor.	83
Tabla 12. Ensayo de la placa de adaptación del convertidor	85
Tabla 13. Componentes de la placa de adaptación del encoder	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema experimental utilizado en la US	30
Figura 2. Motor multifásico de 5 fases	31
Figura 3. Convertidor de tensión SKS-22F B6u+E1CIF+B6CI 13 V12	31
Figura 4. Fuente de alimentación del bus de continua de los convertidores	33
Figura 5. Encoder incremental 10-11657-2500	34
Figura 6. Placa de adaptación de señales Universidad de Sevilla	35
Figura 7. Esquema del armario eléctrico	36
Figura 8. Puerta Armario eléctrico Universidad de Sevilla	37
Figura 9. Interior armario eléctrico US	37
Figura 10. Esquema del sistema experimental Universidad de Málaga	39
Figura 11. Sistema de control modular plano horizontal.	40
Figura 12. Sistema de control modular plano vertical.	41
Figura 13. Distribución de los elementos en el armario de Málaga nivel base.	42
Figura 14. Distribución de los elementos en el armario de Málaga nivel supletorio.	42
Figura 15. Armario de Málaga nivel supletorio.	43
Figura 16. Armario de Málaga nivel base.	43
Figura 17. Armario de Málaga techo y puerta.	44
Figura 18. Rendimiento VS características DSP C2000	47
Figura 19. F2837x ControlCard R1.3 con DSP TMS320F28379D	48
Figura 20. Funcionamiento en conjunto de la CLA y C28x	49
Figura 21. ControlCard Docking Station R4.1	51
Figura 22. Conjunto de ControlCard Docking Station R4.1 con F2837x ControlCard R1.3	51
Figura 23. Esquema del sistema experimental	55
Figura 24. Máquina multifásica de 7 fases	56
Figura 25. Convertidor de potencia SKS 46F B6U+E1CIF+B6CI 17V0	56
Figura 26. Diagrama del sistema de control modular plano horizontal	58
Figura 27. Diagrama del sistema de control modular plano vertical	59
Figura 28. Vista frontal de la <i>Motherboard</i>	60
Figura 29. Vista inferior de la <i>Motherboard</i>	61
Figura 30. Placa de adaptación de la Sonda Hall. Vista superior	66
Figura 31. Placa de adaptación de la Sonda Hall. Vista inferior	66
Figura 32. Pines del puerto de conexión: placa sonda hall - placa base	67
Figura 33. Pines del puerto de conexión: placa sonda hall - sonda hall	67

Figura 34. Esquemático de la adaptación de la señal de la sonda hall	70
Figura 35. Vista superior placa adaptación tensión	75
Figura 36. Vista inferior placa adaptación tensión	75
Figura 37. Vista superior.	76
Figura 38. Vista inferior placa adaptación relés	77
Figura 39. Vista superior placa adaptación del convertidor	80
Figura 40. Vista inferior placa adaptación del convertidor	80
Figura 41. Pines del puerto de conexión: placa convertidor - placa base	81
Figura 42. Pines del puerto de conexión: placa convertidor – convertidor	82
Figura 43. Montaje para ensayo en el laboratorio.	83
Figura 44. Vista superior placa de adaptación del Encoder	87
Figura 45. Vista inferior placa de adaptación del Encoder	88
Figura 46. Componente DIMM180	89
Figura 47. Componente DIMM100	90
Figura 48. Vista superior conjunto de placas	92
Figura 49. Vista inferior conjunto de placas	93
Figura 50. Esquema armario eléctrico. Nivel superior izquierda. Nivel inferior derecha	94
Figura 51. Final de carrera	94
Figura 52. Armario eléctrico	95
Figura 53. Ejemplo de sensor de par estático	96
Figura 54. Ejemplo de sensor de par estático con escobillas	97
Figura 55. Ejemplo de sensor de par dinámico sin escobillas	97
Figura 56. Ejemplo de sensor de par con telemetría	98
Figura 57. Sensor de par T22/20 Nm	99
Figura 58. Sensor de par T21WN/20Nm	100

Notación

DSP	Digital Signal Processor
CSI	Inversor de fuente
VSI	Convertidor de potencia de fuente de tensión
V	Voltaje
I	Intensidad
PCB	Printed Circuit Board
GND	Ground
EMI	Interfaz electromagnética
PFC	Proyecto Final de Carrera
mA	Miliamperios
mm	Milímetros
CI	Circuito integrado
Hz	Hercios
Ω	Ohmios
TFM	Trabajo Fin de Máster
AGND	Tierra analógica
DGND	Tierra digital
PGND	Tierra de potencia
DMA	Acceso directo a memoria
VSC	Convertidor de fuente de voltaje
AC	Corriente alterna
rpm	Revoluciones por minuto
CPU	Central Processing Unit
CLA	Control Law Accelerator
Nm	Newton por metro
FPGA	Field Programmable Gate Array
DC	Corriente Directa

1 INTRODUCCIÓN

Antes de introducirnos en el tema, se ve necesaria la revisión de dos términos que se tratarán ampliamente durante todo el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster, accionamiento multifásico y procesador digital de señales.

- Accionamiento multifásico

El término de accionamiento multifásico, también conocido como máquina multifásica, hace referencia a los sistemas de conversión de energía que utilizan máquinas eléctricas con bobinados en el estátor de más de tres fases. Esta tecnología ha ido creciendo gracias al uso de los convertidores de potencia en accionamientos de velocidad variable de corriente alterna. La etapa de entrada del accionamiento tiene el mismo número de fases que la fuente principal, pero su etapa de salida puede tener cualquier número de fases, es decir, el convertidor desacopla la máquina de la fuente trifásica y permite el uso de máquinas con cualquier número de fases [10], [8].

Es este dispositivo, el convertidor de potencia, uno de los elementos principales para el control de los accionamientos multifásicos, y su control se puede llevar a cabo de distintas maneras. Las más tradicionales son el control por histéresis y el control lineal pero, con el desarrollo de microprocesadores más potentes, se han propuesto nuevos esquemas de control menos convencionales y más complejos, como son el control basado en lógica difusa, control basado en redes neuronales y el control predictivo. En cuanto a las topologías de los convertidores de potencia encontramos el convertidor multinivel [12], aunque la más utilizada tanto en sistemas trifásicos como multifásicos y la usada en los convertidores de potencia que se controlan en este proyecto es la topología de dos niveles y dos etapas AC/DC – DC/AC. Estas etapas generalmente son constituidas por un rectificador no controlado y un inversor, acoplados eléctricamente por un DC-link. Al conjunto de convertidor de potencia y accionamiento multifásico lo denominaremos variador multifásico.

- Procesador digital de señales

Un procesador digital de señales, a partir de ahora DSP por sus siglas en inglés Digital Signal Processor, es un sistema basado en un microprocesador que posee un conjunto de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieren operaciones numéricas a muy alta velocidad.

Esta plataforma de control ha sido ampliamente utilizada en la electrónica de potencia [4] y el factor más decisivo por el cual actualmente se sigue utilizando para controlar los convertidores de potencia de los variadores multifásicos no es otro que el aumento significativo en las últimas décadas de la potencia de cálculo de estos dispositivos.

1.1 Antecedentes

El primer documento relacionado con máquinas de inducción de más de tres fases fue publicado a finales de 1960 donde se propuso un modelo de motor de inducción con fuente de alimentación invertida para 5 fases [10]. Aunque al principio despertó algo de interés, su investigación fue limitada a favor de las máquinas trifásicas debido al acuerdo a nivel mundial, en el cual se favorece el desarrollo de redes eléctricas trifásicas. Los motivos principales de este acuerdo fueron los siguientes [9]:

- Las máquinas que tienen más de tres fases funcionaban o presentaban las mismas características que las trifásicas.
- La producción de motores trifásicos en masa tiene el costo por unidad más bajo, lo cual ha conducido a la estandarización del modelo de máquina trifásica, para que cualquier fabricante pueda producirlas.
- La potencia monofásica es oscilante, a partir de 3 fases se hace más estable.

En 1990 se empezó a retomar los estudios de estas máquinas, pero no fue hasta principios del siglo XXI, donde la aparición de modernos procesadores digitales de señales que permitían la implementación de complejas estrategias de control requeridas por los variadores multifásicos, permitió que esta tecnología alcanzara un mayor estatus para convertirse en un referente principalmente en temas relacionados con la variación de velocidad, vehículos y aeronaves eléctricas [2]. Este mayor énfasis por los variadores multifásicos ha condicionado el auge de su actual investigación ya que, aunque se llevó a cabo ese acuerdo mundial, los variadores multifásicos presentan ventajas frente a las máquinas trifásicas que no pueden ser ignoradas. Estas ventajas son las siguientes:

- La excitación del estator en una máquina de múltiples fases produce un campo con un contenido espacio – armónico inferior, lo que conlleva una eficiencia mayor que una máquina trifásica.
- Las máquinas multifásicas tienen una tolerancia a fallos mayor que sus homólogas trifásicas. En el caso en que se produzca una falta en una de las fases de la máquina trifásica, esta dejaría de funcionar. Si la falta se produjera en una de las fases de una máquina de $3 + n$ fases donde n fuera un número comprendido entre 1 y 9, esta podría continuar funcionando igualmente con $2 + n$ fases.
- Las máquinas multifásicas son menos susceptibles que sus homólogas trifásicas a componentes armónicos en la forma de onda de la excitación.

- La tecnología de los microprocesadores avanza constantemente, lo que implica una mayor capacidad de procesamiento y mayor velocidad, por lo que son capaces de controlar cada vez sistemas más complejos en unas dimensiones iguales o menores a las que se conciben actualmente, lo que hace viable confiar en que los convertidores de potencia que alimentan a las máquinas multifásicas podrán seguir siendo controlados por estos dispositivos, aunque aumenten su complejidad.

1.1.1 Accionamientos multifásicos

Actualmente, los accionamientos eléctricos de corriente alterna resultan, en su mayoría, más ventajosos que los accionamientos de corriente continua, sobre todo si valoramos parámetros como la relación potencia/peso, aceleración, mantenimiento, ambiente de operación, velocidad de trabajo, etc. Su menor coste y mayor robustez son frecuentemente las razones para escoger los accionamientos basados en máquinas de inducción.

Las numerosas ventajas, además de las ya mencionadas, que ofrecen las máquinas multifásicas han sido la causa para que se hayan propuesto últimamente en diversas aplicaciones. A continuación, se explicarán detalladamente las ventajas que ofrecen estas máquinas en comparación a los accionamientos convencionales:

- Disminución de la corriente que circula por cada fase: Por medio del incremento del número de fases, se consigue una mejor distribución de potencia. Es posible reducir la corriente por fase sin necesidad de aumentar la tensión de la fuente para una determinada función, mejorando el tiempo de vida de los convertidores que lo alimentan.
- Alta fiabilidad: Las máquinas multifásicas tienen una mayor tolerancia a fallos que las de 3 fases. Si se pierde una de las fases en una máquina de 3 fases, la máquina se convierte en una máquina monofásica. Podría continuar operando, pero necesitaría de algún medio externo para poder arrancar. En estas condiciones operaría a una potencia muy por debajo de la nominal. Si se pierde una fase en una máquina multifásica, ésta podría arrancar por sí misma y seguir operando, también a una potencia menor que la nominal pero considerablemente mayor que una de 3 fases.
- Disminución de los armónicos: Las máquinas multifásicas son menos susceptibles a las componentes armónicas en la forma de onda de la excitación. Independientemente del número de fases de la máquina, estas componentes se producen a un múltiplo par de la frecuencia fundamental de excitación. La menor frecuencia de pulsación del par en una máquina de n-fases es causada por el armónico de orden $2n \pm 1$ inyectado por la fuente de alimentación. Las máquinas multifásicas con devanados concentrados pueden producir par con inyección de armónicos, lo que permite un mayor aprovechamiento del campo en el entrehierro.

- La reducción del 6º armónico asociado al par pulsante: El 6º armónico puede ser eliminado mediante la solución multifásica por medio de una cancelación, el producto de una distribución apropiada de las bobinas de la máquina.
- Reducción del tamaño de componentes: Se puede conseguir inversores de fuente de corriente (CSI, por sus siglas en inglés) económicos, reduciendo el tamaño de los componentes reactivos y los picos de las tensiones de conmutación.
- Reducción de pérdidas en el rotor: En comparación con la solución trifásica, las pérdidas por armónicos en el rotor de la máquina son más reducidas para el caso multifásico.
- Control multi-máquina: En las soluciones multifásicas se pueden aprovechar los grados de libertad para realizar un control simultáneo de múltiples máquinas, utilizando un solo convertidor de potencia.
- Reducción de los pulsos del par electromagnético: Especialmente en máquinas alimentadas por convertidores de potencia de tipo CSI o convertidores de potencia de fuente de tensión (VSI, por sus siglas en inglés) operando en modo de generación de ondas de tensión cuadrada.
- Reducción de las pérdidas en el estator: Existe una significativa reducción de las pérdidas por efecto Joule en el cobre del estator según aumenta el número de fases de la máquina, en comparación con la solución trifásica.

Aunque usar accionamientos multifásicos implica aumentar el número de interruptores de potencia, no supone necesariamente un aumento proporcional en el costo del sistema respecto a un accionamiento convencional. Esto es debido a que el coste de un interruptor de potencia es más del doble en comparación con el de máquinas multifásicas. Sin embargo, el empleo de mayor número de sensores, circuitos de disparo, fuentes de alimentación y, en general, otros dispositivos electrónicos auxiliares sí que penaliza la complejidad del sistema completo de estos accionamientos multifásicos, así como su coste total.

Con lo expuesto anteriormente se resaltan las limitaciones de las máquinas trifásicas para aplicaciones en la que se requiere una elevada corriente eléctrica del accionamiento electromecánico, como se da en las propulsiones navales, aéreas o terrestres, así como en las energías renovables.

Destacan el uso de las máquinas multifásicas para sistemas de conversión de energía, siendo de gran utilidad en generación eólica off-shore, ya que, por ejemplo, en caso de fallo un aerogenerador en medio del mar podría seguir suministrando energía mientras se acude a reparar la falta, un generador trifásico se pararía, perdiendo una gran cantidad de energía.

1.1.2 Dispositivos de control

Gracias al desarrollo de las nuevas tecnologías disponemos de microprocesadores DSPs y FPGAs (Field Programmable Gate Array) cada vez más rápidos y relativamente más baratos. Por otra parte, los componentes electrónicos de potencia también han tenido un avance vertiginoso en los últimos tiempos en lo referente a capacidad de corriente que pueden soportar y ancho de banda. Aunque ambos microprocesadores mencionados podrían ser el elemento principal de control de los variadores eléctricos, las FPGAs son dispositivos de lógica programable que permiten describir un circuito digital usando un lenguaje específico (comúnmente se usa VHDL y Verilog) y que, tras cargarlo en el integrado, es creado físicamente en el chip. Esta conexión mediante programación es posible ya que internamente se componen principalmente de cables, puertas lógicas, biestables, y puertos de entrada y salida, todo ello sin conectar. En resumen, la programación que se realiza a una FPGA es de descripción del lenguaje, es decir, de hardware. Sin embargo, un DSP es un tipo de microprocesador especializado para tareas de procesamiento de señal. A grandes rasgos, los DSPs tienen buses de datos independientes ligados a un multiplicador y un acumulador y modos de direccionamiento específicamente diseñados para procesamiento digital, por lo que su arquitectura interna permite hacer ciertas tareas a altas velocidades. Es habitual programar estos microprocesadores en lenguaje de alto nivel (como por ejemplo C) y dejar que el compilador tome las decisiones de cómo llevarlo adelante en el procesador, aunque, si se quisiera, se podría programar en su propio lenguaje máquina para asegurar unas mejores prestaciones. Concretamente, los DSPs son especialmente útiles para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real. A su vez, permite trabajar con varios datos en paralelo, por consiguiente, el control de los convertidores de potencia que alimentan a la máquina multifásica en este proyecto se realizará mediante un DSP.

El DSP puede trabajar con señales analógicas, no obstante, es un sistema digital, por lo tanto, su funcionamiento se basa en un conversor analógico/digital a la entrada y digital/analógico a la salida. Como todo sistema basado en procesador programable necesita una memoria donde almacenar los datos con los que trabajará y el programa que ejecuta. Respecto a la arquitectura, está diseñado teniendo en cuenta las tareas más habituales del procesamiento digital: sumas, multiplicaciones y retrasos. Utiliza bloques de memoria físicamente separados para datos y programas, correspondiendo de esta manera a la Arquitectura Harvard. Cada uno de estos bloques de memoria se direcciona mediante buses separados, tanto de direcciones como de datos. Entre los elementos básicos que componen un DSP encontramos:

- Conversores en las entradas y salidas.
- Memoria de datos, memoria de programa y el acceso directo a memoria (DMA).
- MACs: multiplicadores y acumuladores.
- ALU: Unidad aritmética.
- Registros.

- PLL: Bucles enganchados en fase.
- PWM: Módulos de control de ancho de pulso.

Aunque el control se realice con este microprocesador, no será el único dispositivo necesario para el control de los convertidores de potencia, ya que las señales que entran y salen del DSP se encuentran en un rango de 0/3.3 V que lo hace incompatible con las señales de entrada procedente de los sensores de medida y las salidas de las señales que se desean mandar para el control (estas entradas y salidas serán explicadas en futuros capítulos con detenimiento) ya que no se encuentran en el mismo rango de tensión. Por estos motivos se necesitarán, además, unas placas de adaptación que hagan posible la comunicación entre el microprocesador y el variador eléctrico. Por lo tanto, el dispositivo de control está formado por el microcontrolador en conjunto con las placas de adaptación. A este conjunto se le hará referencia a partir de ahora como sistema electrónico de control o sistema de control.

1.2 Motivación

La actividad investigadora ha sufrido un auge en los últimos años en el área de los accionamientos multifásicos, y, se ha enfocado, principalmente, en las máquinas de inducción de cinco y seis fases. Este crecimiento se ha visto fundamentado por las ventajas ya vistas que las máquinas multifásicas ofrecen respecto a las máquinas trifásicas convencionales. Concretamente, dentro del grupo de investigación ACE-TI, del departamento de Ingeniería Electrónica de la US (Universidad de Sevilla) y del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Málaga, se está llevando a cabo una extensa investigación sobre este tipo de sistemas, convirtiéndose en un referente mundial en este campo debido a sus continuas publicaciones en prestigiosas revistas de investigación.

Mientras que el sistema experimental de la US, el cual se verá en detalle en el próximo capítulo, para realizar dichas investigaciones lo componen, principalmente, una máquina de inducción de 5 fases alimentada por dos convertidores de potencia trifásicos de dos niveles controlados por un sistema electrónico de placa única basado en el microcontrolador DSP TMS320F28335; el de la Universidad de Málaga, que también se detallará en el *Capítulo 2*, se constituye por una máquina de inducción de 6 fases alimentada también por dos convertidores del mismo tipo que en la US, pero controlados en este caso por un sistema electrónico de placa modular, que consigue subdividir las placas de adaptación de las señales como se explicará próximamente. Esta placa modular también está controlada por el microcontrolador TMS320F28335.

La principal motivación que ha impulsado este Trabajo Fin de Máster es el desarrollo del sistema electrónico de control necesario que permita controlar máquinas de inducción de un número de fases comprendido entre 7 y 12 con el fin de continuar con las investigaciones en este sector.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto persigue el desarrollo de un nuevo sistema electrónico que permita controlar hasta 4 convertidores de potencia trifásicos de dos niveles que serán capaces de alimentar una máquina multifásica de 7 o más fases. Se distinguen las siguientes fases a cumplimentar para la satisfacción de la totalidad del proyecto:

- Estudio del sistema de control utilizado actualmente. Como ya se ha comentado, el DSP que se está utilizando es el modelo TMS320F28335 perteneciente a la familia C2000 de Texas Instruments, que, debido a sus características, no sería suficiente para ampliar el sistema a un número de fases mayor a 6. Es por ello por lo que se llevará a cabo un profundo estudio de este DSP, con la finalidad de reemplazarlo por uno que permita realizar el menor número de cambios posibles a los programas de los que se disponen actualmente. También se pondrán en conocimiento las características del convertidor para llevar a cabo la futura adaptación de señales.
- Selección y estudio del nuevo microcontrolador. En esta fase se buscará un nuevo DSP con mayor capacidad de procesamiento que el actual, que sea capaz de cubrir las necesidades del proyecto que se abarca. Se estudiarán sus características y se harán pruebas de software con el mismo.
- Diseño y fabricación de las placas de adaptación que constituyen el sistema electrónico. La placa disponible para la adquisición de datos del sistema electrónico de control actual no es modular. En próximos capítulos se entrará en detalle de por qué se busca que la nueva placa si sea modular. En esta etapa serán reutilizadas, siempre que sea posible, las placas de adaptación modulares de las que disponen en la Universidad de Málaga, y se diseñarán los circuitos electrónicos, así como los circuitos impresos necesarios para las placas de adaptación que falten, esto se realizará mediante el software *Altium Designer*. Una vez fabricadas las nuevas placas de adaptación serán ensayadas en el laboratorio de manera aislada para comprobar su correcto funcionamiento.
- Llevar a cabo una mejora en el sistema mediante la incorporación de un medidor de par, que permitirá medir la fuerza de torsión a la que se somete el eje de la máquina de inducción, por lo que el DSP recibirá esta señal y podrá realizar un mejor control sobre el sistema.

Además, mediante el seguimiento de los objetivos enumerados anteriormente, aparecen una serie de objetivos transversales, entre los que destacan:

- Aprender a manejar un software tan potente y completo a la hora de realizar placas de circuito impreso como lo es *Altium Designer* y que, además, es utilizado en empresas que se dedican a fabricar PCBs.
- Soltura con los dispositivos del laboratorio como lo son osciloscopios, generadores de señales, soldador, taladro, fuentes de alimentación, etc.

- Búsqueda de datasheets y lectura de los mismos.
- Compra de componentes, por lo que se incluye la búsqueda de los componentes y tratar con distintos proveedores reales.

1.4 Organización del documento

El documento responde a una estructura organizada por capítulos, exactamente en 5 capítulos. En el primero de ellos, se introducen dos términos que se usan ampliamente durante todo el documento para, posteriormente, describir los antecedentes de los accionamientos multifásicos enfocándonos sobre todo en el control de este mediante el sistema electrónico. Se describe aquí la motivación y los objetivos que persigue este TFM.

En el Capítulo 2 se hace una revisión de los dos sistemas experimentales que hay en funcionamiento actualmente, uno el de la US que controla una máquina de inducción multifásica de 5 fases y otro, el de la Universidad de Málaga, que hace lo mismo con una de 6. Estos sistemas experimentales serán la base del nuevo sistema experimental y, sobre todo, se utilizará como referencia el sistema electrónico de control de la Universidad de Málaga ya que es modular y nos permitirá aumentar el número de fases a controlar de manera gradual.

Por otro lado, en el siguiente capítulo, Capítulo 3, se estudiarán las características del microcontrolador utilizado para conocer de esta manera sus limitaciones y buscar así el nuevo DSP que sufrague las carencias del anterior. Se llevará a cabo un estudio de mercado de los microcontroladores actuales y, una vez seleccionado el DSP, se procederá a realizar un estudio de este.

A continuación, en el Capítulo 4, se explicará cómo queda el sistema experimental final, entrando en detalle en cada una de las placas que componen el sistema electrónico, incluyendo su fabricación y pruebas realizadas. Se entrará también en detalle en el armario eléctrico que alberga los convertidores de potencia y el resto de la aparamenta y, además, se explicará el sensor de par elegido y el por qué, así como la función que desempeñará.

Finalmente, en el Capítulo 5, se encuentran las conclusiones de este Trabajo Fin de Máster donde se discutirán los resultados obtenidos y la perspectiva de futuro que tiene este proyecto, desglosada en una serie de trabajos futuros.

2 VERSIÓN INICIAL DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Para poder llevar a cabo el control del variador multifásico, es necesario realizar la adaptación de las señales que llegan de los sensores del sistema hacia el microprocesador (DSP en este caso) y de las señales de actuación que saldrán del mismo para actuar sobre el sistema, cerrando así el bucle de control. Esto se hará mediante la creación de unas placas de adaptación de señal en las cuales, además, irá insertado el microcontrolador en cuestión, formando el sistema electrónico de control.

En el primer apartado de este capítulo se procederá a detallar el sistema experimental que se encuentra actualmente implantado en la Universidad de Sevilla, mientras que, en el segundo, se hará lo mismo con el que se encuentra en la Universidad de Málaga, en el cual el sistema electrónico de control cobrará especial relevancia ya que será el referente del sistema de control de este proyecto. Cabe remarcar que el uso como referencia del segundo se debe a la disposición del sistema de control, que es la principal diferencia entre ambos: mientras que en el primero se usa una única placa para realizar el control, el de la Universidad de Málaga realiza el mismo control con un conjunto de placas, lo que se denomina un sistema modular. Más tarde se explicará porqué se ha decidido eliminar la disposición de esquema único para dar lugar a la disposición modular.

2.1 Sistema experimental de la Universidad de Sevilla

En la *Figura 1* se encuentra un esquema del sistema experimental que se encuentra en uno de los laboratorios de Electrónica de la Universidad de Sevilla. Principalmente está compuesto por:

- Motor multifásico: Constituye la unidad de potencia del sistema. Los motores multifásicos presentan un mayor grado de tolerancia a fallo si son comparados con los motores trifásicos tradicionales.
- Convertidor de potencia: Formado por dos convertidores de tensión trifásicos de dos niveles, conectados todos ellos en paralelo al bus de continua, obteniendo así un convertidor de 6 fases.
- Fuente de alimentación: Evita tener que conectar el sistema a la red, fijando la tensión de bus de continua mediante una fuente de tensión DC.
- Encoder: Es fundamental conocer la velocidad de la máquina para realizar un control sobre la misma, lo cual constituye la base del variador multifásico. Este dispositivo es el que se encarga de ello.

- Sistema electrónico de control: Formado por un DSP y una serie de placas de circuito impreso usadas para la adaptación de las señales.
- Armario eléctrico: Alberga gran parte de los componentes enumerados, entre ellos, los convertidores de potencia, el sistema de control y otros aparatos de protección.

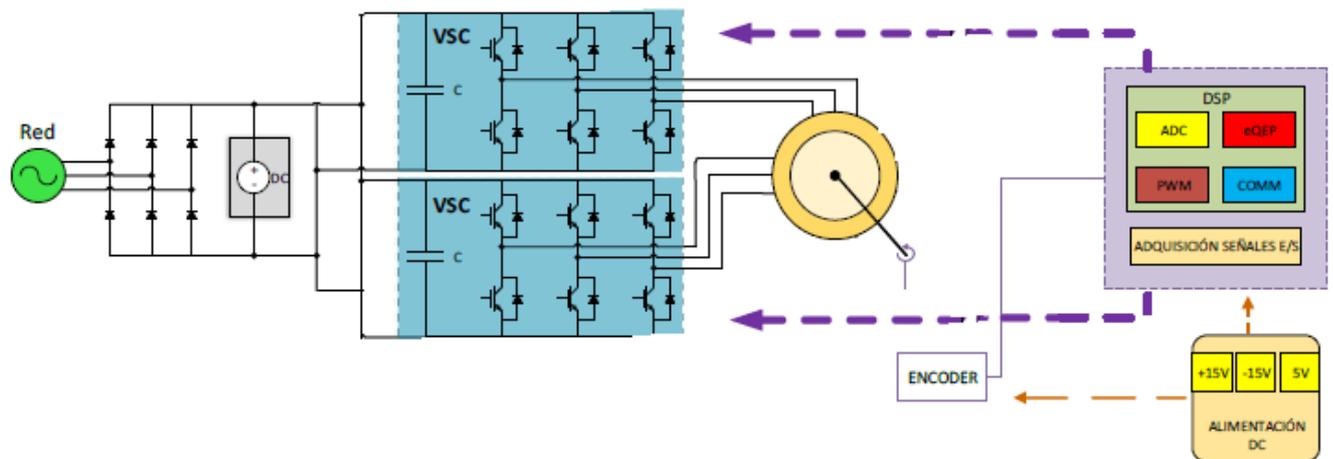


Figura 1. Esquema del sistema experimental utilizado en la US

Fuente: Elaboración propia

Actualmente, con el sistema enumerado, se lleva a cabo el control de una máquina de inducción de 5 fases. A continuación, se entrará en detalle en cada uno de los componentes que conforman el sistema experimental.

2.1.1 Motor multifásico

El motor multifásico del sistema experimental inicialmente era un motor trifásico convencional del fabricante Siemens, pero fue mandado a la empresa Mayre para que fuera rebobinado y convertirlo en el motor multifásico de 5 fases que es actualmente. Su velocidad nominal es de 1000 rpm y trabaja a una potencia nominal de 1,4 kW. Dicho motor se puede apreciar en la *Figura 2*.

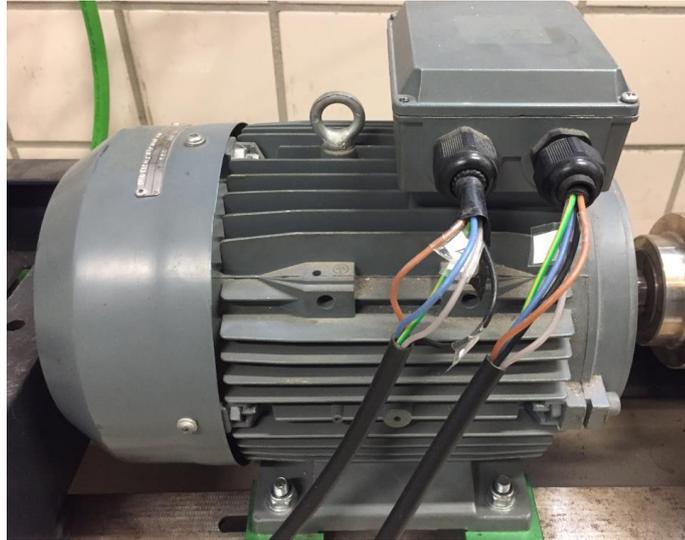


Figura 2. Motor multifásico de 5 fases

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Convertidor de tensión

Este componente es el encargado de transformar la tensión continua del DC-link en tensión alterna para cada una de las 5 fases (y admitiría hasta un máximo de 6). Es decir, es el encargado de alimentar el motor multifásico. Los convertidores trifásicos de fuente de tensión VSC (por sus siglas en inglés *Voltage Source Converter*) de dos niveles que hay instalados en el armario eléctrico son del modelo SKS-22F B6u+E1CIF+B6CI 13 V12, fabricado por Semikron. Dicho convertidor viene representado en la *Figura 3*.



Figura 3. Convertidor de tensión SKS-22F B6u+E1CIF+B6CI 13 V12

Fuente: Elaboración propia

Las características más importantes de este convertidor se listan a continuación, el resto se puede encontrar en su ficha técnica, en el *Anexo B.1*.

- Intensidad eficaz máxima admisible sin sobrecarga de 22 A, para frecuencias de conmutación de 10 kHz.
- Frecuencia máxima de conmutación de los interruptores de 15 kHz.
- Tensión máxima admisible en el bus de continua de 750 V.

Cada uno de los pares de IGBTs del convertidor es disparado a través de un driver que a su vez está gestionado por el sistema de control. El modelo de driver del convertidor es el SKHI 20opA fabricado también por Semikron, cuya ficha técnica se encuentra disponible en el *Anexo B.2*.

El convertidor consta de una gran variedad de pines accesibles agrupados en varios conectores. La relación de pines, con sus valores de tensión, se recoge en la ficha técnica del convertidor en el *Anexo B.1*. Destacan los siguientes aspectos de cada conector:

- Conectores CN1 y CN2: contienen los pines que se encargan de controlar los disparos de los IGBTs de las fases U, V y W, así como del IGBT encargado de la señal break. Se encuentran también en este conector los pines de salida de los errores de cada fase, además de la alimentación y la tierra de potencia.
- Conector CN3: es el conector vinculado a las dos sondas Hall que incluye el convertidor para la medida de corriente. Contiene los pines de alimentación, de tierra analógica y de las medidas en corriente de las sondas Hall.
- Conector CN4: contiene los pines para la conexión a red del convertidor, los pines de salida de las fases U, V y W, así como los pines para alimentar el bus de continua a través de una fuente de tensión. Además, reserva dos pines para la conexión de la resistencia de crowbar.
- Conector K1: contiene los pines para la alimentación de los ventiladores del convertidor, los cuales serán controlados por el armario eléctrico.

Cada uno de los convertidores posee dos sondas Hall para medir la corriente que circula por dos de sus tres fases (el valor de la tercera es trivial). Las sondas Hall mencionadas son del modelo LA 25_NP, del fabricante LEM, y su hoja de características se encuentran en el *Anexo B.3*. La salida de la intensidad nominal de estas sondas será de ± 25 mA.

2.1.3 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación que alimenta el bus de continua de los convertidores es la que aparece representada en la *Figura 4*. El modelo de esta es el KDC 300-50, del fabricante ARGANTIX.



Figura 4. Fuente de alimentación del bus de continua de los convertidores

Fuente: www.programmablepower.com.

Sus características destacables son:

- Potencia máxima suministrada de 15 kW.
- Rango de tensión a la salida: 0-300 V.
- Rango de intensidad a la salida 0-50 A.
- Ruido y rizado de la salida de 100 mV.

2.1.4 Encoder

El encoder se trata de un transductor rotativo, que mediante una señal eléctrica sirve para indicar la posición angular de un eje, velocidad y aceleración del rotor de un motor.

Su funcionamiento se basa en un disco “codificado” conectado a un eje giratorio, con unas partes transparentes y otras opacas que bloquean el paso de la luz emitida por la fuente de luz. A medida que el eje rota, el emisor infrarrojo emite luz que es recibida por el sensor óptico generando los pulsos digitales [16].

El encoder proporciona tres señales para poder obtener información sobre la velocidad de la máquina rotativa. Dos de las señales consisten en dos formas de ondas cuadradas y desfasadas entre sí 90º eléctricos. Con la lectura de una de estas señales se obtiene la velocidad de rotación, mientras que, si se capta también la otra señal, es posible determinar el sentido de rotación. La tercera señal proporciona la posición absoluta de cero del eje del encoder.

El encoder utilizado es el 10-11657-2500, del fabricante Hohner, cuya imagen se puede observar en la *Figura 5* y su hoja de características se encuentra en el *Anexo B.4*.



Figura 5. Encoder incremental 10-11657-2500

Fuente: Elaboración propia

Destacan las siguientes características:

- Tensión de alimentación: 5V.
- Consumo típico de 70 mA, pero puede llegar hasta los 150 mA.
- Longitud de cable admisible: 1200 m.
- Número máximo de revoluciones permisibles mecánicamente: 6000 rpm.
- Nivel de señal “bajo” menor a 0,5 V.
- Nivel de señal “alto” mayor a 2,5 V-
- Frecuencia de 300 kHz.
- Número de impulsos por vuelta de 2500.

2.1.5 Sistema de control. Esquema de placa única

Se encarga de gestionar el funcionamiento del motor multifásico. Consta de una tarjeta de control basada en el DSP TMS320F28335 y una placa encargada del tratamiento de distintas señales necesarias para el control del sistema. Del DSP que se encuentra en funcionamiento se hablará con más detalle en el próximo capítulo.

En el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla se fabricó la placa de adaptación que se muestra en la *Figura 6*. Esta versión consiste en una única placa y consigue adaptar las señales que se citan a continuación:

- 2 medidas de tensión.
- 4 medidas de intensidad mediante las sondas Hall que incorpora el convertidor de tensión SKS-22F B6U E1CIF B&CI 13 V12.
- Disparos de los IGBTs y lectura de errores de 2 convertidores SKS 22F B6U+E1CIF+B6CI 13 V12
- Señales de 3 relés para su conexión a contactores.

- 1 medida de velocidad proporcionada por el encoder.
- Señales de la tarjeta de control (DSP).

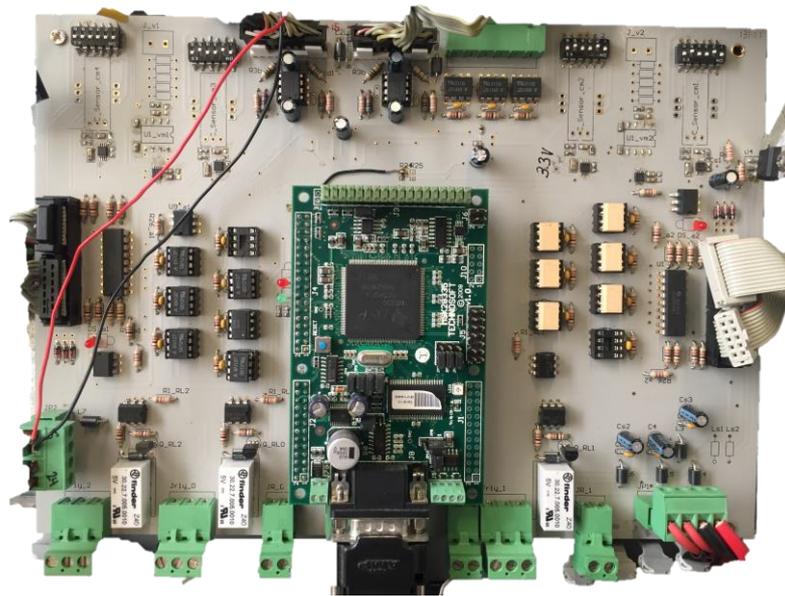


Figura 6. Placa de adaptación de señales Universidad de Sevilla

Fuente: Elaboración propia

Con lo numerado anteriormente este sistema es capaz de controlar una máquina multifásica de hasta 6 fases pero, en la actualidad, es una máquina de 5 fases la que se controla. Mediante las 4 sondas Hall se miden dos de las tres intensidades de cada uno de los dos convertidores, la corriente no medida es obtenida matemáticamente sabiendo que la suma de las corrientes de todas las fases debe ser cero. Cada convertidor puede controlar hasta 3 fases, con lo que con los dos convertidores montados en el armario es suficiente para esta máquina de inducción.

Las desventajas que presenta el esquema de placa única son las que se citan a continuación:

- Complicada depuración de errores, ya que, si fallara algún componente o conjunto de ellos, la placa debería sacarse por completo del armario eléctrico y rehacerse en caso de que el componente haya afectado a las pistas de las placas.
- El sistema está diseñado para adaptar la señal de dos convertidores de potencia como máximo, si se quisiera controlar una máquina de más fases en un futuro, como es el caso de este proyecto, no se podría reutilizar nada de esta placa, por lo que no es viable adaptar el sistema de control a diferentes variadores eléctricos añadiendo o quitando periféricos.

Son por estos motivos principalmente por los que se ha decidido que el nuevo sistema de control tendrá arquitectura modular, como ya está implementado en la Universidad de Málaga y se explicará en futuros apartados.

2.1.6 Armario eléctrico

En el armario eléctrico que hay operativo en la actualidad se albergan los convertidores, así como la placa de adaptación comentada con anterioridad. Además de estos elementos de control en su interior también se encuentran los elementos de protección eléctrica, contactores y elementos auxiliares de conexión, que, en su conjunto, permite la correcta operación del sistema. A continuación, se detallarán los componentes principales de los que consta el armario eléctrico:

- Entradas: DC, red, ventilador, encoder, DSP, diodos.
- Salidas: motor, diodos.

Entre los elementos de protección se encuentran:

- Dispositivo que desconecta la alimentación en caso de que se abra la puerta.
- Botón de marcha/paro.
- Parada de emergencia.
- Interruptor trifásico del ventilador.
- Indicador luminoso. Ubicado en el techo del armario, se enciende al estar este en marcha.

El número de convertidores que tiene instalados es de dos, lo que permite controlar una máquina multifásica de hasta 6 fases. Además, incluye las fuentes de alimentación de los circuitos de las placas de adaptación, así como los elementos de protección eléctrica y conexión.

En el esquema de la *Figura 7* aparece representado en un esquema la disposición de lo enumerado anteriormente dentro del armario eléctrico. Y en las *Figuras 8 y 9* las imágenes del mismo.

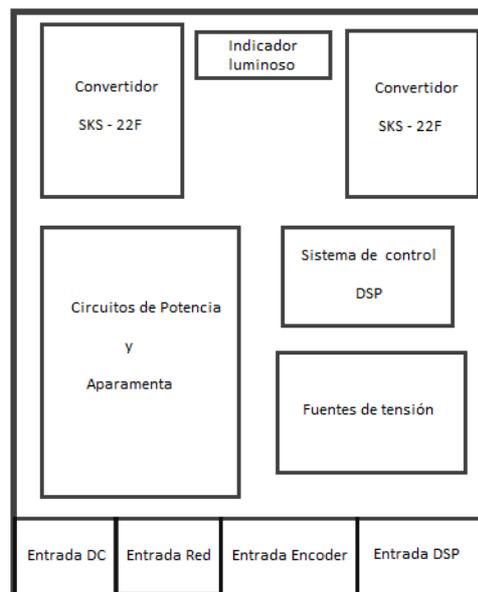


Figura 7. Esquema del armario eléctrico

Fuente: Elaboración propia

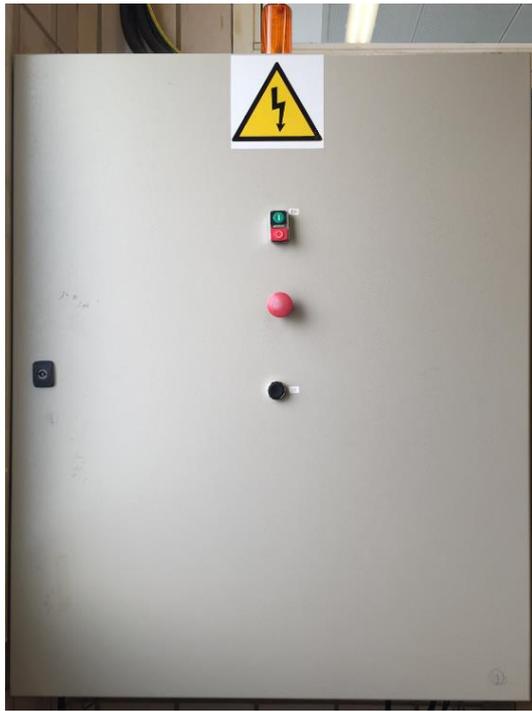


Figura 8. Puerta Armario eléctrico Universidad de Sevilla

Fuente: Elaboración propia

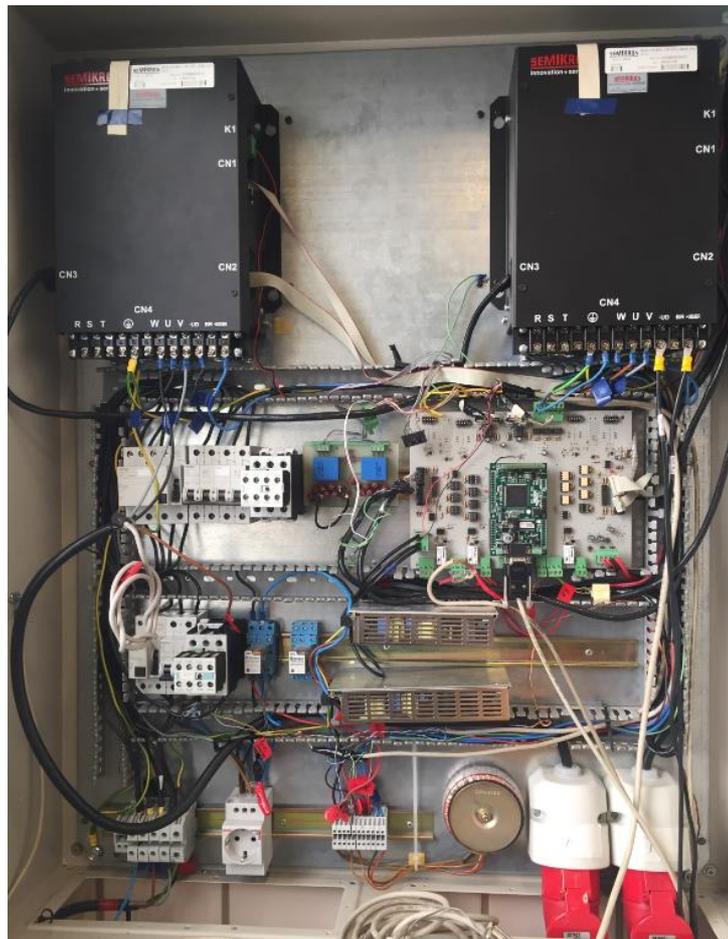


Figura 9. Interior armario eléctrico US

Fuente: Elaboración propia

2.2 Sistema experimental de la Universidad de Málaga

Este sistema experimental nació de un proyecto de investigación que consistía en el diseño de una bancada de ensayos basada en generadores multifásicos que simulara el proceso de conversión de energía eólica llevada a cabo dentro de un aerogenerador eólico. En la *Figura 10* se representa un esquema de este. Los componentes principales del sistema son los que se enumeran a continuación:

- Máquina de DC: permite ensayar el sistema, sustituye al rotor del aerogenerador. Tiene una excitación independiente, pudiéndose así fijar la tensión de excitación al valor que se desee.
- Generador multifásico: consiste en una máquina de inducción de 6 fases.
- Convertidor de potencia back-to-back: lo forman dos convertidores de tensión trifásicos de dos niveles y un convertidor de tensión trifásico con punto muerto fijo de tres niveles (NPC). Este convertidor permitirá controlar tanto el generador como la entrega a red.
- Filtro LC de conexión a red: se utiliza para inyectar a red. Además de filtrar la corriente inyectada a red según los requisitos impuestos por la normativa, permite desacoplar la red de la conmutación del convertidor, almacenando energía y permitiendo el control de forma que la corriente sea efectivamente inyectada.
- Cargas RL trifásicas usadas para simular la carga producida por el viento en el eje del aerogenerador.
- Fuente de alimentación DC usada, al igual que en el sistema anterior, para alimentar a los convertidores de potencia.
- Encoder, para la medida de la velocidad de giro del eje motor.
- Sistema de control modular, encargado del control en tiempo real del sistema completo. Este se compone del microprocesador más las placas de adaptación de señal que, en este caso, forman un sistema modular, en el esquema aparece con el nombre de MECU y se verá en el próximo apartado.
- Armario eléctrico, el cual contiene gran parte de los elementos antes mencionados.

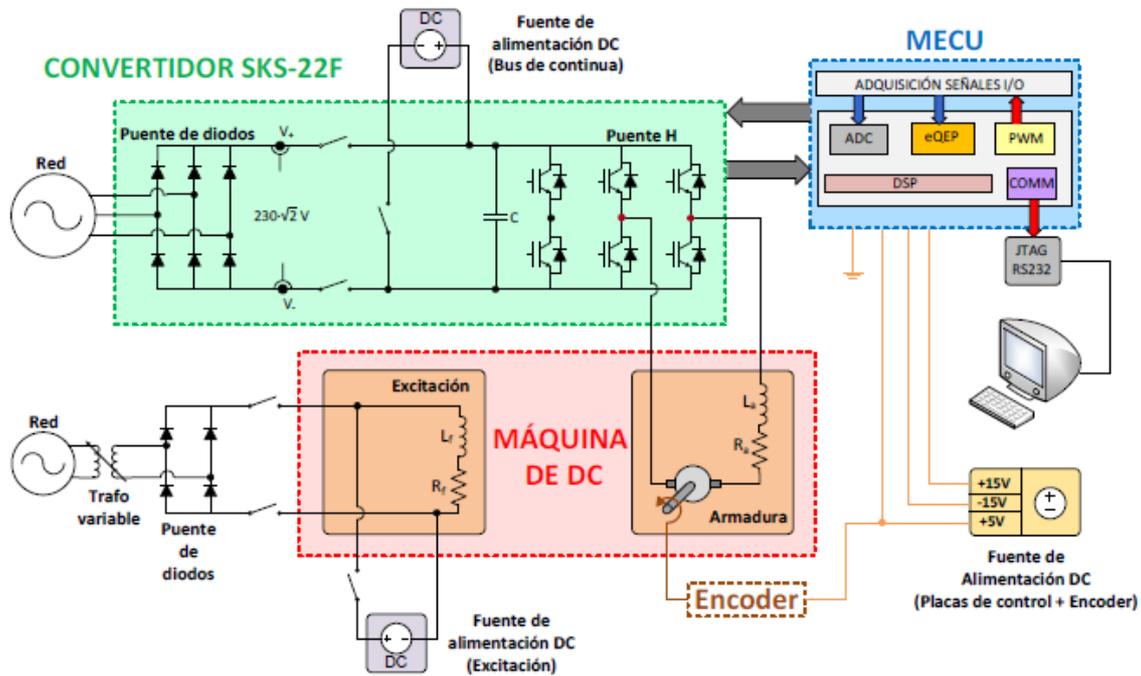


Figura 10. Esquema del sistema experimental Universidad de Málaga

Fuente: [7]

2.2.1 Sistema de control. Esquema modular

Esta versión del sistema de control tiene un esquema modular ampliable de sus placas de adaptación, donde cada adaptación analógica y digital de señal se realiza en placas independientes. El conjunto de las placas de adaptación está pensado para que pueda ser utilizado en diferentes ensayos de laboratorio y prototipado rápido. Este sistema es el que se encuentra implementado en la Universidad de Málaga, el nombre que recibió fue MECU, que viene de las siglas anglosajonas Modular Electronic Control Unit, donde el propio nombre insiste en el hecho de ser una unidad de control de tipo modular, a diferencia de la versión anterior de la unidad de control.

Las principales ventajas que presenta este diseño frente a la versión inicial son su sencillez a la hora de realizar comprobaciones, ensayos y depurar errores. Esto se debe a que físicamente cada placa es independiente de la otra, por lo que se pueden realizar o bien las pruebas de manera totalmente aislada o en conjunto y, en caso de fallo de algún componente o deterioro de la placa esta podría ser sustituida fácilmente sin que afecte en absoluto al resto de las placas que van conectadas a la placa madre.

En la *Figura 11* se puede observar cómo van conectadas cada una de las placas en el plano horizontal, a partir de ahora placas módulo, a la placa base, denominada "motherboard", a través de headers para, en su conjunto, formar el sistema completo. La tarjeta de control va conectada de manera vertical a la placa base, como se aprecia en la *Figura 12*. Este sistema está formado por:

- 1 placa módulo de adaptación de corriente. Esta placa se encarga de adaptar la señal que llega de las sondas Hall del convertidor de potencia, que como recordamos, es una señal en el rango de $\pm 25 \text{ mA}$ y la convierte al rango que admite el DSP, que son 0/3,3 V.
- 1 placa de relés. Se encarga de la gestión de los contactores y la aparamenta del armario eléctrico de manera que sea posible la operación del mismo de forma automática a través del DSP.
- 1 placa de adaptación PWM. Se encarga de realizar la adaptación tanto de las señales de disparo de los IGBTs (de entrada al convertidor y salida de la placa) como de las señales de error de los drivers (de salida del convertidor y entrada a la placa).
- 1 placa de adaptación de encoder. Se encarga de realizar la adaptación de la señal de salida procedente del medidor de velocidad para introducirla en la placa base.
- Control card. Es la placa que se encarga de comunicar el DSP con la placa madre mediante un contactor DIMM96.

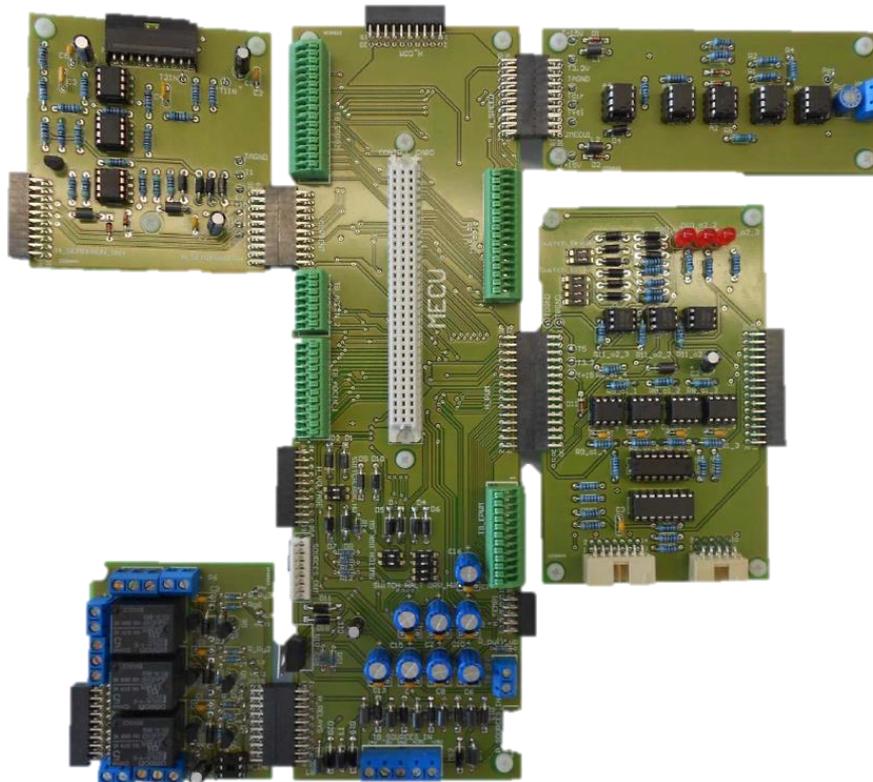


Figura 11. Sistema de control modular plano horizontal.

Fuente: [1]



Figura 12. Sistema de control modular plano vertical.

Fuente: [7]

2.2.2 Armario eléctrico

El armario eléctrico en el que se encuentran instalados los convertidores, los elementos de protección eléctrica, contactores, elementos auxiliares de conexionado y las placas de adaptación se muestra en las *Figuras 15 y 16*. El número de convertidores que tiene instalados es de dos, lo que permite controlar una máquina multifásica de hasta 6 fases. Además, incluye las fuentes de alimentación de los circuitos de las placas de adaptación, así como los elementos de protección eléctrica y conexionado. El armario tiene distintos niveles de montaje para una mejor estructuración, estos son:

- Nivel base o inferior. En este nivel van alojados los elementos que conforman el circuito de potencia y los circuitos auxiliares y de aparamenta, además de los convertidores de potencia. El esquema del mismo se aprecia en la *Figura 13*.
- Nivel supletorio. En esta zona van atornilladas a una placa de metacrilato las placas de adaptación, la cual va montada sobre una chapa metálica supletoria y abatible que permite acceder a la parte inferior del habitáculo. En esta chapa metálica van colocadas también las fuentes de alimentación para las placas de adaptación. Su esquema se muestra en la *Figura 14*.
- Techo del armario. Aquí va colocado un indicador luminoso que emite destellos luminosos intermitentes para avisar de forma notoria que el sistema tiene alimentación y puede empezar a operar. Se aprecia en la *Figura 17*.
- Puerta del armario. Los pulsadores como el de marcha/paro, seta de emergencia, etc. se encuentran aquí.

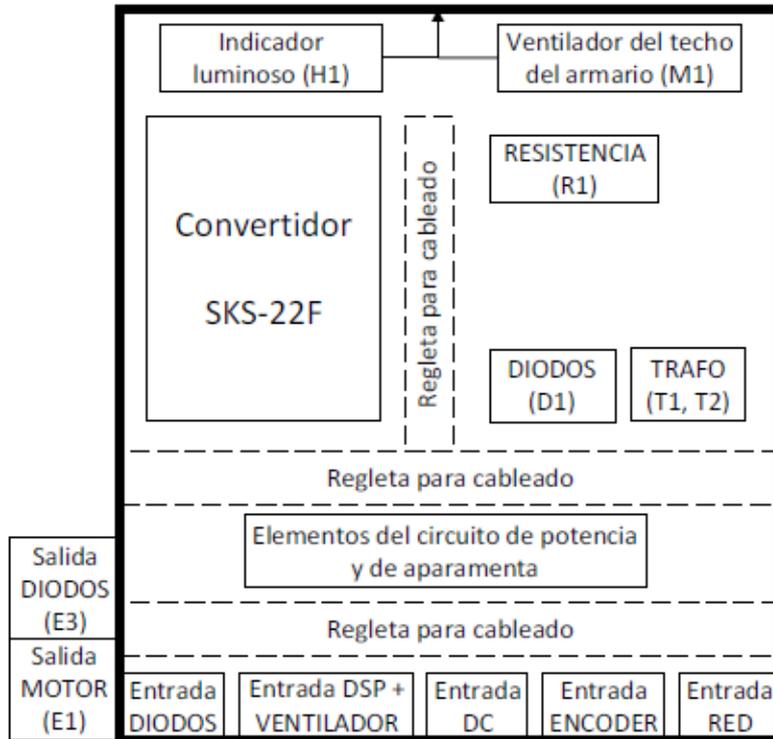


Figura 13. Distribución de los elementos en el armario de Málaga nivel base.

Fuente: [7]

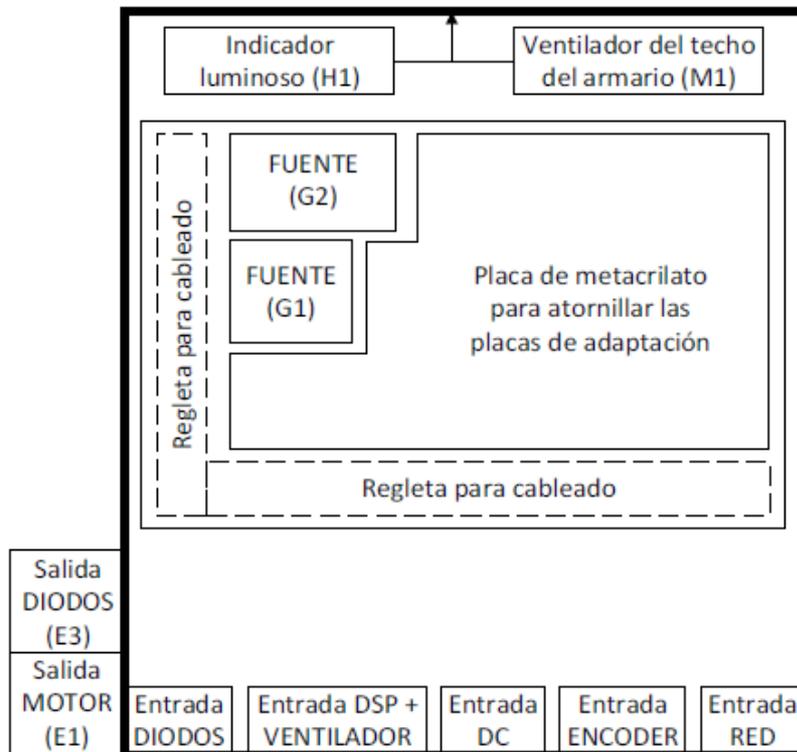


Figura 14. Distribución de los elementos en el armario de Málaga nivel suplitorio.

Fuente: [7]

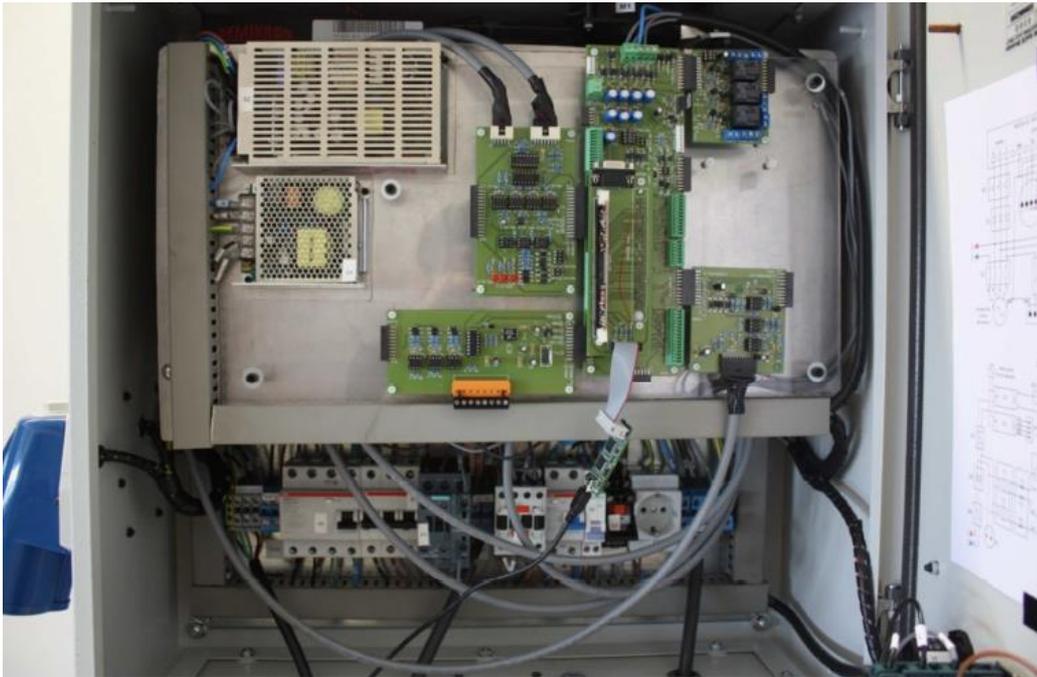


Figura 15. Armario de Málaga nivel supletorio.

Fuente: [7]



Figura 16. Armario de Málaga nivel base.

Fuente: PFC [7]



Figura 17. Armario de Málaga techo y puerta.

Fuente: [7]

Para lograr un buen control es fundamental tener un “cerebro” que sea capaz de obtener la información y mandar las señales de manera precisa y acertada. Es por este motivo por el cual el presente capítulo cobra principal protagonismo dentro de este proyecto. El “cerebro” antes mencionado se trata del procesador digital de señales, que será el encargado de las tareas más importantes para el control del sistema. Una buena selección de este nos permitirá abordar de manera satisfactoria este Trabajo Fin de Máster, además de evitar futuros contratiempos a la hora de poner en funcionamiento una máquina multifásica de más fases que la actual, ya bien por tener que rehacer los códigos que permiten su control o bien porque el DSP elegido no es lo suficientemente potente como para conseguir un buen procesamiento de las señales en el tiempo requerido.

Las tareas que tendrá que llevar a cabo serán las de adquisición de datos para su posterior procesamiento y, además, la generación de señales con el fin de conseguir un algoritmo de control de velocidad y corriente implementado por el usuario para la máquina de inducción.

3.1 Selección del Nuevo DSP

A la hora de abordar esta tarea el procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Identificación de los periféricos que tienen especial relevancia en el conjunto final.
- Identificación de las limitaciones del DSP inicial.
- Estudio del mercado actual de microprocesadores.

Los periféricos con mayor interés son los módulos de generación PWM, el módulo eQEP y el convertidor analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés). A continuación, se explicará brevemente cada uno de estos módulos.

- La modulación por ancho de pulso, que es de lo que se encargará el módulo PWM (siglas en inglés de Pulse Width Modulation), es una de las señales más utilizadas para realizar control con microcontrolador. La modulación se realiza a una señal o fuente de energía. Esta técnica permite modificar el ciclo de trabajo de una señal ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. En este caso, estas señales PWM se usan para controlar el convertidor de potencia que acciona la máquina multifásica.

Los parámetros controlables para generar señales son la frecuencia de la señal y el ciclo de trabajo. La primera depende de la velocidad del control que se quiera realizar posteriormente y, la última, se trata de la relación que existe entre el tiempo en que la señal se encuentra en estado activo y el período de la misma.

- Módulo eQEP, por sus siglas en inglés Enhanced Quadrature Encoder Pulse, que traducido al español sería *codificador de pulsos de cuadratura*. Este módulo se conecta directamente con codificadores incrementales lineales o giratorios para obtener información de posición, dirección y velocidad de máquinas rotativas utilizadas en sistemas de control de posición y movimiento de alto rendimiento. Cada periférico eQEP dispone de 5 bloques funcionales, Quadrature Capture Unit (QCAP), Control Unit (PCCU), Quadrature Decoder Unit (QDU), Unit Time Base for speed and frequency measurement (UTIME) y Watchdog timer (QWDOG).

En nuestro sistema será necesario medir de manera continua el sentido y la velocidad de la máquina de inducción. Cabe mencionar que cuanto más precisa sea la medida de la velocidad mejor será la calidad en el control que se vaya a implementar.

- Analog to Digital Converter, ADC, que, mediante un cuantificador, transforma la señal analógica, ya sea de tensión o de corriente, a digital. Para realizar esta acción necesita previamente una unidad de muestreo y retención, lo que es conocido como *Sample and Hold*, con la que mantendrá el valor constante, en nuestro caso, de la tensión, para proceder a posteriori a la transformación de la señal en el convertidor. En nuestro caso, este módulo es principalmente usado para la medida de las señales procedentes de las sondas Hall de los convertidores, es decir, para la medida de las corrientes de cada fase.

La limitación más restrictiva que se ha apreciado en el Laboratorio de la Universidad de Sevilla durante el último año realizando experimentos en la bancada, es la falta de potencia que tiene el DSP actual a la hora de realizar un cómputo a gran escala, lo que limita el sistema de control y no hace imposible ampliar el número de fases con este microcontrolador.

Partiendo de las definiciones anteriores se procederá a realizar un estudio del mercado actual de microprocesadores para abordar este problema sin disminuir las características que comprometen dichos módulos. La *Figura18* permitió no ir aleatoriamente a la hora de la búsqueda, ya que en la gráfica que aparece en ella se puede observar cuales son los DSPs que están por encima del TMS320F28335 en cuanto a características y rendimiento.

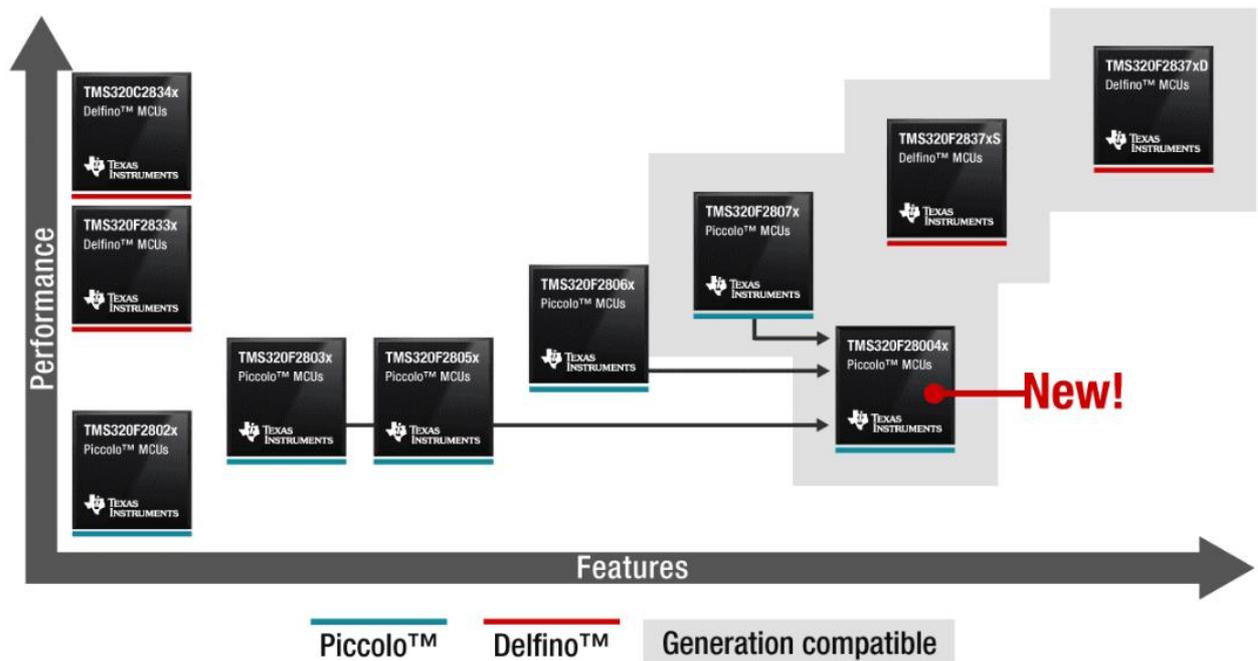


Figura 18. Rendimiento VS características DSP C2000

Fuente: <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/overview.html>

Es casi evidente que el nuevo DSP seleccionado estará entre los que más arriba y a la derecha se encuentren, que pertenecen a la familia C2000 de Delfino como esperábamos. En la *Tabla 1* aparecen las opciones que se valoraron antes de adquirir el nuevo sistema. Destacar que, aunque también se valoraron microprocesadores no pertenecientes a la familia C2000 se descartaron rápidamente debido a que nunca se habían trabajado con ellos y, como se recuerda, queremos hacer el menor número de cambios en la programación para que no surjan problemas futuros.

	DELFINO TMS320F28344	DELFINO TMS320F28375S	DELFINO TMS320F28379D	PICOLO TMS320F280682
CPU	C28x	C28x + CLA	2 x C28x 2xCLA	C28x
Frecuencia	300 MHz	200 MHz	200 MHz	90 MHz
MIPS	300	400	800	90
PWM (canales)	18	24	24	16
UART (SCI)	3	4	4	2
I2C	1	2	2	1
SPI	2	3	3	2
McBSP	2	2	2	1
CAN	2	2	2	1
Flash	0 kB	1 MB	1 MB	256 kB
RAM	260 kB	164 KB	204 KB	100
Precio experimenter kit	99\$	219\$	219\$	-
Precio MCU	12,8\$	22.456\$	24.18\$	8,75\$

Tabla 1. Opciones de DSPs valoradas

Finalmente, el DSP por el que se ha optado ha sido el TMS320F28379D del fabricante Texas Instruments y es el que aparece en la *Figura 19*. Al igual que el anterior, su programación se realizará en el lenguaje *C++* mediante el software *Code Composer Studio*, a través del puerto JTAG. La tarjeta tiene un formato DIMM de 180 contactos y se conectará a la placa madre del sistema de control como se verá en próximos capítulos.



Figura 19. F2837x ControlCard R1.3 con DSP TMS320F28379D

La decisión ha sido tomada a raíz de que el modelo de Delfino TMS320F28344, que sería el sucesor natural del actual, no sería suficientemente potente para controlar una máquina de inducción de 12 fases, por lo que se descartó, quedando así las opciones entre los dos modelos TMS320F28375S (segunda columna de la *Tabla 1*) y el modelo TMS320F28375D (tercera columna de la *Tabla 1*). Con la única diferencia entre ambos que el primero de ellos tiene dos CPUs distintas y el segundo dobla cada una de estas CPUs.

La arquitectura dual C28x conjuntamente con la de CLA permite particiones inteligentes entre varias tareas del sistema. Por ejemplo, un núcleo C28x con uno de CLA se puede usar para la velocidad y la posición, mientras que el restante se puede usar para controlar el par y los bucles de corriente. En la *Figura 20* se observa cómo trabaja en conjunto el núcleo de CLA con el C28x.

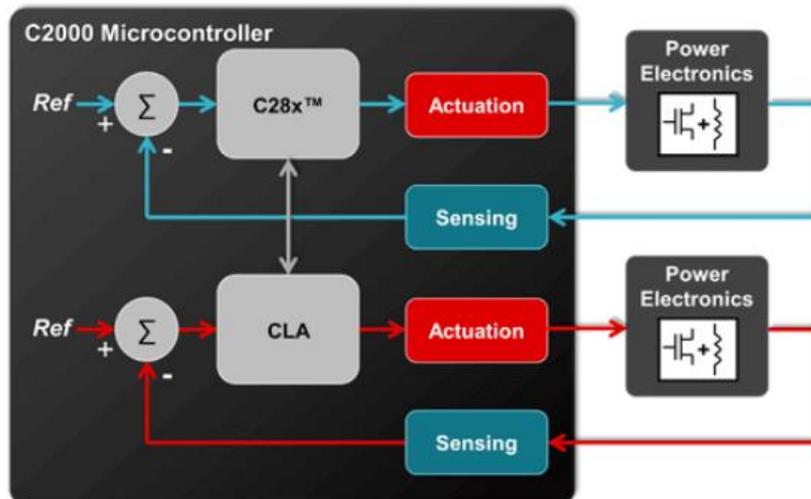


Figura 20. Funcionamiento en conjunto de la CLA y C28x

Fuente: <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/overview.html>

La tensión de alimentación de este DSP es de 5V y la lógica de las señales de entrada y salida 0/3,3V. Las características de la tarjeta de control por la que se ha optado se pueden dividir en tres bloques, periféricos del sistema, periféricos de comunicación y en periféricos de control.

Dentro del primer bloque encontramos:

- Hasta 169 pines GPIO programables individualmente.
- 2 puertos EMIF: proporciona un medio para conectar la CPU a varios dispositivos de almacenamiento externo, como memorias asíncronas (SRAM) o memorias síncronas (SDRAM). Soporta hasta tres chip selects con memoria síncrona y uno con memoria síncrona.
- 6 canales duales controladores de acceso directo a la memoria (DMA)
- ePIE, por sus siglas en inglés *Expanded Peripheral Interrupt Controller*.

Referido a los periféricos de comunicación destacan:

- USB 2.0
- 2 módulos CAN (*Controller Area Network*).
- 3 puertos SPI de alta velocidad (hasta 50 MHz): es un puerto serial de alta velocidad, síncrono de entrada/salida que permite que un flujo de bits en serie de longitud programada (1 a 16 bits) se desplace hacia/desde el dispositivo a una velocidad de transferencia de bits programada.

Normalmente se utiliza para comunicaciones entre el microcontrolador y periféricos externos u otro microcontrolador. Opera en modo *master* o *slave*.

- 2 puertos McBSPs (*Multichannel Buffered Serial Ports*): comunicación full-duplex. Reloj independiente para recibir y transmitir.
- 4 interfaces SCI (*Serial Communications interfaces*): es un Puerto serie asíncrono de dos cables, comúnmente conocido como UART. El módulo SCI admite Comunicaciones digitales entre la CPU y otros periféricos asíncronos que utilizan el formato estándar sin retorno a cero (NRZ).

Posee dos pines externos, SCITXD y SCIRXD. El primero se trata de un pin de transmisión de salida mientras que el segundo es un pin de recepción de entrada. Destacar que operan independientemente y ambos pines se pueden usar como GPIO si no se están usando como SCI.

- 2 interfaces I2C.: se trata de una interrupción que puede ser usada por la CPU. Esta interrupción se puede generar como el resultado de una de las siguientes condiciones: transmitir datos listos, recibir datos listos, registro en acceso listo, sin reconocimiento recibido, arbitraje perdido, detener la condición detectada y direccionado como esclavo.

También contiene una interrupción adicional que puede ser usada por la CPU cuando está en modo FIFO (*First In First Out*)

En último lugar, los periféricos de control:

- 24 canales PWM.
- 16 canales HRPWM (PWM de alta resolución).
- 6 módulos *Enhanced Capture* (eCAP).
- 3 módulos eQEP (*Enhanced Quadrature Encoder Pulse*)
- 8 canales de entrada SDFM (*Sigma – Delta Filter Module*): es un filtro digital de 4 canales diseñado específicamente para la medición de corriente y decodificación de la posición del resolver en aplicaciones de control de motores. Cada canal puede recibir un flujo de bits modulado sigma-delta independiente.

Tras el estudio realizado concluimos que esta es la opción óptima ya que pertenecer a la misma familia que el microcontrolador inicial, C2000 Delfino, por lo tanto, no habría que rehacer los programas de control, únicamente será necesario adaptarlos; y por contar con una arquitectura de doble núcleo, lo que conlleva una mayor potencia para procesar y mandar señales.

3.1.1 Pruebas realizadas

Para comprobar la adecuación del nuevo DSP al sistema de control se han llevado a cabo varias pruebas mediante programación con el software *Code Composer Studio*. Para ello se ha adquirido también, aparte de la ControlCard que se ha visto en la *Figura 21*, una ControlCard Docking Station R4.1 como la que aparece en la *Figura 22* que permite tener los pines accesibles del DSP. En la *Figura 22* se observa cómo quedaría finalmente ensamblada, a través del DIMM180.

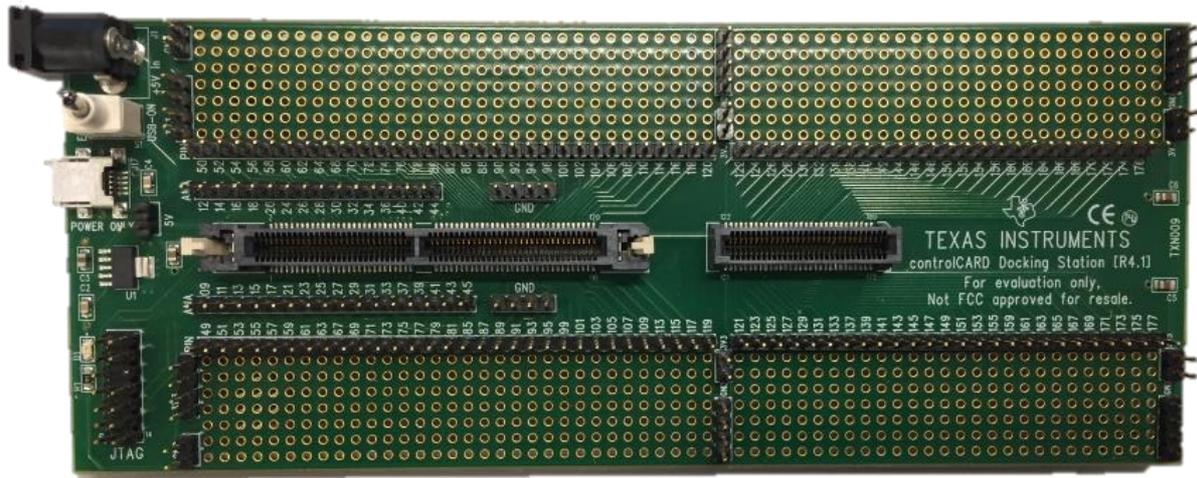


Figura 21. ControlCard Docking Station R4.1

Fuente: Elaboración propia



Figura 22. Conjunto de ControlCard Docking Station R4.1 con F2837x ControlCard R1.3

Fuente: Elaboración propia

Estas pruebas han consistido en realizar los tutoriales que proporciona *Texas Instruments* para el DSP TMS320F28335 adaptándolos al DSP TMS320F28379D haciendo hincapié en entender el software

utilizado y en la comprensión de cada uno de los módulos a través del manual del microcontrolador junto con las pruebas pertinentes, resaltando sobre todo el módulo PWM por la importancia que cobra a la hora de implementar el control de velocidad de la máquina multifásica, ya que gracias a la acción de este módulo será posible realizar el disparo de las ramas de IGBTs, y el periférico ADC.

Tras estos experimentos se concluye que no será necesario aplicar grandes cambios a los códigos ya realizados anteriormente, aunque sí que habrá que detenerse en cada uno de ellos sobre todo para realizar la correcta asignación de registros, ya que estos sí que sufren un gran cambio frente a su antecesor.

3.2 Diferencias con el DSP inicial

Para finalizar, se compararán directamente los dos DSPs, el inicial y el seleccionado. En la siguiente tabla (*Tabla 2*) se detallan las principales diferencias entre los dos microcontroladores.

	TMS320F28335	TMS320F28379D
CPU	C28	2 x C28x
		2 x CLA
TOTAL PROCESSING	150	800
FREQUENCY (MHz)	150	200
FLASH (kB)	512	1024
RAM (kB)	68	204
DAC	0	3
PWM (CHANNELS)	18	24
PWM HR (CHANNELS)	6	16
SPI	1	3
UART (SCI)	3	4
I2C	1	2
CAN	2	2
DMA (CHANNELS)	6	12
EMIF	32/16 bits	1 x 32/16 bits
		1 x 16 bits
McBSP	2	2
USB	0	1
ADS	16	4
GPIO	88	169

Tabla 2. Diferencias entre DSP TMS320F28335 y DSP TMS320F28379D

La primera diferencia destacable es que el nuevo DSP elegido cuenta con dos CPU (de sus siglas en inglés *Central Processing Unit*) a diferencia del inicial que tan solo contaba con una. Esto implica una

mayor memoria principal, mayor potencia de la unidad de control, que se traduce en un mayor soporte para coordinar y controlar las operaciones que se hagan con los datos, y una mayor eficiencia para realizar las operaciones aritméticas y lógicas con los datos que recibe la unidad de control.

Por otro lado, aparece un nuevo procesador, doble también, CLA (por sus siglas en inglés *Control Law Accelerator*). Se trata de un acelerador matemático de 32 bits de coma flotante que funciona en paralelo de manera independiente a la CPU principal (C28). Se configura desde la CPU principal y puede ejecutar algoritmos de manera independiente a esta. Además, posee su propia estructura de bus, así como su conjunto de registros y unidad de procesamiento. Es idóneo para manejar bucles de control y para algoritmos de filtrado o matemáticos.

Esto se refleja en el procesamiento total, donde el nuevo microprocesador cuadruplica en número de MIPS (*Microprocessor without Interlocked Pipeline Stage*) a la versión a la que está reemplazando, consecuentemente cuadruplica la potencia del procesador en su conjunto.

Cabe remarcar también que trabaja a una mayor frecuencia, lo que significa un aumento de aproximadamente un 33.3% del número de operaciones que el procesador es capaz de realizar por segundo.

4 SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental implementado para el control de una máquina de más de 6 fases y hasta de 12 fases se representa en la *Figura 23*. Los componentes principales que conforman el sistema son los enumerados a continuación, aunque en este proyecto nos centraremos exclusivamente en el recuadro rojo y su contenido.

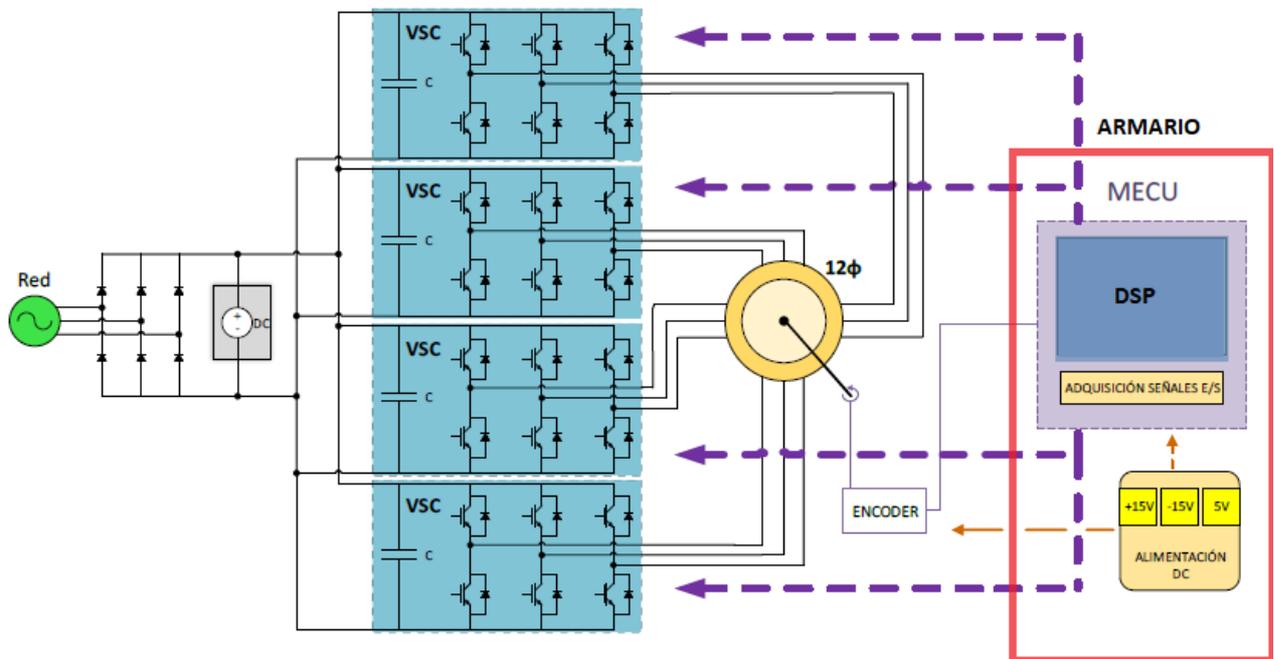


Figura 23. Esquema del sistema experimental

Fuente: Elaboración propia

- Motor multifásico: Aunque el sistema experimental permite controlar accionamientos multifásicos de hasta 12 fases, en el laboratorio hay disponible una máquina multifásica de 7 fases, rebobinada también por Mayre, como anteriormente se mencionó con la máquina de 5 fases. Su potencia nominal es de 3,6 kW del fabricante Siemens. En la *Figura 24* se aprecia dicha máquina.



Figura 24. Máquina multifásica de 7 fases

Fuente: Elaboración propia

- Convertidor de tensión: Es necesario un convertidor de tensión que transforme la tensión continua del DC-link en tensión alterna para cada una de las doce fases para las que se diseña el sistema experimental. Para ello se emplearán 4 convertidores trifásicos VSC de dos niveles. El modelo utilizado del convertidor de potencia es el SKS 46F B6U+E1CIF + B6CI 17V06 del fabricante Semikron, en la *Figura 25* aparece una imagen del mismo.

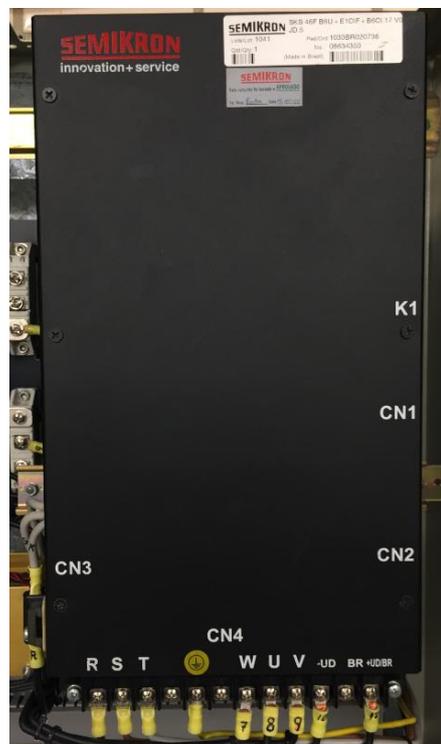


Figura 25. Convertidor de potencia SKS 46F B6U+E1CIF+B6CI 17V0

Fuente: Elaboración propia

Cada convertidor está compuesto por seis interruptores, dos por fase. Estos interruptores son del tipo transistor bipolar de puerta aislada, IGBT, por sus siglas en inglés Insulated Gate Bipolar Transistor. Dichos interruptores son activados por tensión en la puerta. Es necesario realizar la conmutación de los interruptores a través de las puertas de cada interruptor, para ello se utilizará el método de modulación por ancho de pulso.

No se entrará en detalle en los conectores de este convertidor pues son idénticos a los que ya se vieron en el Capítulo 2.

En el *Anexo B.5* se pueden encontrar su hoja de características, se destacan aquí las más importantes:

- Intensidad eficaz máxima admisible sin sobrecarga de 46 A, para frecuencias de conmutación de 10 kHz.
- Frecuencia de conmutación de los interruptores máxima de 15 kHz.
- Tensión máxima admisible en el bus de continua de 350 V.

Las sondas Hall de intensidad de este convertidor son el mismo modelo que las de los otros convertidores comentados anteriormente, SKHI 20opA.

- Fuente de alimentación: Utilizada para alimentar el bus de continua de los convertidores. Es el mismo modelo de la que se vio en el apartado 2.2.
- Encoder: Al igual que la fuente de alimentación, la información detallada se recogió en el apartado 2.2 y su hoja de características se encuentra en el *Anexo B.4*.
- Sistema de control: Gestiona el funcionamiento del motor multifásico. Consta de una tarjeta de control basada en un procesador digital de señales, y un conjunto de placas encargadas del tratamiento de distintas señales necesarias para el control del sistema. Debido a la importancia que tiene en este proyecto, se explicará en detalle en el próximo apartado.
- Armario eléctrico: Es el lugar donde irán ubicados los cuatro convertidores de tensión necesarios y las placas de adaptación del sistema de control, además de toda la aparamenta de protección eléctrica y de maniobra necesaria para operar el sistema experimental completo. Debido también a su relevancia en este proyecto se explicará en detalle en un futuro apartado de este capítulo.

4.1 Sistema de control

En este apartado se entrará en detalle en cada uno de los periféricos necesarios para llevar a cabo el control de la bancada a nivel de hardware. Este control consiste en la generación y envío de las órdenes correctas a los IGBTs que forman el convertidor de potencia, de manera que estos queden

encendidos o apagados en cada instante de tiempo. Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de control será modular, es decir, cada adaptación tanto analógica como digital es realizada por placas independientes.

En parte, se han utilizado las placas que nos han facilitado desde la Universidad de Málaga y que fueron realizadas por Manuel Gómez del Río, Mario Bermúdez Guzmán y Sebastián Castillo Valenzuela. En sus proyectos finales de carrera quedan recogidos los diseños de estas en detalle. El resto de las placas se explicarán en los siguientes apartados, su diseño, si ha sido necesario, así como las modificaciones que se le han realizado a los diseños facilitados por los compañeros en orden de adaptar las placas modulares a nuestro sistema modular.

A continuación, se representa un esquema (*Figura 26*) donde puede apreciarse en un mismo plano el conjunto de placas finales que admitiría este sistema de control, aunque no todos los periféricos serán utilizados ya que no tienen ninguna finalidad en el presente proyecto.

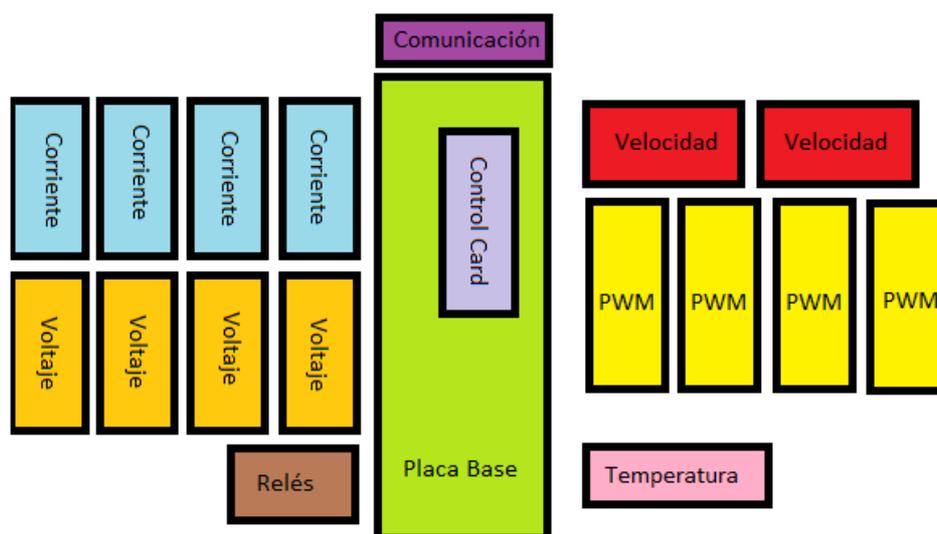


Figura 26. Diagrama del sistema de control modular plano horizontal

Fuente: Elaboración propia

Observando el esquema anterior, es inmediato conocer el número máximo de módulos de cada tipo que admite la placa base, llamada también *motherboard*. Esta acepta hasta 4 módulos de adaptación de corriente, 4 módulos de tensión, 1 placa de relés, 1 placa de adaptación de temperatura, 4 de adaptación PWM, 2 placas de adaptación de encoder o bien, 1 de adaptación de tacómetro y otra de encoder y, 1 placa de comunicaciones. La funcionalidad de cada una de las placas módulo se verá más adelante. Los módulos se conectan unos a otros en serie a través de la placa base, quedando exactamente como se predispone en el diagrama anterior.

Además, a la placa base se le conecta verticalmente la tarjeta de control como se observa en el diagrama de la *Figura 27*. En orden de reutilizar al máximo posible lo que ya teníamos, se decidió reutilizar también el conector DIMM100 que conectaba la tarjeta de control TMS320F28335 a la placa madre, pero, en este caso, el DSP con el que se controlará la bancada es el TMS320F28379, por lo que su conector DIMM180 nos obliga a realizar una placa cuya única finalidad sea rutear los pines de DIMM180 a DIMM100.



Figura 27. Diagrama del sistema de control modular plano vertical

Fuente: Elaboración propia

En orden de controlar hasta un máximo de 12 fases, la configuración del sistema de control que se quedará implantado consiste en 4 placas de adaptación de corriente, una única placa de adaptación de tensión, 1 placa de relés, 4 placas de adaptación PWM y 1 placa de adaptación del encoder. A su vez, las placas de adaptación de corriente serán cada una de 2 canales, las de tensión, a diferencia de la diseñada en la Universidad de Málaga, controlará una única señal.

En los siguientes apartados se detallará una a una las placas que se han visto hasta ahora, especificando su funcionalidad, el diseño o modificaciones en caso de que hayan sido realizadas en el marco de este proyecto, así como las pruebas que se le han realizado para verificar su correcto funcionamiento.

Mencionar que a la hora de diseñar las diferentes PCB, tanto de los módulos como de la placa base, se han tenido en cuenta las restricciones de espacio impuestas por la geometría del armario eléctrico. Al final del presente capítulo se mostrará la distribución final de los módulos acoplados a la placa base.

A continuación, se describirán en detalle cada uno de los módulos utilizados en el control del sistema en estudio.

4.1.1 Placa base

Esta placa es la encargada de unir cada uno de los módulos que tiene conectados sin llegar a realizar la adaptación de señales, pues, su función, es la de repartir hacia cada una de las placas las señales que llegan del controlador y, también, recoge las señales que proceden del sistema y las transmite al DSP. Para ello dispone de los filtros correspondientes e integra las lógicas para unir señales de error, también la gestión de todas las fuentes de alimentación, que son las fuentes de alimentación conmutadas que se ubican en el armario eléctrico (+24V, +5V, +15V, -15V y GND). Asimismo, generará la alimentación de +3,3V a partir de los +5V.

Aparte de esta tierra, la de GND, que proviene de las fuentes conmutadas, existen cuatro tierras más, la analógica, la de potencia y la tierra del controlador. Todas ellas se unen en la placa madre mediante filtros de interfaz electromagnética (EMI).

En la *Figura 28* y *Figura 29* se muestran las vistas superior e inferior de la placa. Esta placa ha sido reutilizada en su totalidad sin hacer modificación alguna, recordamos que fue realizada por Sebastián Castillo Valenzuela y la información detallada de su diseño, así como los esquemáticos se pueden encontrar en su proyecto final de carrera “*Diseño, simulación y construcción de un inversor trifásico de tres niveles NPC para conexión a red*”.



Figura 28. Vista frontal de la *Motherboard*

Fuente: [1]

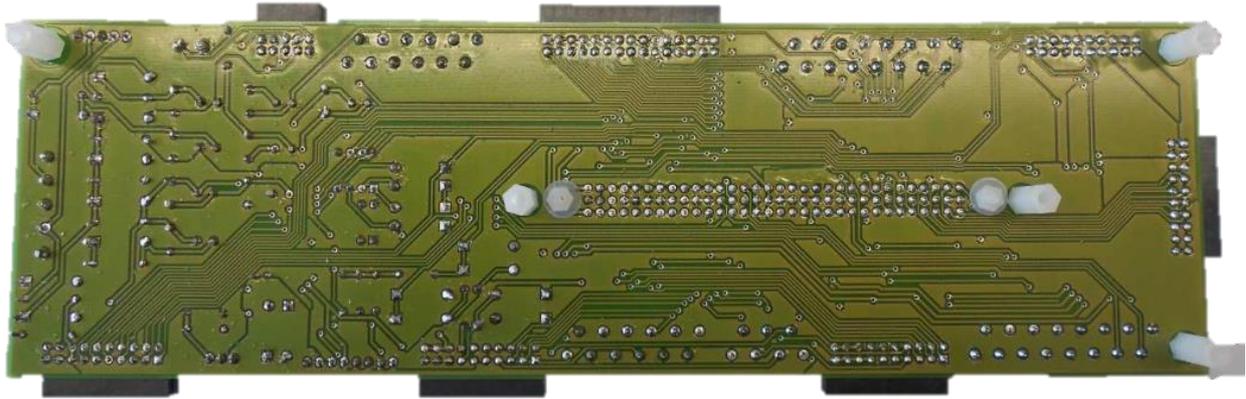


Figura 29. Vista inferior de la *Motherboard*

Fuente: [1]

Como se aprecia, se distinguen una serie de conectores que son los que permiten que la placa de adaptación tenga un esquema modular ampliable, donde cada uno de los módulos realiza una adaptación independiente a las demás.

A continuación, se detallará la funcionalidad de cada uno de ellos.

- CONTROL CARD

Se trata de un conector Eurocard de 96 contactos que permite integrar la tarjeta de control a la placa madre. Fue diseñado para conectar tanto la placa de adaptación del *Real Time Target Machine*, así como la placa de adaptación del DSP. Para poder ser controlado mediante el primer medio mencionado se debería realizar una adaptación tanto de señales como de conectores, mientras que para el DSP solo sería necesario realizar la adaptación de los conectores.

En este proyecto la tarjeta de control utilizada será el DSP.

- H_CURRENT

Como su nombre indica, mediante este conector será posible conectar las placas de adaptación de corriente. La tarjeta admite un máximo de 8 medidas de corriente, teniendo en cuenta que cada placa de adaptación que se usará mide hasta 2 corrientes, el máximo, como se vio en la *Figura 26*, es de 4 placas de este tipo que serán las necesarias en el presente proyecto.

Concretamente, las placas que tendrá que integrar son las encargadas de adaptar las medidas de intensidad procedentes de las sondas hall del convertidor SKS 46F B6U+E1CIF+B6CI 17V.

- H_VOLTAGE

En este caso las placas de adaptación que se integran a través de este conector son las de tensión, admitiendo en este caso 4 medidas de tensión simultáneas. En el presente proyecto se conectará únicamente una placa con esta finalidad pues la única tensión que nos interesa medir es la correspondiente al DC-Link.

- H_RELAYS

La finalidad de este conector es admitir el módulo de relés, es decir, los actuadores digitales que controlan la aparamenta del armario.

- H_TEMP

Este conector conecta módulos de adaptación para sondas PT100 con la finalidad de medir temperatura. Aunque su funcionalidad es útil, en este proyecto no se usará dicho conector ya que el factor temperatura no es interesante en el funcionamiento que se le va a dar a la bancada.

- H_PWM

Este *header* es el encargado de conectar módulos de adaptación de las señales y salida del convertidor. Admite hasta 12 señales de disparo de IGBT que provienen del PWM de la tarjeta de control, 2 señales de break (resistencias de protección contra sobretensión) aunque como en este caso se ha modificado la placa de voltaje, como máximo tendrá que gestionar una señal de break. Además, también permite gestionar 4 señales de error, 1 reset de drivers, 1 paro forzado por software y 1 paro forzado por hardware. En nuestro caso, las señales de reset y paros forzados no podrán ser utilizadas porque los convertidores que utilizamos, SKS 46F B6U+E1CIF+B6CI 17V, no incluye dichas funcionalidades.

- H_SPEED

La funcionalidad de este conector es poder integrar el módulo de adaptación del encoder que permitirá medir la velocidad de giro de la máquina multifásica. Aunque podrían conectarse simultáneamente un módulo de tacómetro y otro del encoder, al primero no se le dará utilidad en este contexto.

- H_COM

Los módulos relacionados con la comunicación se conectarán a través de este *header*. Es útil cuando se quieren compartir variables con otros sistemas de control de manera que puedan coordinarse entre sí. Nosotros no lo utilizaremos.

4.1.2 Placa de adaptación de la sonda Hall

La placa de adaptación de la sonda Hall se encarga de realizar la adaptación de la señal de salida de las sondas Hall que incluye el convertidor para introducirla en la placa base. El propósito de la adaptación es conseguir que la señal de salida de las sondas Hall, que serán unas señales de corriente comprendidas en el rango $\pm 25 \text{ mA}$ sean introducidas en la placa base como señales de tensión en el rango 0/3,3 V.

Como se describió en el apartado 4.1, la placa base está preparada para recibir 8 señales de medida

de intensidad por un mismo conector, que son las necesarias para este proyecto, ya que cada convertidor proporciona dos señales de medida y son utilizados 4 convertidores.

Esta placa ha sido diseñada por Manuel Gómez del Río, y toda la información detallada respecto a ella se puede encontrar en su PFC "*Control de un aerogenerador eólico trifásico*".

4.1.2.1 Diseño de la Placa de Circuito Impreso

En este proyecto se han reutilizado los esquemáticos de este módulo, pero a la hora del diseño se han realizado una serie de cambios en la PCB con el software *Altium Designer*. La decisión ha sido tomada a raíz de que las placas para este proyecto se han fabricado en el laboratorio de la Universidad de Sevilla y no ha sido una empresa la que se ha encargado de esta fase, por lo que se ha intentado, sobre todo, eliminar los problemas que pudieran surgir en la fabricación de las mismas incluso antes de llevar esta a cabo.

Los motivos por los que se ha utilizado este software se listan a continuación:

1. Es un programa de diseño de PCBs muy utilizado en el mundo industrial.
2. Se mantiene constantemente actualizado.
3. Cuenta con muchas funcionalidades a la hora de querer llevar el prototipo a la realidad, como, por ejemplo, un primer listado de componentes.
4. La función de autoroute es suficientemente buena.
5. Hay muchos tutoriales accesibles en internet.

Las dimensiones de la placa de circuito impreso no se han variado (74,92 x 80,03 mm), ya que es el tamaño acorde con el espacio disponible para esta placa según el diseño de la placa base, y tiene un espesor de 1,5 mm.

Aunque es cierto que la placa es de doble capa, al no estar los pads estañados estos no actuarán todos como vías por defecto. Todos los componentes serán soldados por una cara, pero sí que se procederá a estañar manualmente algunos pads para que puedan ser ruteados por ambas caras de la PCB.

Cabe destacar que en ambas caras hay construidos polígonos que están conectados a la tierra analógica.

Hay disponibles diversos agujeros para anclar de manera óptima la placa al armario.

Para realizar los cambios en el ruteado se han establecido las siguientes reglas, ordenadas de mayor a menor prioridad:

- a) Reglas de espaciado mínimo entre líneas
 1. Espaciado mínimo con agujeros de conectores Eurocard: 0,9 mm.

2. Espaciado mínimo con agujeros: 2 mm.
 3. Espaciado mínimo entre líneas: 0,3 mm.
- b) Reglas de espesor de ruteado
1. Espesor de líneas de tierra o alimentación:
 - Mínimo: 0,3 mm.
 - Óptimo: 0,5 mm.
 - Máximo: 0,6 mm.
 2. Espesor de líneas:
 - Mínimo: 0,2 mm.
 - Óptimo: 0,3 mm.
 - Máximo: 0,6 mm.

El espaciado mínimo en los agujeros será necesario para evitar que las tuercas y tornillos que ajustan las placas pisen el ruteado y hagan contacto con él. Respecto al espaciado con las líneas de tierra y fuente se intentará que sea lo mayor posible, aunque en zonas cercanas a los conectores el valor estará próximo al establecido en la regla.

En adición a estas reglas se tendrán en cuenta principios tales como evitar ángulos rectos en el ruteado, reducir la longitud de las pistas en la medida de lo posible o respetar la distancia entre componentes.

Teniendo en cuenta todas estas pautas, se conseguirá reducir la cantidad de ruidos indeseables y se garantizará una correcta transmisión de las señales.

En el *Anexo C.1* se muestra el resultado final de la placa de circuito impreso, tanto la vista superior como la inferior de la misma.

4.1.2.2 Componentes de la placa

En la *Tabla 3* aparecen los componentes necesarios para realizar la placa de adaptación. Hay que tener en cuenta que ha sido necesario realizar 3 placas idénticas (no 4 porque una de las que compone el sistema es la que ha sido facilitada por la Universidad de Málaga), por lo que la cantidad de componentes finales fueron los que aparecen en la columna *cantidad* multiplicados por 3.

El proceso de compra de los componentes es común a todas las placas de adaptación que se han realizado. Se procedió a realizar un listado con todos los componentes que se requerían para la fabricación de las placas, después, se hizo inventario de los componentes disponibles actualmente en el laboratorio para aprovecharlos y, finalmente, se pidió el resto a diversos distribuidores de electrónica, como fueron *Farnell element 14* y *RS Component*.

Componente	Descripción	Cantidad	Valor	Referencia Componente	Precio
Cap Pol1	Polarized Capacitor (Radial)	3	10uF	UPW1C100MDD1TD	0,75 €
Cap Semi	Capacitor (Semiconductor SIM Model)	3	100nF	ECQE2104JF	0,90 €
Cap	Capacitor	2	22nF	K223K15X7RF5UH5	0,20 €
Diode 1N4148	High Conductance Fast Diode	2		1N4148TA	0,12 €
Diode 1N5817	High Conductance Fast Diode	4		1N5817	1,08 €
Header 10X2H	Header, 10-Pin, Dual row, Right Angle	2		1667826	8,00 €
Header 10	Header, 10-Pin	1		5-102203-7	2,88 €
Inductor	Inductor	2	30mH	BL01RN1A1D2B	0,46 €
Res2	Resistor	8	10k	MCF 0.25W 10k	0,24 €
Res2	Resistor	2	120	MF25 120R	0,06 €
Res3	Resistor	1	1.3k	MF25 1k3	0,03 €
Res3	Resistor	1	2k	MF25 2k	0,03 €
Res3	Resistor	6	4k7	MF25 4k7	0,18 €
Res3	Resistor	1	3k	MF25 13k	0,03 €
Plug	Plug	8		EST-1(GR) / TEST-1	0,80 €
OPA2277	TI High presisiom op amp, [NoValue]	2		OPA2277UA/2K5	7,64 €
OPA277		1		OPA277PA	3,21 €
LM4040AIM3-2.5	Precision Micropower Shunt Voltage Reference	1		LM4040AIZ-4.1/NOPB	1,19 €

Tabla 3. Componentes placa adaptación Sonda Hall

El precio total para cada placa de este módulo es de 27,80€, por lo que el precio para las 3 placas asciende a 83,40€.

4.1.2.3 Montaje de la placa

Para el montaje de la placa se han seguido los siguientes pasos:

1. Dibujar la circuitería deseada con el software *Altium Designer* e imprimir el diseño final en el fotolito.
2. Preparar los líquidos para el revelado de la placa de circuito impreso. Estos líquidos son el revelador y el líquido atacante de la placa.
3. Insolado de la placa. Mediante la insoladora de rayos UV del laboratorio conseguimos sensibilizar el cobre únicamente en aquellas zonas expuestas directamente a la luz.
4. A continuación, sumergimos la placa en el líquido revelador que se ha preparado con anterioridad. Este líquido elimina la resina que ha estado expuesta a la luz UV en la etapa anterior, mientras que el resto de la resina permanece intacta, evitando que en un paso posterior el ácido las ataque y elimine el cobre que hay bajo la misma.
5. El último paso para conseguir el diseño deseado en la PCB consiste en sumergir la placa en la bandeja del líquido atacante. El ácido atacará y disolverá el cobre de las zonas que no están

protegidas por la resina sobrante.

6. Para finalizar, con el taladro de columna se realizarán los orificios en los que se soldarán los componentes, sirviendo como guía tanto los pads como los footprints.

En la *Figura 30* y *Figura 31* se muestra el resultado final de las placas.

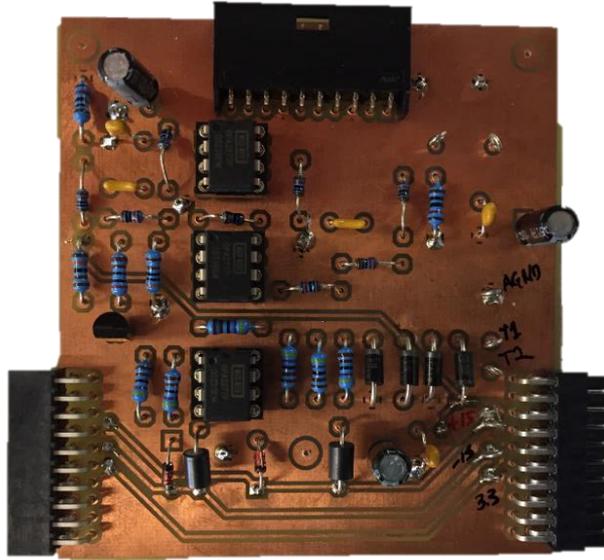


Figura 30. Placa de adaptación de la Sonda Hall. Vista superior

Fuente: Elaboración propia

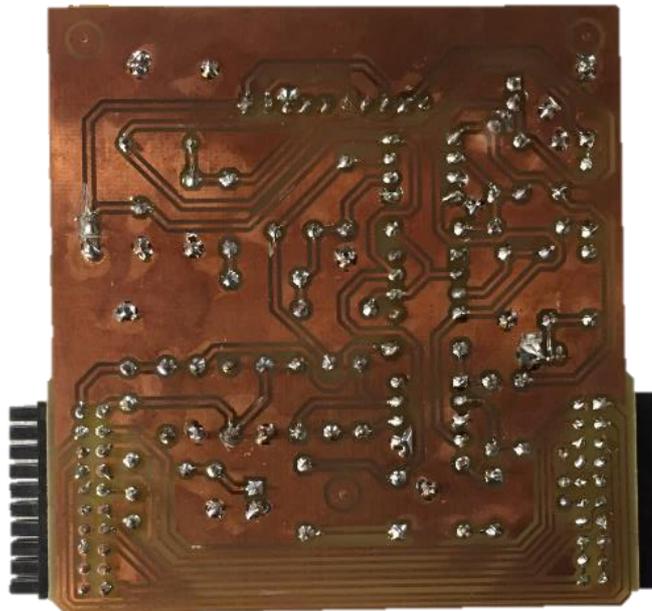


Figura 31. Placa de adaptación de la Sonda Hall. Vista inferior

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.4 Ensayo de la placa

Como se ha dispuesto de una placa de adaptación de la sonda Hall facilitada por la Universidad de Málaga se han podido realizar ensayos en esta placa antes de proceder a la fabricación del resto.

En este apartado solo se explicará lo necesario para entender el ensayo que se ha realizado, como ya se ha dicho, el detalle exhaustivo de los esquemáticos se encuentra en otro PFC.

El primer paso fue comprobar el correcto funcionamiento de los circuitos integrados aislando estos mismos de la placa de circuito impreso y probándolos en una protoboard. Tras esto se procedió a hacer los ensayos en la placa de la manera que se detalla a continuación.

Fueron necesarias una fuente de alimentación simétrica de $\pm 15V$ y una de $+3,3V$. Además, fue necesaria otra fuente de alimentación para simular la señal de la sonda de corriente.

Es necesario conocer los puertos de conexión que han sido empleados en estos ensayos. En primer lugar, tenemos el puerto de conexión a la placa base y, por otro lado, el puerto de conexión al convertidor. En la Figuras 32 y 33 se resumen los pines de ambos conectores, aunque no todos ellos sean utilizados.

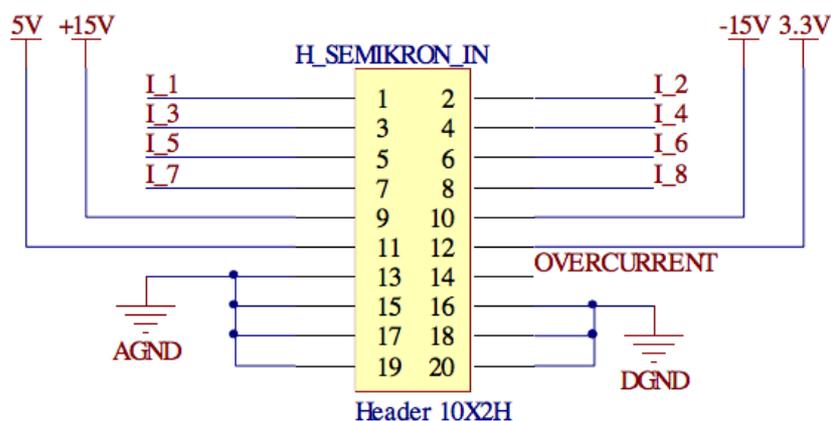


Figura 32. Pines del puerto de conexión: placa sonda hall - placa base

Fuente: Elaboración propia

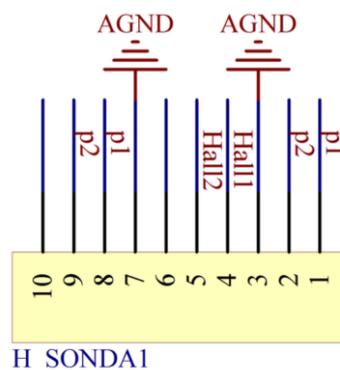


Figura 33. Pines del puerto de conexión: placa sonda hall - sonda hall

Fuente: Elaboración propia

La descripción de cada una de las variables aparece en las siguientes tablas (Tablas 4 y Tabla 5):

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
+15 V	Alimentación de +15 V
-15 V	Alimentación de -15 V
3,3 V	Alimentación de +3,3 V
5 V	Alimentación de +5 V
AGND	Tierra analógica
DGND	Tierra digital
I1	Señal de medida de intensidad nº1
I2	Señal de medida de intensidad nº 2
I3	Señal de medida de intensidad nº 3
I4	Señal de medida de intensidad nº 4
I5	Señal de medida de intensidad nº 5
I6	Señal de medida de intensidad nº 6
I7	Señal de medida de intensidad nº 7
I8	Señal de medida de intensidad nº 8
OVERCURRENT	Señal de sobrecorriente

Tabla 4. Variables placa sonda Hall - placa base.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
p1	Alimentación de +15 V filtrada
p2	Alimentación de -15 V filtrada
AGND	Tierra analógica
Hall 1	Señal de sonda Hall nº 1
Hall 2	Señal de sonda Hall nº 2

Tabla 5. Variables placa sonda Hall - sonda Hall.

Una vez conocidos los puertos, el siguiente paso es alimentar la placa de manera correcta para que queden alimentados los circuitos integrados. En este caso la alimentación de $\pm 15V$ será la que alimente el OPA2277.

La señal de la sonda hall ha sido simulada con una fuente de alimentación en la que se ha ajustado el valor de tensión para que al circuito le lleguen intensidades en el rango $\pm 25mA$.

Tras cada CI se han ido comprobando las salidas para corroborar que la adaptación está siendo la adecuada.

El OPA277 genera una señal de referencia de +1,5V a partir de los +3,3V con los que se ha alimentado la placa, esta señal pasa al OPA2277, al que le llega también las señales de la sonda hall, ya aquí, en el rango de 0/3,3V. Esto se ha conseguido en los siguientes pasos:

1. La señal de la sonda hall se encuentra en el rango $\pm 25mA$ y una vez introducidas a la placa, esta las transforma en señales de tensión a través de una resistencia de medida de 120Ω , obteniéndose así una señal en el rango $\pm 3,3V$.
2. Seguidamente, la señal pasa por un divisor de tensión, referido a la tensión de referencia de 1,5V, y pasa por un filtro activo paso bajo, para filtrar el ruido procedente de la medida que incluye un amplificador operacional modelo OPA2277 alimentado como hemos dicho antes a $\pm 15V$.
3. A continuación, la señal pasa por otro amplificador operacional modelo OPA2277 alimentado a $\pm 15V$ en configuración inversora con ganancia unitaria. De esta forma la señal de salida se encontrará en el rango 0/3,3V.
4. Por último, se introduce un saturador mediante dos diodos 1N5817 para que en el caso de que la señal de salida de la sonda hall sobrepase $\pm 25mA$, el saturador se encargará de saturar la salida de la etapa de adaptación para que no sobrepase el rango 0/3,3V.

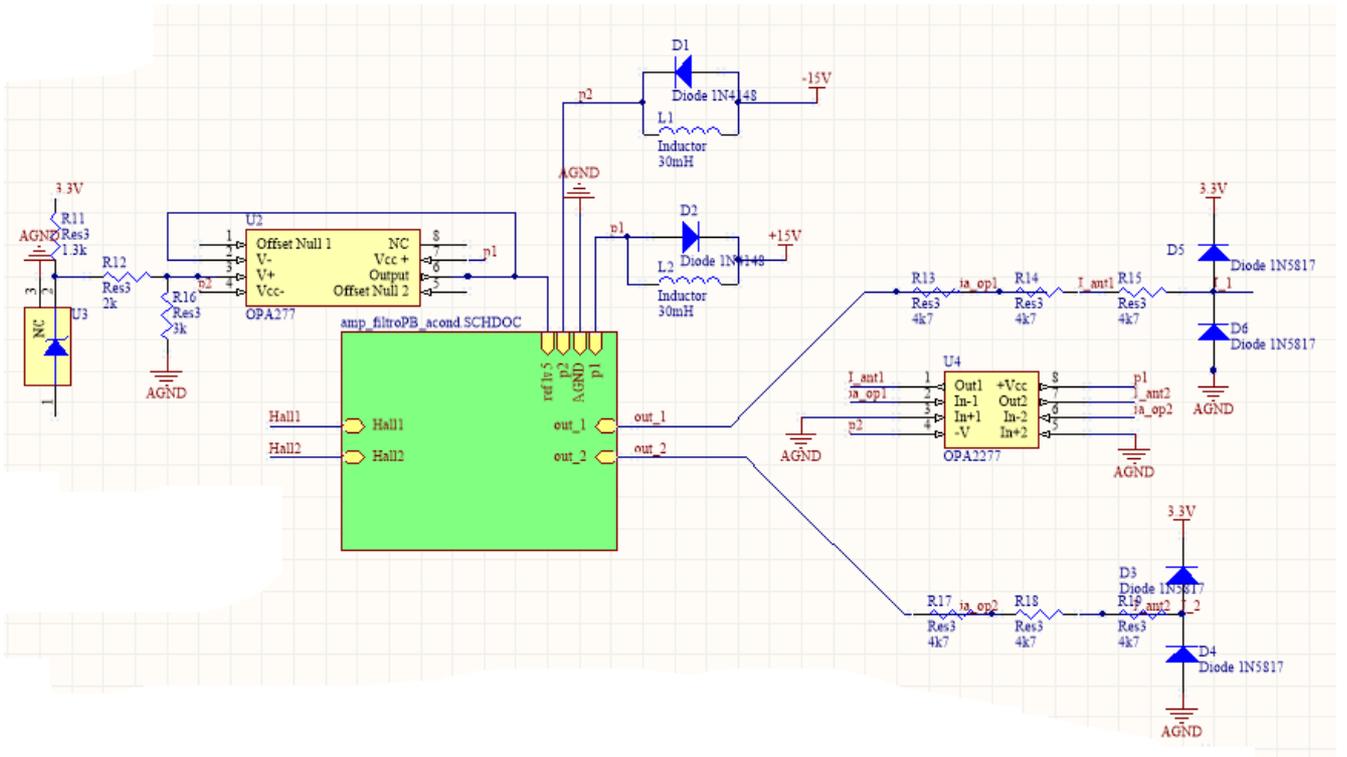


Figura 34. Esquemático de la adaptación de la señal de la sonda hall

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 6* se resumen los resultados del ensayo, que, como se observan, son bastante lineales.

Hall (mA)	I ₁ (V)
-24,94	0,03
-20,66	0,27
-17,59	0,45
-13,46	0,7
-9,87	0,91
-5,35	1,17
-2,38	1,34
-1,25	1,41
0	1,48
1,02	1,55
2	1,61
5	1,78
9,13	2,03
13,29	2,28
18,03	2,55
23,46	2,87
24,71	2,84

Tabla 6. Ensayo de la placa de adaptación de la Sonda Hall versión 1

Una vez fabricadas el resto de las placas, se procedió a realizar exactamente el mismo ensayo, obteniendo los siguientes resultados, prácticamente idénticos a la placa ensayada con anterioridad.

Hall (mA)	I_1 (V)
-24,97	0,02
-20,3	0,28
-17,24	0,48
-13,2	0,73
-5,24	1,19
-1,25	1,41
0	1,48
2,3	1,63
5	1,78
9	2,01
18,05	2,55
24,8	2,95

Tabla 7. Ensayo de la placa de adaptación de la Sonda Hall versión 2

Se concluye que la adaptación se ha realizado con éxito.

4.1.2 Placa de adaptación de tensión

Esta placa de adaptación tiene como objetivo medir una tensión en tiempo real, así como generar el error por sobretensión.

Esta placa ha sido diseñada por Sebastián Castillo Valenzuela y se ha realizado una adaptación para adecuarla a las necesidades de nuestro sistema. La argumentación de la elección de los componentes se puede encontrar en su proyecto final de carrera.

4.1.2.1 Diseño de la Placa de Circuito Impreso

Esta adaptación ha consistido en reutilizar los esquemáticos de la placa que se utiliza en Málaga, pero acondicionada únicamente para medir una tensión. La decisión se tomó ante la imposibilidad de poder realizar en el laboratorio una placa con tales dimensiones y tal cantidad de componentes, ya que el espaciado entre las pistas y de los pads era mínimo que, como en su caso y no el nuestro, eran de un tamaño ideal para enviar a fabricar a una empresa. Es por ello por lo que los componentes se han distribuido de una manera totalmente distinta, se han aumentado el tamaño de las pistas y se

ha ruteado siguiendo las mismas reglas que se mencionaron en la placa de adaptación de la sonda hall.

Las dimensiones de la placa de circuito impreso no se han variado (77,85 x 74,93 mm), ya que es el tamaño acorde con el espacio disponible para esta placa según el diseño de la placa base, y tiene un espesor de 1,5 mm.

Aunque es cierto que la placa es de doble capa, al no estar los pads estañados estos no actuarán todos como vías por defecto. Todos los componentes serán soldados por una cara, pero sí que se procederá a estañar manualmente algunos pads para que puedan ser ruteados por ambas caras de la PCB.

En este caso se ha construido un polígono en ambas caras sin conectarlo a ninguna alimentación ni tierra, únicamente para que al revelarla no hubiera tanto cobre que atacar.

Hay disponibles diversos agujeros para anclar de manera óptima la placa al armario.

En el Anexo C.2 se muestra el resultado final de la placa de circuito impreso, tanto la vista superior como la inferior de la misma.

4.1.2.2 Componentes de la placa

En la *Tabla 8* aparecen los componentes necesarios para realizar la placa de adaptación.

Componente	Descripción	Cantidad	Valor	Referencia Componente	Precio
AMC1100		1		AMC1100DUBR	4,00 €
INA217		1		INA217AIP	6,00 €
Cap	Capacitor	3	100n	B32922C3104K189	0,48 €
Cap	Capacitor	1		B32922C3104K189	0,16 €
Cap Pol1	Polarized Capacitor (Radial)	1	10uF	UPW1C100MDD1TD	0,10 €
	Capacitor	1	100n	B32922C3104K189	0,16 €
	Polarized Capacitor (Radial)	4	10uF	UPW1C100MDD1TD	0,40 €
	Capacitor	1	100nF	B32922C3104K189	0,16 €
	Capacitor	1	22n	B32922C3104K189	0,16 €
Diode 1N4001	1 Amp General Purpose Rectifier	8		1N4001-T	1,04 €
Header 10X2H	Header, 10-Pin, Dual row, Right Angle	2		IPS1-110-01-L-D-RA	8,00 €
	Resistor	4		BL01RN1A1D2B	1,00 €
Res1	Resistor	1	470	MCRE000069	0,03 €
	Resistor	1	2K2	MCF 0.25W 2K2	0,03 €
Res1	Resistor	1	11K	MCF 0.25W 11k	0,03 €
Res1	Resistor	2	4K7	MCF 0.25W 4k7	0,06 €
Res1	Resistor	1	3K9	MCF 0.25W 3k9	0,03 €
Res1	Resistor	1	15K	MCF 0.25W 15k	0,03 €
Res1	Resistor	3	1K	MCF 0.25W 1k	0,09 €
Res1	Resistor	2	0	MCF 0.25W 0	0,06 €
Res1	Resistor	1	100	MCF 0.25W 100	0,03 €
Res1	Resistor	5	100K	MCF 0.25W 100k	0,15 €
	Resistor	1	10K	MCF 0.25W 10k	0,03 €
Res1	Resistor	2	10K	MCF 0.25W 10k	0,06 €
lm4040	5V shunt reference	2		LM4040DIZ-5.0/NOPB	0,70 €
Res1	Resistor	1	5K	MCF 0.25W 5k	0,03 €
Res1	Resistor	1	20K	MCF 0.25W 20k	0,03 €
Res1	Resistor	1	40K	MCF 0.25W 40k	0,03 €
SW-DIP4	DIP Switch	1		MCNDI-04S	0,36 €
SW DIP-2	DIP Switch, 2 Position, SPST	1		MCNDI-02S	0,92 €
MURATA 78615/3		1		78615/2C	1,35 €
LM358		2		LM358P	0,70 €
SN6501		1		SN6501QDBVRQ1	1,60 €
MB05S		1		MB05S	1,60 €
Header 2	Header, 2-Pin	1		MCTB-61C02	0,50 €

Tabla 8. Componentes placa de adaptación tensión

El precio total para la fabricación de esta placa asciende a 30,11€.

4.1.2.3 Montaje de la placa

Para el montaje de esta PCB se siguieron los mismos pasos que para el periférico anterior. En la *Figura 35* y *Figura 36* se muestra el resultado final de las placas.

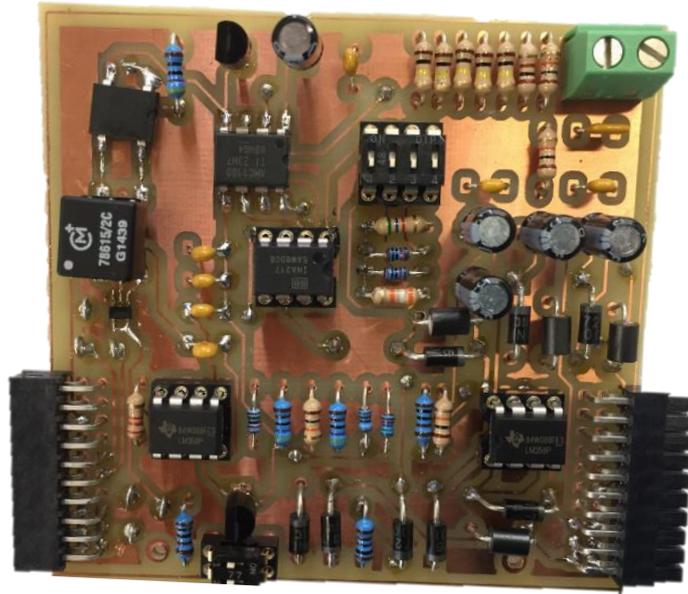


Figura 35. Vista superior placa adaptación tensión

Fuente: Elaboración propia

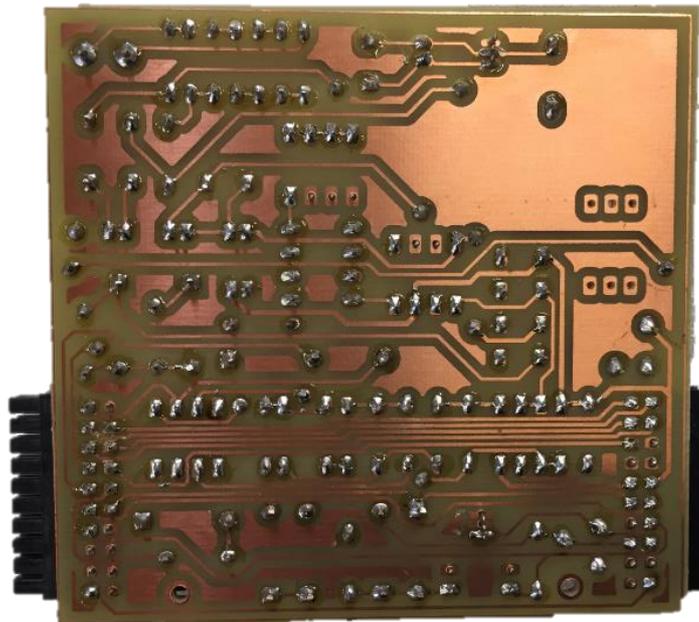


Figura 36. Vista inferior placa adaptación tensión

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Placa de gestión de los contactores

La finalidad de esta placa es actuar sobre los contactores y apartar el armario eléctrico donde va instalado el convertidor, de manera que sea posible la operación del mismo de forma automática a través del DSP, así como establecer protocolos de arranque y parada automáticos que garanticen la seguridad de los equipos y personas que los operan.

No se entrará en detalle en el funcionamiento de esta placa porque no se ha diseñado en el presente proyecto ni tampoco se le ha hecho ninguna modificación, ha sido realizada por Sebastián Castillo Valenzuela y montada por Mario Bermúdez Guzmán y toda la información respecto a ella se puede ver detallada en sus PFC.

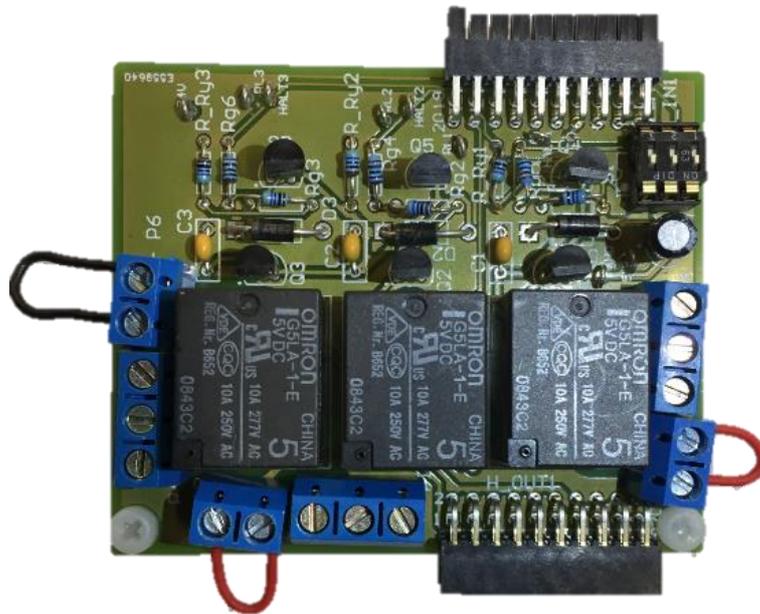


Figura 37. Vista superior.

Fuente: Elaboración propia

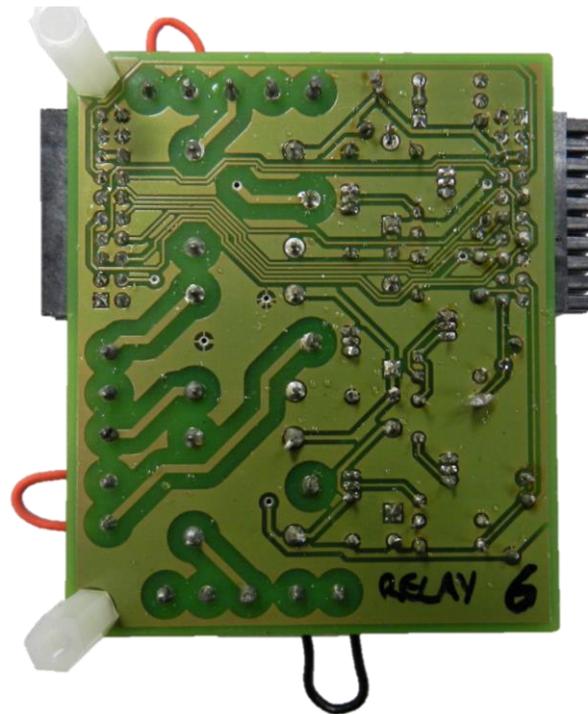


Figura 38. Vista inferior placa adaptación relés

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Placa de adaptación del Convertidor

El objetivo de esta placa es hacer de interfaz entre los drivers del convertidor y el microprocesador DSP. Concretamente, las señales que se adaptarán serán las procedentes del convertidor, que serán tratadas como señales de error que genera el driver. Además, también adaptará las señales de control, que serán las de disparo de los IGBTs.

Como el DSP trabaja en valores 0/3,3V las señales procedentes del convertidor (con lógica 0/15V) serán adaptadas a esta tensión de entrada, y viceversa. Todas las señales que procesa esta placa son digitales.

La placa base está preparada para recibir 12 señales PWM por el conector H_PWM. No será necesario hacer uso del máximo número de señales pues se hallarán las complementarias de las señales de disparo para realizar la conmutación de los IGBT por parejas.

En referencia al esquemático que presenta la placa, no se ha realizado ninguna modificación respecto al realizado por Sebastián Castillo Valenzuela y Manuel Gómez del Río, por lo que no se ve necesaria una revisión de cada uno de los circuitos que presenta la placa de circuito impreso ya que se puede encontrar en sus PFC. Sin embargo, cabe destacar los siguientes aspectos importantes:

- Las señales de error son señales digitales de salida de los drivers del convertidor con lógica 0/15 V. Toman valor 15 V cuando el funcionamiento es normal y 0 V cuando existe un error, por lo que al DSP le entra una señal digital de 0 V cuando el convertidor presente error y 3,3 V cuando no lo haga. Este error se verá reflejado en la activación de un LED que habrá situado

en la placa con el fin de que se detecte visualmente un funcionamiento incorrecto.

- Las señales de paro y reset permiten parar todos los disparos de los drivers, de manera que ninguno de los IGBTs quede activo. Estas señales son de tipo activo alto, es decir, se realizará la parada cuando a los pines correspondientes del driver le lleguen 15 V.
- Las señales que son enviadas desde el DSP permiten disparar parejas de IGBTs que son gestionadas por cada driver. Cada señal controla el IGBT top y se genera su complementario a través de un inversor lógico que maneja el IGBT bottom. De esta manera siempre habrá al menos uno de los IGBT de cada pareja activado.

4.1.4.1 Diseño de la Placa de Circuito Impreso

En este proyecto se han reutilizado los esquemáticos de este módulo, pero a la hora del diseño se han realizado una serie de cambios en la PCB con el software *Altium Designer*. La decisión ha sido tomada a raíz de que las placas para este proyecto se han fabricado en el laboratorio de la Universidad de Sevilla y no ha sido una empresa la que se ha encargado de esta fase, por lo que se ha intentado, sobre todo, eliminar los problemas que pudieran surgir en la fabricación de las mismas incluso antes de llevar esta a cabo.

Las dimensiones de la placa de circuito impreso no se han variado (75,00 x 125,00 mm), ya que es el tamaño acorde con el espacio disponible para esta placa según el diseño de la placa base, y tiene un espesor de 1,5 mm.

Aunque es cierto que la placa es de doble capa, al no estar los pads estañados estos no actuarán todos como vías por defecto. Todos los componentes serán soldados por una cara, pero sí que se procederá a estañar manualmente algunos pads para que puedan ser ruteados por ambas caras de la PCB.

Cabe destacar que en ambas caras hay construidos polígonos que están conectados a la tierra digital (capa superior) y a la tierra de potencia (capa inferior).

Hay disponibles diversos agujeros para anclar de manera óptima la placa al armario.

Para realizar los cambios en el ruteado se han establecido las mismas reglas que se siguieron para el ruteado de la placa de adaptación de la sonda hall.

En el *Anexo C.3* se muestra el resultado final de la placa de circuito impreso, tanto la vista superior como la inferior de la misma.

4.1.4.2 Componentes de la placa

En la *Tabla 9* aparecen los componentes necesarios para realizar la placa de adaptación. Hay que tener en cuenta que ha sido necesario realizar 4 placas idénticas por lo que la cantidad de componentes finales fueron los que aparecen en la columna *cantidad* multiplicados por 4.

Componente	Descripción	Cantidad	Valor	Referencia Componente	Precio
Cap	Capacitor	4	100nF	MARR50104X7RK0100	1,96 €
Cap Pol1	Polarized Capacitor (Radial)	1	10uF	EEUFR1C101	0,17 €
Cap Semi	Capacitor (Semiconductor SIM Model)	1	100nF	MARR50104X7RK0100	0,49 €
Diode 1N5817	High Conductance Fast Diode	9		1N5817	2,43 €
LED0	Typical INFRARED GaAs LED	3		L4RR5000E1	0,48 €
Diode 1N4148	High Conductance Fast Diode	1		1N4148TR	0,06 €
ULN2003A		1		ULN2003A	0,45 €
7404N		1		SN7404N	1,48 €
Header 5X2	Header, 5-Pin, Dual row	1		HTSS-105-04-L-D-RA	3,67 €
Header 7X2	Header, 7-Pin, Dual row	1		HTSS-107-04-L-D-RA	3,67 €
Header 15X2H	Header, 15-Pin, Dual row, Right Angle	2		IPT1-115-01-S-D-RA	10,20 €
Inductor	Inductor	1	30mH	BL01RN1A1D2B	0,22 €
Res1	Resistor	19	1K	MCF 0.25W 1k	0,57 €
Res1	Resistor	4	470	MCF 0.25W 470	0,12 €
Res1	Resistor	3	120	MCF 0.25W 120	0,09 €
Res1	Resistor	3	4K7	MCF 0.25W 4k7	0,09 €
SW DIP-2	DIP Switch, 2 Position, SPST	1		MCNDI-02S	0,92 €
SW-DIP4	DIP Switch	1		MCNDI-04S	0,36 €
Plug	Plug	5		TEST-1(GR) / TEST-12	0,50 €
6N137	Optocoupler	4		6N137A	4,00 €
4N25	Optoisolator	3		4N25-000E	1,05 €

Tabla 9. Componentes de la placa de adaptación del convertidor

El precio final para la fabricación de 1 placa es de 32,98€, por lo que el importe para la fabricación de las placas de adaptación del convertidor para controlar una máquina de 12 fases sería de 131,92€.

4.1.4.3 Montaje de la placa

Para el montaje de la placa se han seguido los mismos pasos que con el resto de los periféricos.

En la *Figura 39* y *Figura 40* se muestra el resultado final de las placas.

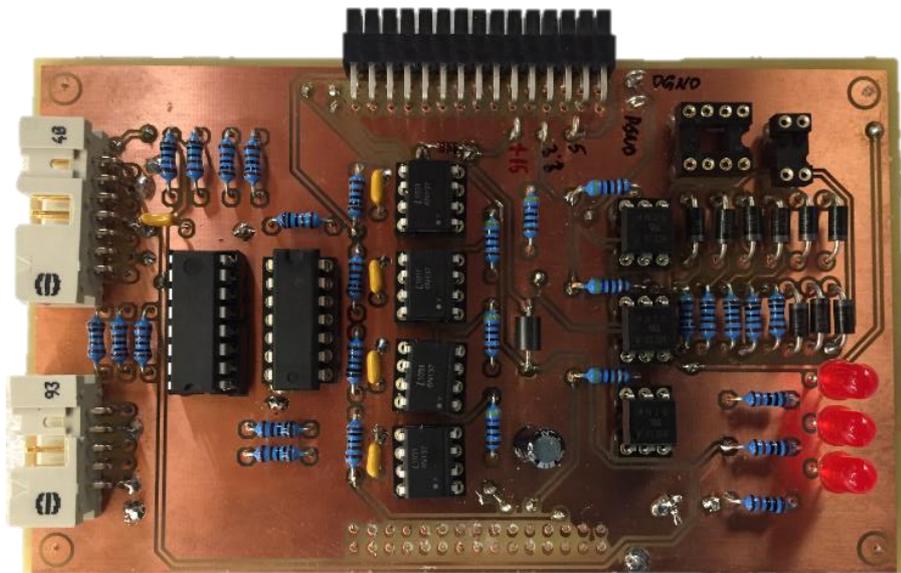


Figura 39. Vista superior placa adaptación del convertidor

Fuente: Elaboración propia

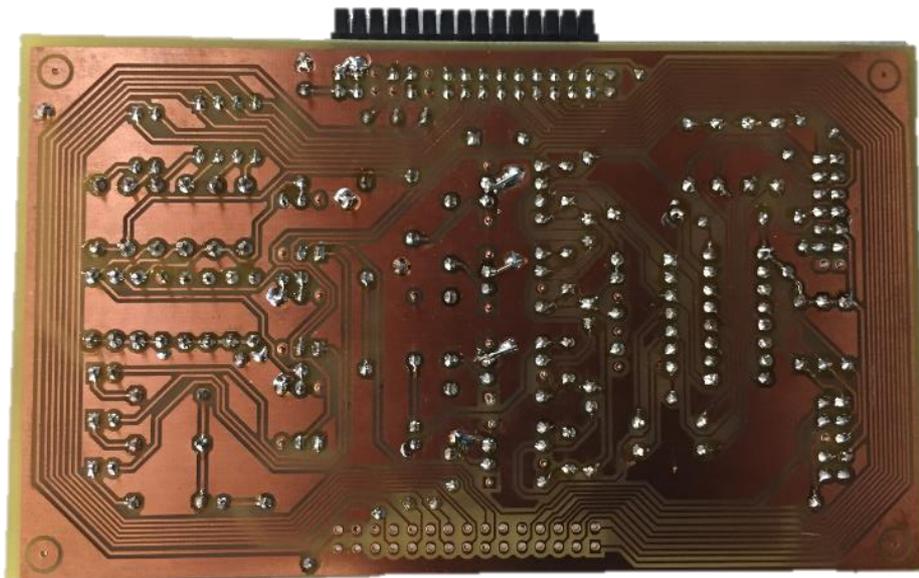


Figura 40. Vista inferior placa adaptación del convertidor

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.4 Ensayo de la placa

Como se ha dispuesto de una placa de adaptación del convertidor facilitada por la Universidad de Málaga se han podido realizar ensayos en esta placa antes de proceder a la fabricación del resto.

En este apartado solo se explicará lo necesario para entender el ensayo que se ha realizado, como ya se ha dicho, el detalle exhaustivo de los esquemáticos se encuentra en otros PFC.

El primer paso fue comprobar el correcto funcionamiento de los circuitos integrados aislando estos mismos de la placa de circuito impreso y probándolos en una protoboard. Tras esto se procedió a hacer los ensayos en la placa de la manera que se detalla a continuación.

Fueron necesarias 3 fuentes de alimentación independientes que ofrecieran +3,3V, +5V y +15V, un osciloscopio y un generador de señales que simulara la señal procedente del convertidor.

Es necesario conocer los puertos de conexión que han sido empleados en estos ensayos. En primer lugar, tenemos el puerto de conexión a la placa base y, por otro lado, el puerto de conexión al convertidor. En la Figuras 41 y 42 se resumen los pines del conector, aunque no todos ellos sean utilizados.

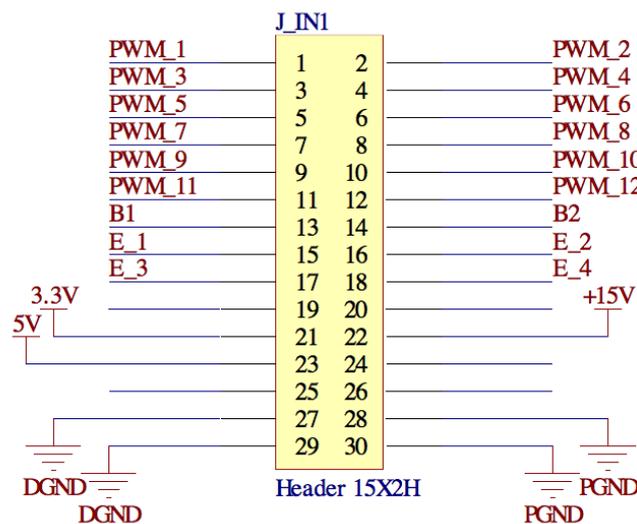


Figura 41. Pines del puerto de conexión: placa convertidor - placa base

Fuente: Elaboración propia

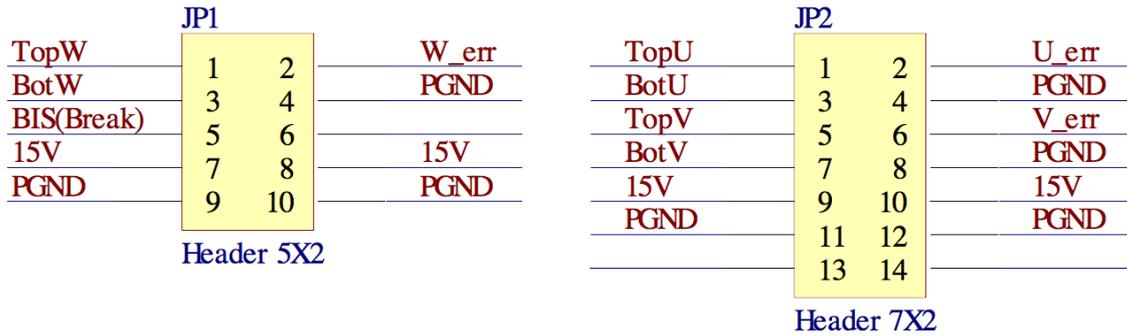


Figura 42. Pines del puerto de conexión: placa convertidor – convertidor

Fuente: Elaboración propia

La descripción de cada una de las variables aparece en las siguientes tablas:

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	IN/OUT
+15 V	Alimentación de +15 V	-
+5 V	Alimentación de +5 V	-
3,3 V	Alimentación de +3,3 V	-
B1	Señal de disparo break nº 1	Out
B2	Señal de disparo break nº 2	Out
DGND	Tierra digital	-
E_1	Señal de error nº 1	In
E_2	Señal de error nº 2	In
E_3	Señal de error nº 3	In
E_4	Señal de error nº 4	In
PGND	Tierra de potencia	-
PWM_1	Señal de disparo PWM nº 1	Out
PWM_2	Señal de disparo PWM nº 2	Out
PWM_3	Señal de disparo PWM nº 3	Out
PWM_4	Señal de disparo PWM nº 4	Out
PWM_5	Señal de disparo PWM nº 5	Out
PWM_6	Señal de disparo PWM nº 6	Out
PWM_7	Señal de disparo PWM nº 7	Out
PWM_8	Señal de disparo PWM nº 8	Out
PWM_9	Señal de disparo PWM nº 9	Out
PWM_10	Señal de disparo PWM nº 10	Out
PWM_11	Señal de disparo PWM nº 11	Out
PWM_12	Señal de disparo PWM nº 12	Out

Tabla 10. Variables placa convertidor - placa base.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	IN/OUT
+15 V	Alimentación de +15 V filtrada	-
BIS (Break)	Señal de disparo break	In
BotU	Señal de disparo PWM BotU	In
BotV	Señal de disparo PWM BotV	In
BotW	Señal de disparo PWM BotW	In
PGND	Tierra de potencia	-
TopU	Señal de disparo PWM TopU	In
TopV	Señal de disparo PWM TopV	In
TopW	Señal de disparo PWM TopW	In
U_err	Error driver fase U	Out
V_err	Error driver fase V	Out
W_err	Error driver fase W	Out

Tabla 11. Variables placa convertidor – convertidor.

En la *Figura 43* se muestra un esquema del conexionado que se llevó a cabo para el ensayo de esta placa.

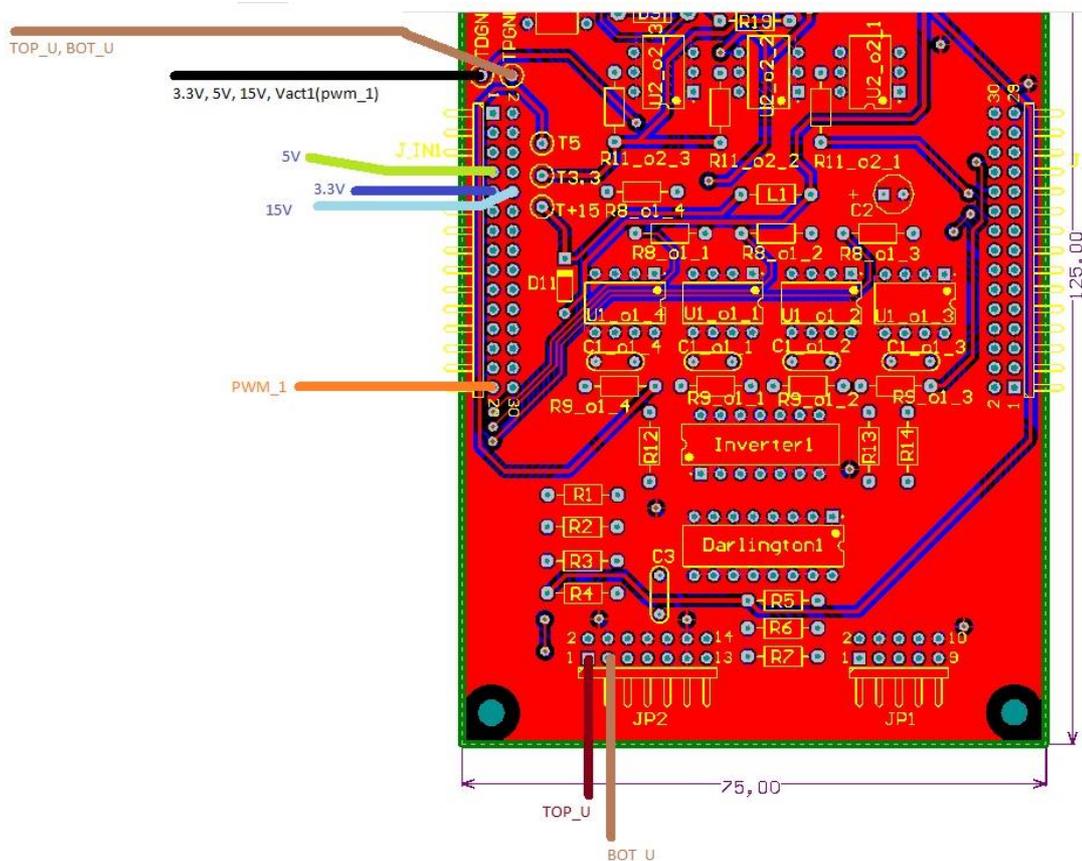


Figura 43. Montaje para ensayo en el laboratorio.

Fuente: Elaboración propia

Este módulo tiene dos partes bien diferenciadas, la primera trata de la adaptación de las señales de error mientras que, la segunda, de la adaptación de las señales de disparo de los IGBTs.

En primer lugar, hablaremos del ensayo de la adaptación de las señales de error. Cuando no hay error el convertidor toma el valor de 15 V, que, tras ser la señal adaptada a 3,3 V, pasa por el optoacoplador modelo 4N25, el cual posibilita el desacoplamiento eléctrico entre el convertidor y la placa base. El diodo mencionado del optoacoplador emite una luz, lo que satura el fototransistor del optoacoplador. Al cátodo del diodo del 4N25 se conecta la señal de error proveniente del convertidor, mientras que al ánodo se conecta, mediante una resistencia de 120 Ω , a 15 V. Sin embargo, cuando el convertidor toma el valor de 0V, el diodo led que está conectado en serie al 4N25 se enciende, indicando que hay error.

Por otro lado, tenemos el caso de adaptar las señales de disparo de los IGBTs. Para este ensayo siguiendo el esquema de conexiones de la *Figura 43*, se introduce por PWM_1 una señal cuadrada de 10 kHz comprendida entre 0/3,3 V y tanto los pines Top_U como Bot_U son las salidas conectadas al osciloscopio, que simulan las señales que le entran al convertidor y deben estar en lógica 0/15 V.

Tras cada CI han ido comprobando las salidas para corroborar que la adaptación está siendo la adecuada.

El OPA277 genera una señal de referencia de +1,5 V a partir de los +3,3 V con los que se ha alimentado la placa, esta señal pasa al OPA2277, al que le llega también las señales de la sonda hall, ya aquí, en el rango de 0/3,3 V. Esto se ha conseguido en los siguientes pasos:

1. Las señales de disparo provenientes de la placa base con lógica 0/3,3 V pasan por el optoacoplador 6N137, que actúa como desacople eléctrico, obteniéndose a la salida las señales de disparo con lógica 0/5 V.
2. Tras esto, se obtienen las señales complementarias de las 3 señales de disparo PWM. Esta etapa se realiza en el inversor modelo 7404N.
3. Por último, se eleva la lógica de las señales de disparo de 0/5 V a 0/15 V. Además, las señales están invertidas ya que en el primer paso fueron invertidas en el optoacoplador. Esta etapa se consigue en el integrado ULN2003A.

En la *Tabla 12* se resumen los resultados del ensayo.

Señal Entrada	Valor entrada (V)	Señal Salida	Valor Salida (V)
PWM_1	0	TopU	0,68
		BotU	15,03
	3,3	TopU	15,02
		BotU	0,68
PWM_2	0	TopU	0,68
		BotU	15,02
	3,3	TopU	15,02
		BotU	0,68
PWM_3	0	TopU	0,69
		BotU	15,03
	3,3	TopU	15,03
		BotU	0,69
U_err	0	E_1	0,33
		E_4	0,56
	15	E_1	3,3
		E_4	3,3
V_err	0	E_2	0,33
		E_4	0,56
	15	E_2	3,3
		E_4	3,3
W_err	0	E_3	0,33
		E_4	0,56
	15	E_3	3,3
		E_4	3,3

Tabla 12. Ensayo de la placa de adaptación del convertidor

Una vez fabricadas el resto de las placas, se procedió a realizar exactamente el mismo ensayo, obteniendo idénticos resultados.

Se concluye que la adaptación en este caso también ha sido realizada de manera exitosa.

4.1.5 Placa de adaptación del Encoder

Esta placa de adaptación se encarga de realizar la adaptación de la señal de salida del encoder para introducirla en la placa base.

El encoder cuenta con tres salidas de señales de onda cuadrada, que son, los canales A, B e I. Con los dos primeros canales se obtiene la velocidad angular y el sentido de giro de la máquina, con el canal I es posible obtener la posición angular. Según se vio en el apartado 2.1, la onda cuadrada tendrá como nivel alto un valor de 2,5V y el nivel bajo será de -0,5V.

Como con el resto de las placas de adaptación, el objetivo es convertir esta señal en una de rango 0/3,3V para ser introducida en la placa.

4.1.5.1 Diseño de la Placa de Circuito Impreso

En este proyecto se han reutilizado los esquemáticos de este módulo, pero a la hora del diseño se han realizado una serie de cambios en la PCB con el software *Altium Designer*. La decisión ha sido tomada a raíz de que las placas para este proyecto se han fabricado en el laboratorio de la Universidad de Sevilla y no ha sido una empresa la que se ha encargado de esta fase, por lo que se ha intentado, sobre todo, eliminar los problemas que pudieran surgir en la fabricación de las mismas incluso antes de llevar esta a cabo.

Las dimensiones de la placa de circuito impreso no se han variado (63,42 x 140,00 mm), ya que es el tamaño acorde con el espacio disponible para esta placa según el diseño de la placa base, y tiene un espesor de 1,5 mm.

Aunque es cierto que la placa es de doble capa, al no estar los pads estañados estos no actuarán todos como vías por defecto. Todos los componentes serán soldados por una cara, pero sí que se procederá a estañar manualmente algunos pads para que puedan ser ruteados por ambas caras de la PCB.

Cabe destacar que en ambas caras hay construidos polígonos que están conectados a la tierra digital (capa superior) y a la tierra de potencia (capa inferior).

Hay disponibles diversos agujeros para anclar de manera óptima la placa al armario.

Para realizar los cambios en el ruteado se han establecido las mismas reglas que se siguieron para el ruteado de la placa de adaptación de la sonda hall.

En el *Anexo C.4* se muestra el resultado final de la placa de circuito impreso, tanto la vista superior como la inferior de la misma.

4.1.5.2 Componentes de la placa

En la *Tabla 13* aparecen los componentes necesarios para realizar la placa de adaptación. Hay que tener en cuenta que ha sido necesario realizar 4 placas idénticas por lo que la cantidad de componentes finales fueron los que aparecen en la columna *cantidad* multiplicados por 4.

Componente	Descripción	Cantidad	Valor	Precio	Referencia Componente
Cap	Capacitor	3	100nF	1,50 €	B32922C3104K189
Cap Semi	Capacitor (Semiconductor SIM Model)	1	100nF	0,50 €	B32922C3104K189
Cap Pol1	Polarized Capacitor (Radial)	1	100uF	0,25 €	UPW1C100MDD1TD
Diode 1N5817	High Conductance Fast Diode	6		2,10 €	1N5817
Header 2	Header, 2-Pin	6		3,00 €	MCTB-61C02
Header 10X2H	Header, 10-Pin, Dual row, Right Angle	2		8,00 €	
Res1	Resistor	3	470	0,09 €	MCF 0.25W 470
Res1	Resistor	3	1K	0,09 €	MCF 0.25W 1k
	Resistor	4	2K	0,12 €	MCF 0.25W 2k
Res3	Resistor	3	4K7	0,09 €	MCF 0.25W 4k7
Plug	Plug	7		0,70 €	TEST-1(GR) / TEST-12
6N137	Optocoupler	3		3,00 €	6N137A
LM358	Reg	2		0,80 €	LM358NG

Tabla 13. Componentes de la placa de adaptación del encoder

El precio total de la adquisición de estos componentes es de 20,24€.

4.1.5.3 Montaje de la placa

El montaje de la palca es el que ya se vio en el apartado 4.1.2.3 y se puede observar el resultado final en las Figuras 44 y 45.



Figura 44. Vista superior placa de adaptación del Encoder

Fuente: Elaboración propia

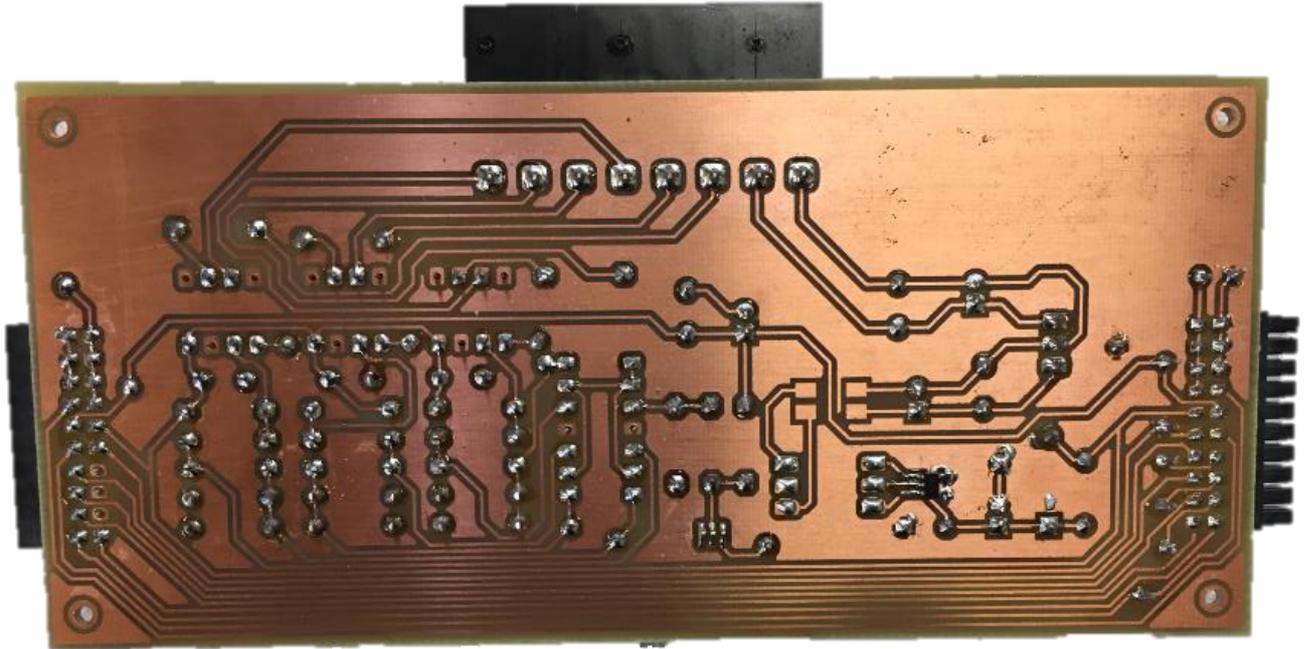


Figura 45. Vista inferior placa de adaptación del Encoder

Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Placa de adaptación DIMM180-DIMM100

Esta placa es la encargada de integrar el nuevo DSP, el modelo TMS320F28379, al sistema completo que se ha expuesto en los apartados anteriores. Como se comentó, se reutilizará la placa madre facilitada por la Universidad de Málaga y la Control Card que, a través de un Euroconector de 96 pins, conectaba el DSP TMS320F28335 (DIMM100) a la Motherboard.

El objetivo de esta placa de adaptación es, por tanto, recibir las señales procedentes de la placa base, a través de los pines del conector Eurocard y asignarlas a los pines del conector que aloja la tarjeta DIMM180, creando así una correspondencia entre ellos. Este conector está presente en la control Card Docking Station [R4.1] que se ha visto anteriormente.

Para la asignación de los pines es necesario conocer la correspondencia de los pines de ambos conectores, para ello se ha diseñado en el software *Altium Designer* los componentes que aparecen en la *Figura 46 y 47*.

curocard 180				
	1	GPIO 71**	GPIO-41	91
	2	GPIO 70**	GPIO-45	92
	3	TMS	GPIO-42***	93
	4	TRSTn	GPIO-46***	94
	5	TCK	GPIO-43***	95
	6	TDO	GPIO-47***	96
DGND	7	GND	GND	97
	8	TDI	5V0	98
I1	9	ADC-A0, DAC	GPIO-48	99
DGND	10	GND	GPIO-54	100
I3	11	ADC-A1, DAC	GPIO-49	101
AGND	12	ADGB0	GPIO-55	102
	13	AGND	GPIO-50	103
I5	14	ADC-B1	GPIO-56	104
AGND	15	ADC-A2, COMP+	GPIO-51	105
	16	AGND	GPIO-58	106
	17	ADC-A3	GPIO-52	107
AGND	18	ADC-B2, COM+	GPIO-58	108
	19	AGND	GPIO-53	109
	20	ADC-B3	GPIO-59	110
AGND	21	ADGA4, COMP+	GND	111
	22	AGND	5V0	112
	23	ADC-A5	Rsv	113
	24	ADC-B4	Rsv	114
	25	ADCIN14, COMP+	Rsv	115
	26	ADC-B5	Rsv	116
	27	ADCIN15	Rsv	117
AGND	28	ADC-D0, COMP+	rSV	118
	29	AGND	Rsv	119
	30	ADGD1	XRSn	120
	31	ADC-C2, COMP+	GPIO-35	121
	32	Rsv	GPIO-36	122
	33	ADC-C3	GPIO-37	123
AGND	34	ADC-D2-COMP+	GPIO-38	124
	35	AGND	GPIO-60	125
	36	ADC-D3	GPIO-61	126
AGND	37	ADC-C4,COMP+	GPIO-62	127
	38	AGND	GPIO-63	128
	39	ADC-C5	GPIO-64	129
	40	ADC-D4	GPIO-65	130
	41	Rsv	GPIO-66	131
	42	ADC-D5	GPIO-67	132
	43	VREFLO	GPIO-68	133
DGND	44	Rsv	GPIO-69	134
	45	All VREFHts*	GND	135
	46	GND	Rsv	136
	47	GND	GPIO-70	137
	48	5V0	GPIO-71	138
	49	GPIO-00	GPIO-72	139
	50	GPIO-04	GPIO-73	140
	51	GPIO-01	GPIO-74	141
	52	GPIO-05	GPIO-75	142
	53	GPIO-02	GPIO-76	143
	54	GPIO-06	GPIO-77	144
	55	GPIO-03	GPIO-78	145
	56	GPIO-07	GPIO-79	146
	57	GPIO-08	GPIO-80	147
	58	GPIO-12	GPIO-81	148
	59	GPIO-09	GPIO-82	149
	60	GPIO-13	GPIO-83	150
	61	GPIO-10	GPIO-84	151
	62	GPIO-14	GPIO-85	152
	63	GPIO-11	GPIO-86	153
DGND	64	GPIO-15	GPIO-87	154
	65	GND	GPIO-88	155
	66	Rsv	GPIO-89	156
	67	GPIO-16	GND	157
	68	GPIO-20	5V0	158
	69	GPIO-17	GPIO-90	159
	70	GPIO-21	GPIO-91	160
	71	GPIO-18	GPIO-92	161
	72	GPIO-22	GPIO-93	162
	73	GPIO-19	GPIO-94	163
	74	GPIO-23	GPIO-133	164
	75	GPIO-24	GPIO-120***	165
	76	GPIO-28	GPIO-121**	166
	77	GPIO-25	GPIO-161	167
	78	GPIO-29	GPIO-162	168
	79	GPIO-26	GPIO-163	169
	80	GPIO-30	GPIO-164	170
	81	GPIO-27	Rsv	171
DGND	82	GPIO-31	Rsv	172
	83	GND	Rsv	173
	84	5V0	Rsv	174
	85	GPIO-32	Rsv	175
	86	GPIO-34	Rsv	176
	87	GPIO-33	Rsv	177
	88	GPIO-39	GND	178
	89	GPIO-40	5V0	179
	90	GPIO-44	5V0	180

Figura 46. Componente DIMM180

Fuente: Elaboración propia

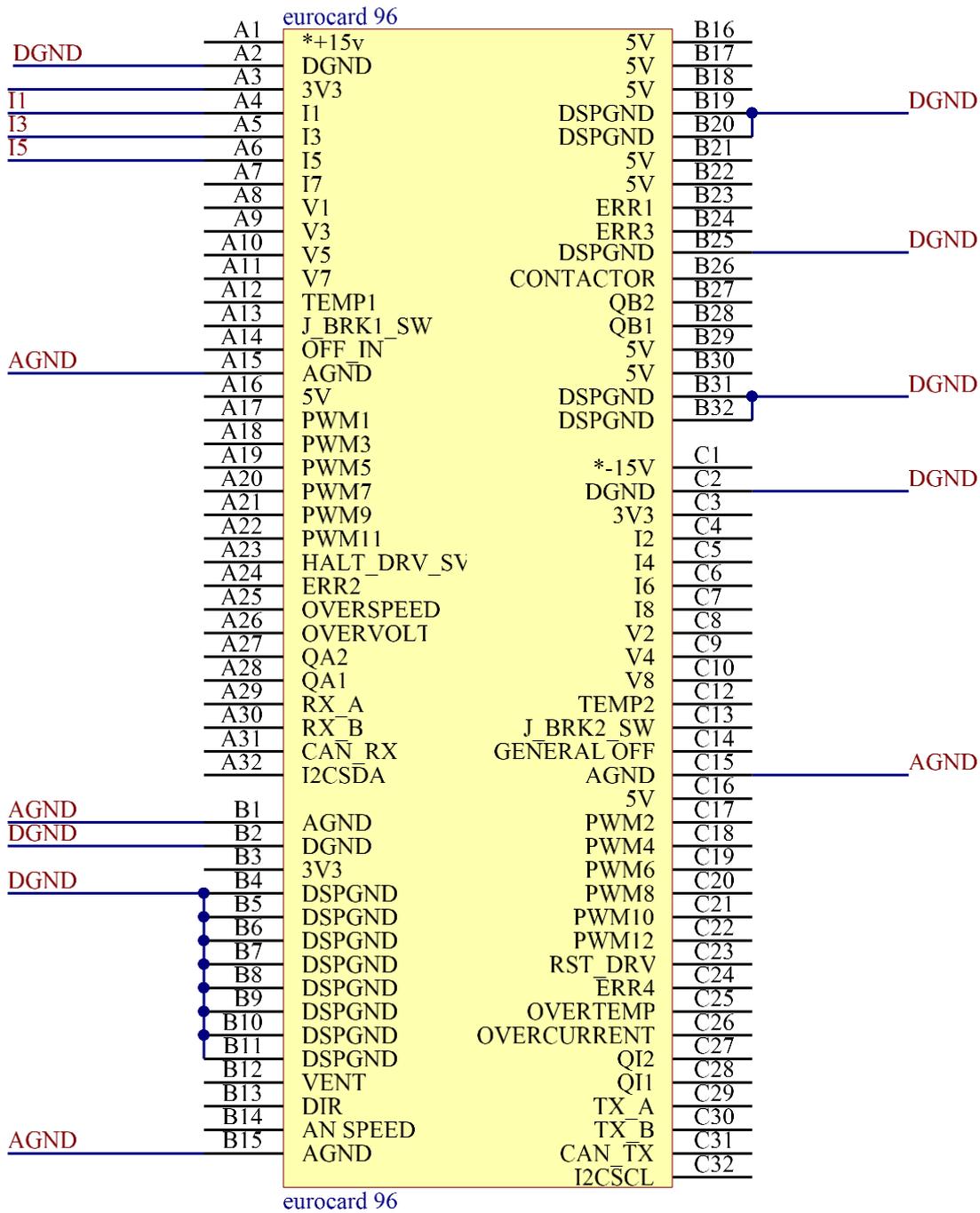


Figura 47. Componente DIMM100

Fuente: Elaboración propia

4.1.7 Conjunto Final de Placas

Una vez visto en detalle todos los módulos necesarios para el funcionamiento del sistema se proceden a realizar a modo de resumen la enumeración del número de periféricos necesarios que componen la adaptación de señales para el microcontrolador y serán instalados dentro del armario

eléctrico.

- Placa base.
- 4 placas de adaptación de la medida de corriente.
- 4 placas de adaptación del convertidor.
- Placa de adaptación del encoder.
- Placa de adaptación de tensión.
- Placa de adaptación de los contactores.
- Placa de adaptación de la tarjeta de control.

El conjunto final de las placas quedaría como se puede observar en las *Figuras 48 y 49* y se observa el buen acoplamiento entre las diferentes placas gracias a los headers y cómo, el esquema modular permite aumentar o disminuir el número de placas conectadas a la placa base según se requiera. Considerando todo este conjunto final se consigue controlar:

- Un DSP.
- Un encoder.
- 4 convertidores modelo SKS-22F, con sus sondas Hall correspondientes.
- Contactores de la aparamenta del armario eléctrico.

Es decir, se conseguirá controlar los 4 convertidores de potencia que pueden controlar una máquina multifásica de hasta 12 fases

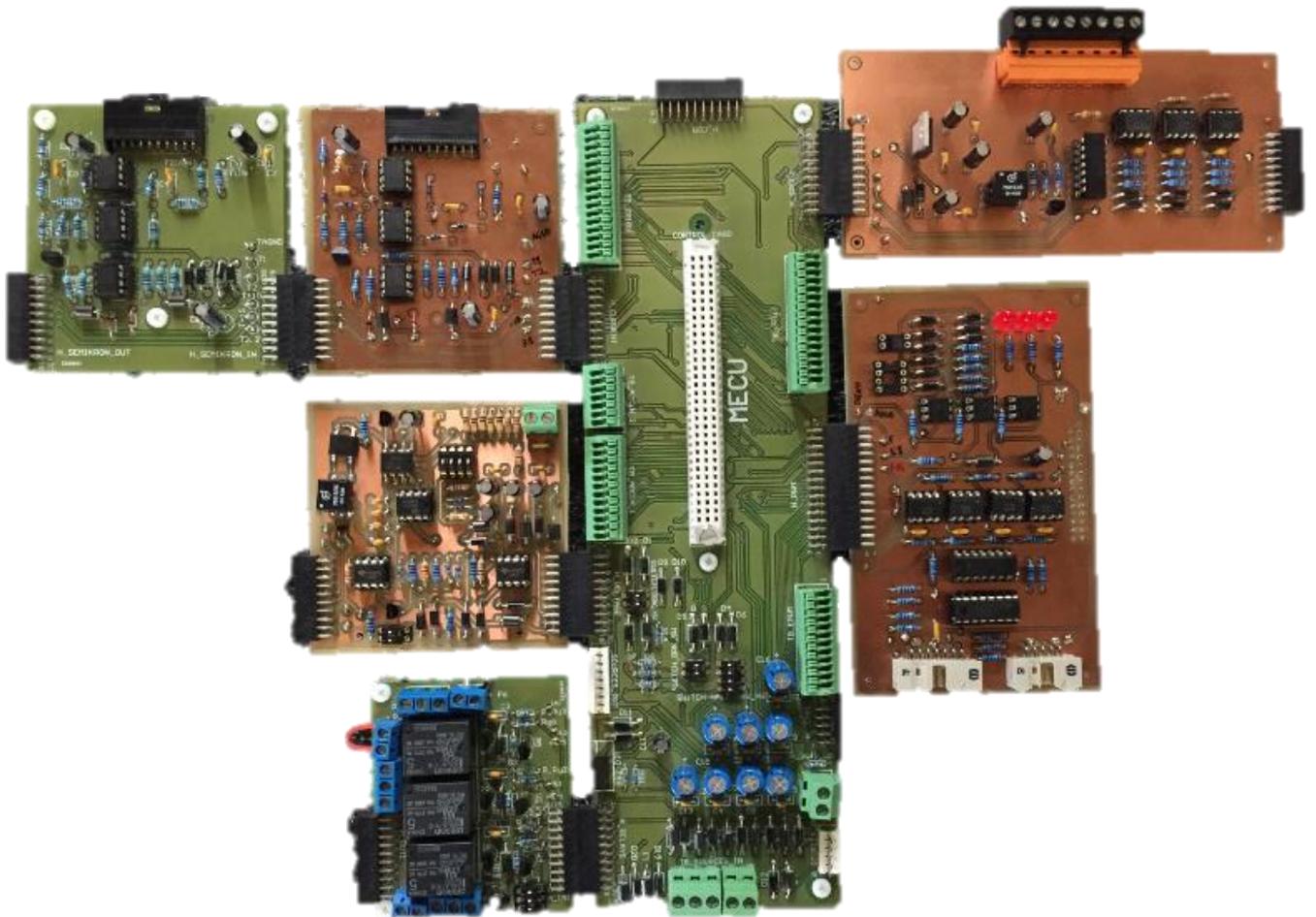


Figura 48. Vista superior conjunto de placas

Fuente: Elaboración propia

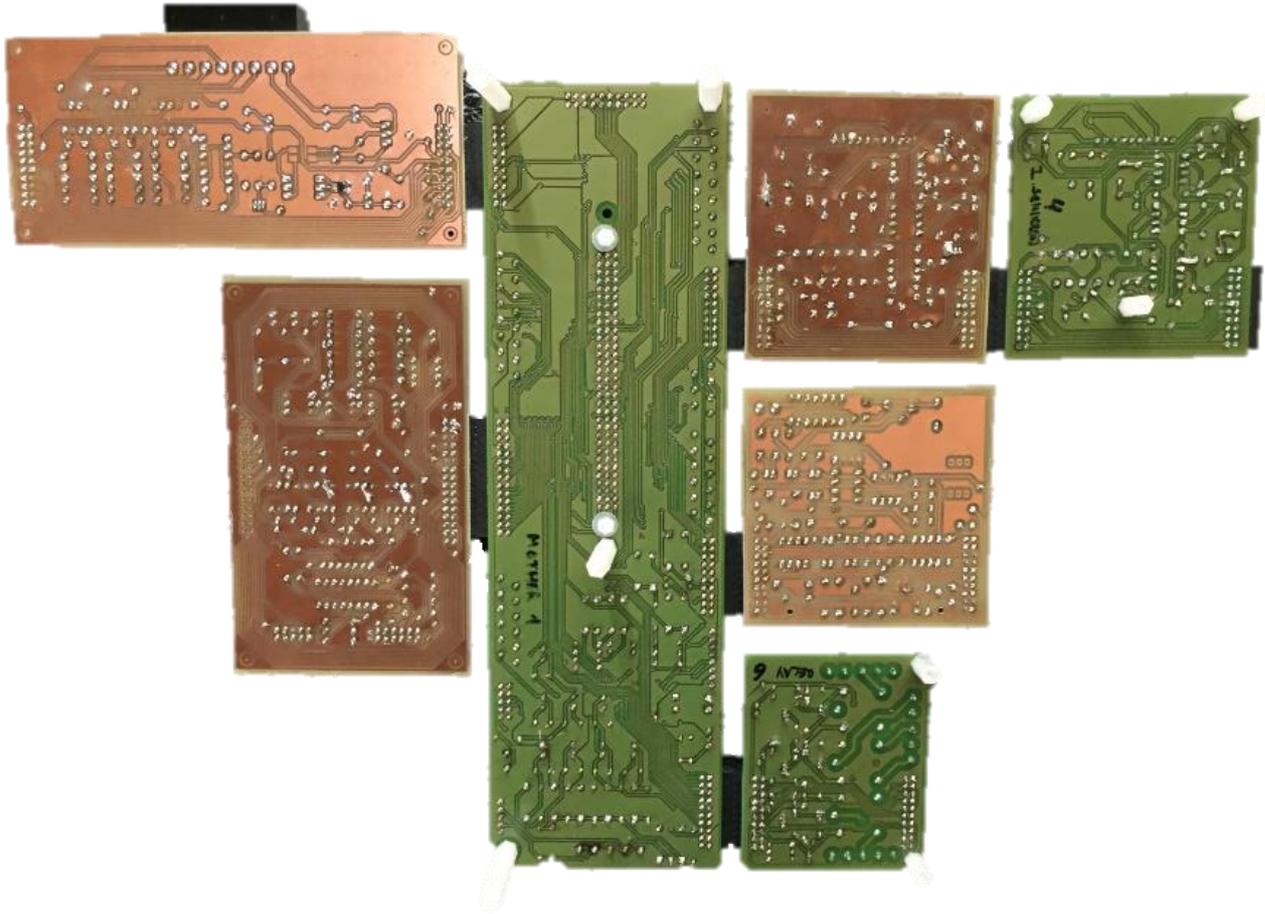


Figura 49. Vista inferior conjunto de placas

Fuente: Elaboración propia

4.2 Armario eléctrico

El armario eléctrico alberga los 4 convertidores y el sistema electrónico de control, así como los elementos de protección eléctrica, contactores y elementos auxiliares de conexión, que permitirán operar el sistema completo.

El armario estará compuesto por dos niveles, uno inferior y otro superior. En el nivel inferior estarán colocados los convertidores de tensión y todos los circuitos de potencia y de aparamenta necesarios para la operación del sistema además de las fuentes de alimentación. En el nivel superior irá el sistema electrónico de control. Este nivel irá en una placa metálica abatible de manera que lo que quede por debajo de la misma siga siendo accesible. Ambos niveles se aprecian en el esquema de la *Figura 50*.

También tendrá colocado los botones necesarios en la puerta para realizar el circuito de marcha paro, como en el resto de los armarios que se han explicado y, se ha instalado un final de carrera que

permitirá detectar cuando está la puerta del armario abierta para proceder a detenerlo en caso de que estuviera en marcha. En la *Figura 51* se aprecia el detalle de este componente. Sobre el armario irá colocado un indicador luminoso que emita destellos cuando este esté en marcha.

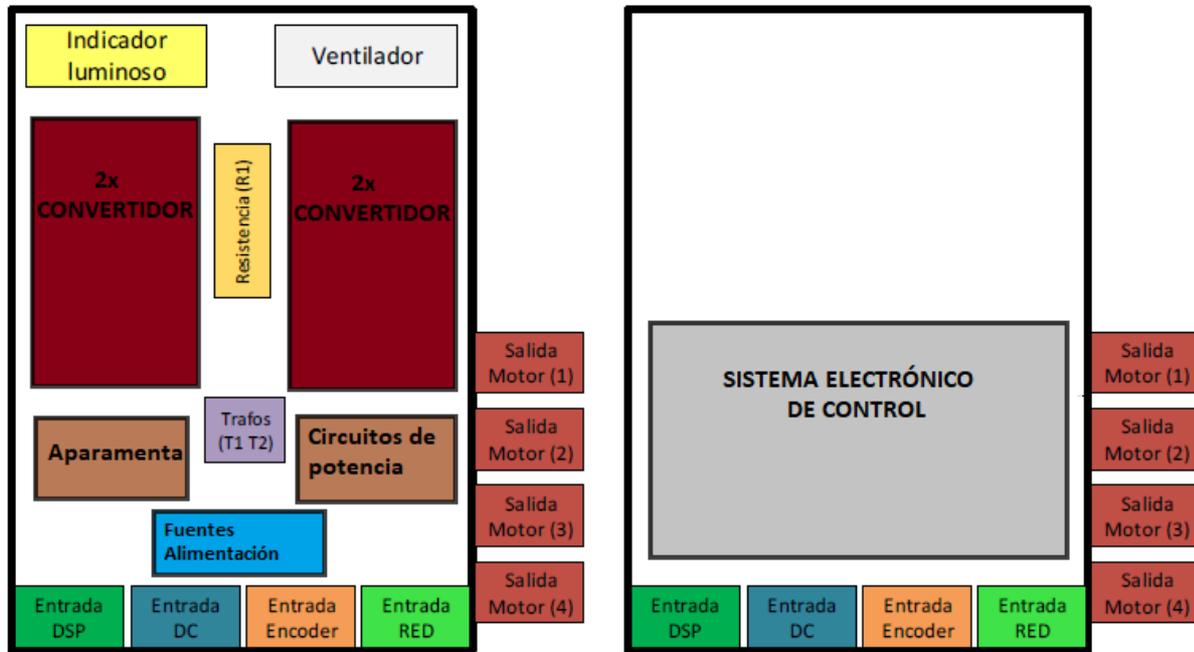


Figura 50. Esquema armario eléctrico. Nivel superior izquierda. Nivel inferior derecha

Fuente: Elaboración propia



Figura 51. Final de carrera

Fuente: Elaboración propia

Los conectores de entrada y salida que aparecen en el esquema del armario son los siguientes:

- Entrada DSP: consiste en una abertura en el inferior del armario para poder pasar el cable que conecta el ordenador con la placa de adaptación de la tarjeta de control.

- Entrada DC: conector hembra de 3 pines que permite la conexión, a través de una manguera, de la fuente de tensión continua con el armario, para alimentar el DC-link de cada convertidor.
- Entrada Encoder: consiste en una abertura en el inferior del armario para poder pasar el cable que procede del encoder hacia la placa de adaptación de la velocidad.
- Entrada Red: conector hembra de 5 polos que permite la conexión del armario con la red eléctrica, a través de una manguera. Con ello se alimenta tanto el circuito de potencia como el de aparamenta.
- Salida Motor: conector hembra de 5 polos que permite la conexión del armario con tres de las fases de la máquina multifásica. Se dispone de 4 conectores de este tipo para alimentar las doce fases de la máquina.

Por último, en la *Figura 52* se aprecia cómo está actualmente el armario aún a falta de instalarle el nivel superior. Este armario se ha fabricado en el laboratorio de la Universidad de Sevilla.

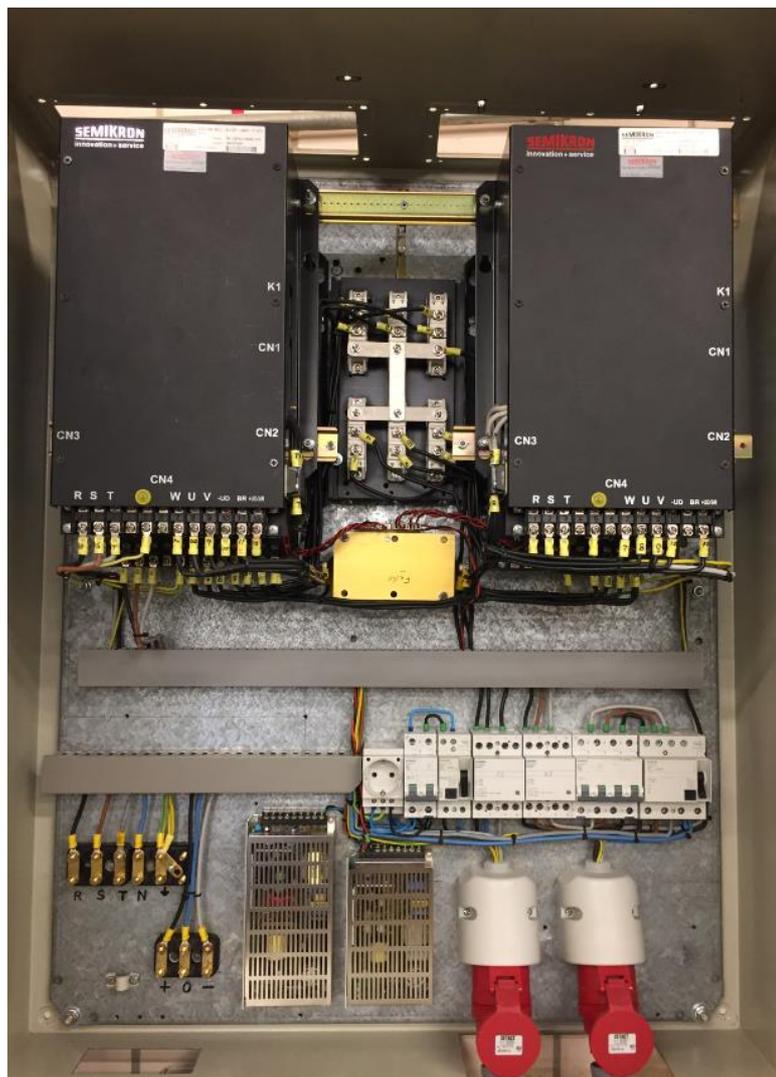


Figura 52. Armario eléctrico

Fuente: Elaboración propia

4.3 Medición de par

Un medidor de par es un dispositivo encargado de medir el par que existe, por torsión en un eje, que tiene de entrada y salida los componentes entre los que se quiere medir dicho par y manda una señal eléctrica con los valores recogidos.

Existen distintos tipos de sensores de par, dependiendo de cómo se quiera medir dicho par y la naturaleza de este. Encontramos:

- Sensores de par estático: también llamados transductores de torque están pensados para aplicaciones donde el eje no es rotativo, por lo que todo el sensor de par está sometido a la torsión que se le aplique en extremos.

Al tomar la señal directamente desde el puente Wheatstone que compone el sistema de detección de par o torsión, la señal es muy débil, propia de extensimetría en mV/V, lo que obliga a conectarlo a un equipo con una entrada de extensimetría o añadir una electrónica de acondicionamiento o amplificación.

Dentro de este tipo, hay modelos de sensor de par tipo brida, sensor de par de doble eje macho, de tipo llave, etc. Respecto a los rangos, podemos tener desde muy bajo rango hasta medidas de 20000Nm, correspondientes a un par muy alto. Un ejemplo visual es mostrado en la *Figura 53*.



Figura 53. Ejemplo de sensor de par estático

Fuente: Elaboración propia

- Sensores de par dinámico con escobillas: conocidos también con el nombre de transductores de par de anillos rozantes, están pensados para medir el par o el torque en un eje rotativo. Este tipo de sensores de par pueden medir altos valores de par, pero a bajas velocidades, ya que la transmisión de señal se realiza mediante escobillas y estas introducen mucho ruido a altas velocidades.

Entre los formatos de los que dispone este tipo de sensor de par encontramos de doble eje

cilíndrico macho con chaveta, doble eje de cuadradillo hembra, etc. Todos ellos cuentan con un eje instrumentado en su interior, donde están los elementos sensores mediante extensimetría, la señal del puente Wheatstone que compone la extensimetría se transmite a la carcasa mediante las escobillas y de ahí al conector para obtener la señal de salida. En la *Figura 54* se muestra un ejemplo del mismo.



Figura 54. Ejemplo de sensor de par estático con escobillas

Fuente: Elaboración propia

- Sensores de par dinámicos sin escobillas: a diferencia de los anteriores, tienen la particularidad de realizar la medida de par sobre elementos en rotación mediante un sistema de telemetría, que permite transmitir la señal desde el eje en rotación a la parte estática del sensor. Esto permite obtener una señal más limpia a mayor velocidad de rotación.

Al transmitir la señal a la parte estática del sensor, se amplifica y se pueden proporcionar valores de alto nivel para llevarlos directamente a la entrada analógica de un equipo de adquisición. Además, pueden incorporar la medida de velocidad y ángulo mediante un encoder interno, lo que resulta muy cómodo para relacionar el valor de par con la posición donde se produce este par.

Los rangos de par que se pueden alcanzar son de hasta 20000 N con velocidades de hasta 30000 rpm, existiendo una extensa gama de formatos con diferentes anclajes y soportes, así como señales de salida analógica e incluso con conexión directa por USB. En la siguiente figura se muestran un ejemplo.

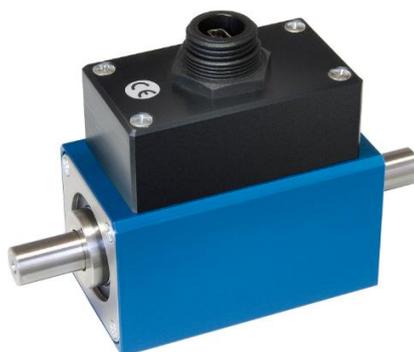


Figura 55. Ejemplo de sensor de par dinámico sin escobillas

Fuente: Elaboración propia

- Medida de par con telemetría: es un sistema muy utilizado cuando integrar un sensor se hace difícil, bien por la imposibilidad de la instalación o bien por la imposibilidad de rango. Esta técnica consta de dos elementos principales, un elemento transmisor y un elemento receptor. El elemento transmisor se monta solidario al eje o a la parte giratoria, este elemento se encarga de acondicionar la señal del sensor que detecta la torsión del elemento en rotación y transmite su señal al elemento receptor. En la *Figura 56* se muestra un ejemplo de este tipo de sensor.



Figura 56. Ejemplo de sensor de par con telemetría

Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Selección sensor de par

El procedimiento para la selección del sensor de par pasa por las siguientes fases:

- Conocimiento de los requisitos del sistema: en esta fase se debe conocer las características del sistema al que se le va a tomar las medidas del par.
- Estudio de sensores de par: a continuación, se deberá saber qué es un sensor de este tipo y cuáles son los tipos que hay. En la introducción del apartado ya se han visto los distintos tipos de sensores de par que hay en el mercado.
- Estudio del mercado: en esta fase se analiza lo que ofrecen distintos proveedores (características, precio...)
- Contacto con proveedores reales: se procede a contactar con proveedores reales para que nos aconsejen y resuelvan las dudas que han ido surgiendo, así como para solicitarles ofertas de sus productos.

Los requisitos del sistema que se impusieron debido a las características de la máquina de inducción fueron los siguientes:

- Velocidad 1000 rpm, aunque podría llegar hasta los 5000 rpm.
- La frecuencia de muestreo debe ser de 10 kHz.

- El par que se prevé que tenga la máquina es de aproximadamente 5 Nm

Tras mantener contacto con diversos proveedores se optó por trabajar con la empresa HBM. A raíz de aquí se empezaron a analizar de manera más concreta distintas opciones hasta que finalmente fueron dos los sensores de par que encajaban en nuestras especificaciones. Estos fueron los que se detallan a continuación.

- **T22/20Nm**

Este sensor de par sin escobillas es una alternativa de bajo coste que utiliza galgas extensiométricas y una tecnología de transmisión sin contacto para medir par. Es ideal para medir par dinámico y estático en componentes giratorios o no giratorios. Es muy utilizada por ejemplo en laboratorios, bancos de ensayos, sector del automóvil y en tecnología de producción. Sus dos salidas analógicas (corriente y tensión) permiten conectar el transductor a controladores lógicos programables.



Figura 57. Sensor de par T22/20 Nm

Fuente: Elaboración propia

Las características más importantes de este sensor de par son:

- Par nominal: 20 Nm.
- Sistema de medición de galgas extensiométricas
- Velocidad nominal: 16000 rpm.
- Señal de salida de par: ± 5 V ó ± 8 mA.
- Tensión de alimentación: 11,5 – 30 VCC.
- No requiere mantenimiento.
- Precisión: 0,5.

- **T21/20Nm**

Este transductor de par es ideal para medir pares pequeños, de forma combinada con velocidad o ángulo de rotación. También es sin escobillas. Utiliza tecnología de galgas extensiométricas y

transmisión sin contacto para alimentar el puente de galgas y para enviar señales al sistema. Es un sensor idóneo para medir de forma fiable pares estáticos y dinámicos relativamente bajos, en componentes giratorios o no giratorios. Se emplea, por ejemplo, en bancos de ensayo, pruebas de materiales y laboratorios de investigación.

Sus características más destacables son las siguientes:

- Par nominal: 20 Nm.
- Sistema de medida de galgas extensiométricas.
- Sistema integrado para medir velocidad de rotación o ángulo de rotación.
- Velocidad nominal: 19000 rpm.
- Señal de salida de par: ± 10 V ó ± 5 kHz.
- Tensión de alimentación: 10 – 28,8 VCC.
- No requiere mantenimiento
- Precisión: 0,2

Finalmente, se decidió adquirir este último sistema de medición de par ya que, aunque la señal de salida que ofrece tenga un mayor rango y a la hora de convertirla al rango de 0/3,3 V (que es el de entrada del DSP) se perderá más información, tiene una mayor precisión y es un sistema más completo en su conjunto, ya que además está capacitado, por ejemplo, para medir la velocidad de rotación o el ángulo de rotación. En la *Figura 58* se muestra una imagen del mismo.



Figura 58. Sensor de par T21WN/20Nm

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la adaptación del sensor al sistema experimental este iría acoplado al eje del motor mediante unos acoplamientos, que no son más que prolongamientos de las líneas de transmisión de ejes y conectan tramos, ya sea en línea recta o en diferentes planos. El acoplamiento seleccionado

para nuestro sistema experimental es un acoplamiento de tipo elástico de la empresa MAYR, ya que permite absorber la inevitable desalineación, a diferencia de los acoplamientos rígidos. Además, facilitan la desconexión en caso de reparación y protegen a la máquina de las sobrecargas en las vibraciones.

5 CONCLUSIONES

En los capítulos en los que se ha dividido el trabajo se ha desglosado cada uno de los pasos que se ha ido siguiendo, desde la revisión bibliográfica en artículos de investigación y diferentes documentos, pasando por analizar cada uno de los dos sistemas experimentales que hay funcionando actualmente en la Universidad de Sevilla y la Universidad de Málaga, los cuales han sido tomados como referencia para llevar a cabo el sistema de control, hasta llegar a finalizar las tareas de revisión del estado del arte, incluyendo el DSP. A continuación, se ha procedido a diseñar el sistema electrónico que debe controlar los convertidores de potencia. Es por ello por lo que se establecieron unas pautas claves:

- Sistema potente para poder realizar tareas de alto nivel de exigencia. Este problema se ha solucionado cambiando el DSP a uno más novedoso como ya se ha visto.
- Sistema modular, que permita controlar una máquina multifásica de más de 6 fases y hasta 12 fases. Se descartó rápidamente el modelo de placa única que hay implantado actualmente en la US ya que no permite graduar el número de fases a controlar, como sí lo hace el de la Universidad de Málaga. Por ello nos hemos basado en este sistema de control, pero adaptándolo a nuestras necesidades. Se han logrado diseñar las placas de adaptación, revisarlas y verificarlas, con todo el trabajo de laboratorio que esto conlleva (elección de los componentes, fabricación del PCB, soldadura, comprobación en el laboratorio...)
- Adquirir un sistema para medir el par, que, una vez instalado en el sistema experimental, conseguirá mejorar de manera notable el control que se realiza en la bancada.
- Diseñar un esquema de armario eléctrico que consiga albergar todos los elementos de control en el espacio disponible, esto se ha solucionado con la placa de metal abatible sobre la que irá el sistema experimental haciendo el armario de dos niveles.

En resumen, a lo largo de este Trabajo Fin de Máster se ha explicado y diseñado un sistema de control basado en el DSP TMS320F28379 que permite controlar accionamientos multifásicos de hasta 12 fases. Este accionamiento multifásico forma una parte del sistema experimental que está ubicado en una bancada de ensayos, por lo que, en base a los fundamentos que se han conseguido en este proyecto, se podrán realizar investigaciones en máquinas multifásicas de más fases que las actuales. Por lo tanto, quedan cumplidos todos los objetivos fijados al comienzo de este proyecto.

5.1 Trabajos futuros

El siguiente paso a llevar a cabo es la implementación de las partes del sistema que han sido diseñadas, pero no fabricadas a lo largo de este trabajo, para poder poner en funcionamiento la bancada del motor multifásico de 7 fases que hay en la Universidad de Sevilla y empezar a ensayar dicho motor. Para ello, se hace necesario realizar las siguientes tareas:

- Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) utilizando *Altium Designer* de la placa de adaptación DIMM180 – DIMM100 que permitirá integrar el nuevo DSP al sistema electrónico de control diseñado.
- Instalación del sensor de par en la bancada. Para ello es necesario adquirir unos acoplamientos que permitan el correcto encaje del transductor.
- Diseño del esquemático y de la placa de circuito impreso utilizando *Altium Designer* de la placa de adaptación que necesitará el sensor de par, búsqueda de los componentes y fabricación de la misma para incluirla en el sistema MECU.
- - Finalizar el montaje físico del armario eléctrico.
- - Implementación de un código en C++ para cargarlo en el DSP del sistema de control, pudiendo realizar de esta forma ensayos para controlar la máquina multifásica de la bancada.

REFERENCIAS

- [1] GOMEZ DEL RÍO, Manuel. Proyecto fin de carrera: “Control de un aerogenerador eólico trifásico”, Málaga: PFC Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – Universidad de Málaga, septiembre de 2013.
- [2] CASTILLO VALENZUELA, Sebastián. Proyecto fin de carrera: “Diseño, simulación y construcción de un inversor trifásico de tres niveles NPC para conexión a red”, Málaga: PFC Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – Universidad de Málaga, febrero de 2014.
- [3] PÉREZ ROMERO, Juan. Trabajo Fin de Grado: “Diseño de un sistema empotrado basado en DSP C2000 de Texas Instruments para control de armario de potencia de 12 fases”, Sevilla: TFG Escuela Técnica Superior de Ingeniería – Universidad de Sevilla, julio de 2015
- [4] <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/delfino-premium-performance>
- [5] <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/delfino-premium-performance>
- [6] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H.A. Toliyat, S. Williamson, “Multiphase induction motor drives – a technology status review”, IET Electr. Power Appl., Vol. 1, No. 4, July 2007
- [7] BERMÚDEZ GUZMÁN, Mario. Proyecto fin de carrera: “Control de velocidad de una máquina de corriente continua para emular turbinas eólicas”, Málaga: PFC Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – Universidad de Málaga, junio de 2014.
- [8] F. Barrero, J. Prieto, E. Levi, R. Gregor, S. Toral, M. Duran, and M. Jones, “An Enhanced Predictive Current Control Method for Asymmetrical Six-Phase Motor Drives”. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 58, no. 8, pp. 3242-3252. Aug. 2011.
- [9] PRIETO GONZÁLEZ, Ignacio. Tesis Doctoral: “Estudio comparativo de estrategias de control post-falta en accionamientos eléctricos multifásicos”, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería – Universidad de Sevilla, 2015.
- [10] RODAS BENÍTEZ, Jorge Esteban, Tesis Doctoral: “Aplicación de estimadores on-line de variables rotóricas para la mejora de las prestaciones en variadores de velocidad multifásicos”, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería – Universidad de Sevilla, 2016.
- [11] C. Bucella, C. Cecati y H. Latafat, “Digital control of power converters – A survey,” IEEE Trans. Ind. Inf., vol. 8, no. 3, pp. 437-447, 2012
- [12] O. López, J. Álvarez, J. Doval-Gandoy y F.D. Freijedo, “Multilevel multiphase space vector PWM algorithm,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 5, pp. 1933-1942. 2008.
- [13] RIVEROS INSFRÁN, José Agustín, Trabajo Fin de Máster: “Aplicación de accionamientos

multifásicos en vehículos eléctricos. Análisis de un sistema de propulsión eléctrico basado en motores de cinco fases”, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería – Universidad de Sevilla.

[14] TEXAS INSTRUMENTS. “TMS320C2000 Microcontrollers: Teaching Materials, Tutorials and Applications”.

[16] <http://www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/>

[15] <http://www.ti.com/tool/TMDSDOCK28379D>

ANEXOS

Anexo A. Tablas de correspondencia

Anexo A.1. Conector Eurocard

FILA	COLUMNA A	COLUMNA B	COLUMNA C
1	+15V	AGND	-15V
2	DGND	DGND	DGND
3	3V3	3V3	3V3
4	I1	DSPGND	I2
5	I3	DSPGND	I4
6	I5	DSPGND	I6
7	I7	DSPGND	I8
8	V1	DSPGND	V2
9	V3	DSPGND	V4
10	V5	DSPGND	V6
11	V7	DSPGND	V8
12	TEMP1	VENT	TEMP2
13	J_BRK1_SW	DIR	J_BRK2_SW
14	OFF_IN	AN SPEED	GENERAL OFF
15	AGND	AGND	AGND
16	5V	5V	5V
17	PWM1	5V	PWM2
18	PWM3	5V	PWM4
19	PWM5	DSPGND	PWM6
20	PWM7	DSPGND	PWM8
21	PWM9	5V	PWM10
22	PWM11	5V	PWM12
23	HALT_DRV_SW	ERR1	RST_DRV
24	ERR2	ERR3	ERR4
25	OVERSPEED	DSPGND	OVERTEMP

26	OVERVOLT	CONTACTOR	OVERCURRENT
27	QA2	QB2	QI2
28	QA1	QB1	QI1
29	RX_A	5V	TX_A
30	RX_B	5V	TX_B
31	CAN_RX	DSPGND	CAN_TX
32	I2CSDA	DSPGND	I2CSCL

Anexo A.2. Tarjeta de control TMS320F28335 DIMM100

Número de pin	Nombre	Tipo	Dirección
1	V33D-ISO	Comunicación	-
2	ISO-RX-RS232	Comunicación	Entrada
3	NC	NC	-
4	NC	NC	-
5	NC	NC	-
6	GND ISO	GND	-
7	CORRIENTE 1	Analógico	Entrada
8	GND	GND	Entrada
9	CORRIENTE 3	Analógico	Entrada
10	GND	GND	Entrada
11	CORRIENTE 5	Analógico	Entrada
12	GND	GND	Entrada
13	TENSION 1	Analógico	Entrada
14	GND	GND	Entrada
15	TENSION 3	Analógico	Entrada
16	GND	GND	Entrada
17	TENSION 5	Analógico	Entrada
18	BRK1	Digital	Salida
19	AN SPEED	Analógico	Entrada
20	DIR	Digital	Entrada
21	CORRIENTE 7	Analógico	Entrada
22	OFF IN	Digital	Salida
23	PWM1A	PWM	Salida
24	PWM2A	PWM	Salida
25	PWM3A	PWM	Salida
26	PWM4A	PWM	Salida
27	GND	GND	Entrada

28	PWM5A	PWM	Salida
29	PWM6A	PWM	Salida
30	RST_DRV	Digital	Salida
31	CFG	Configuración DSP	-
32	CFG	Configuración DSP	-
33	ERR1	Digital	Entrada
34	ERR4	Digital	Entrada
35	QEPA-2	Digital	Entrada
36	QEPI-2	Digital	Entrada
37	GND	GND	Entrada
38	CANTX-B / SPIp1	Comunicación	Salida
39	SCITX-B/SPIp2	Comunicación	Salida
40	QEPA-1	Digital	Entrada
41	OVERSPEED	Digital	Salida
42	CFG	Configuración DSP	-
43	RS232-RX	Comunicación	Entrada
44	OVERTEMP	Digital	Entrada
45	I2CSDA/SYNC PWM-ADC	Comunicación	-
46	OVERCURRENT	Digital	Entrada
47	GND	GND	Entrada
48	JTAG	Programación	-
49	JTAG	Programación	-
50	JTAG	Programación	-
51	V33D-ISO	Comunicación	-
52	ISO-TX-RS232	Comunicación	Salida
53	NC	NC	-
54	NC	NC	-
55	NC	NC	-
56	GND-ISO	GND	-
57	CORRIENTE 2	Analógico	Entrada
58	GND	GND	Entrada
59	CORRIENTE 4	Analógico	Entrada
60	GND	GND	Entrada
61	CORRIENTE 6	Analógico	Entrada
62	GND	GND	Entrada
63	TENSION 2	Analógico	Entrada
64	GND	GND	Entrada
65	TENSION 4	Analógico	Entrada
66	NC	NC	-
67	TENSION 6	Analógico	Entrada

68	BRK2	Digital	Entrada
69	TEMP	Analógico	Entrada
70	VENT	Digital	Salida
71	CORRIENTE 8	Analógico	Entrada
72	GENERAL OFF	Digital	Salida
73	PWM1B	PWM	-
74	PWM2B	PWM	-
75	PWM3B	PWM	-
76	PWM4B	PWM	-
77	5Vin	5V	Entrada
78	PWM5B	PWM	-
79	PWM6B	PWM	-
80	HALT DRV SW	Digital	Salida
81	CFG	Configuración DSP	-
82	5Vin	5V	Entrada
83	ERR1	Digital	Entrada
84	ERR3	Digital	Entrada
85	QEPB-2	Digital	Entrada
86	CONTACTOR	Digital	Salida
87	5Vin	5V	Entrada
88	CANRX-B/SPIp3	Comunicación	Entrada
89	SCIRX-B/SPIp4	Comunicación	Entrada
90	QEPB-1	Digital	Entrada
91	QEPI-1	Digital	Entrada
92	5Vin	5V	Entrada
93	SCITX-A ISO232	Comunicación	Salida
94	OVERVOLT	Digital	Entrada
95	I2CSCL	Comunicación	-
96	5Vin	5V	Entrada
97	JTAG	Programación	-
98	JTAG	Programación	-
99	JTAG	Programación	-
100	JTAG	Programación	-

Anexo B. Fichas técnicas

Anexo B.1. Convertidor de tensión SKS 22F

SEMISTACK - IGBT



SEMISTACK Stack ¹⁾

Three-phase inverter

SKS 22F B6U+E1CIF+B6CI 13 V12
SK 30 GB 128
SK 30 GAL 123
SK 95 D 12
P 35/260F
SKHI 20opA
Preliminary Data

Features

- Compact design
- Hall Effect Current Sensor
- Circuit for soft charge the capacitors
- IGBT Braking chopper
- Vce monitoring

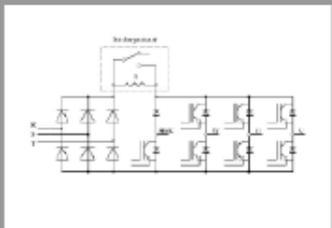
Typical Applications

- AC Motor Control
- Elevator
- Industrial

1) Photo non- contractual

Circuit	I _{rms}	V _{ac} (V _{dc})		Types
B6CI	22	380	750	SKS 22F B6U+E1CIF+B6CI 13 V12

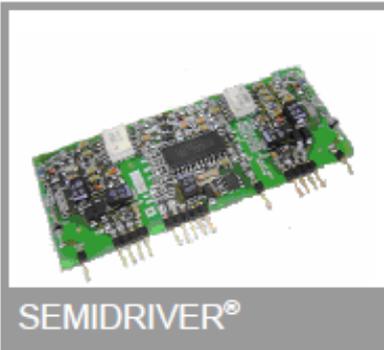
Symbol	Conditions	Values	Units
I _{rms} max	No overload; 10 kHz	22	A
T _{amb} = 35 °C	150% overload, 60s every 10min (I _{ov} /I _N)	27/18	A
	200% overload, 10s every 10min (I _{ov} /I _N)	30/15	A
V _{dc} max		1200	V
f _{sw} max	Absolute maximum switching frequency	15	kHz
f _{sw} maxCsl	Advise maximum switching frequency	6	kHz
C	Type EPCOS B43303A0687	680/400	µF/V
C _{ovl}	Equivalent capacitor bank	1360/800	µF/V
T _{dis%}	Discharge time of the capacitor bank	240	s
V _{dc} max	Max DC voltage applied to capacitor bank	750	V
Rectifier		380	V _{ac}
V _{net} max	Max network voltage (line side)	-20%/+15%	
T _{vj}	Junction temperature for continuous operation	-40...+125	°C
T _{stg}	without requirement of reforming of capacitors	-20...+40	°C
T _{amb}		-20...+55	°C
V _{isol}	60Hz/1min	2500	V
w	Aprox. total weight	5.5	Kg
Cooling	Fan, DC power supply	24	V
	Current Consumption (per fan)	0.11	A
	Required air flow (per fan)	42.5	m ³ /h
Losses	B6CI, Converter at P _{max} , T _{amb} = 35 °C	300	W
	Efficiency	97	%
Current sensor	Hall-type LEM LAH 25-NP		
Thermal trip	normally closed	71	°C
Others components	Relay Metallex J1NAC3		
Options			
Tests	Functional Test		
	Short Circuit Test Visual Inspection		



B6U+E1CIF+B6CI

Anexo B.2. Driver del convertidor de tensión

SKHI 20 opA



SKHI 20opA

Preliminary Data

SEMIDRIVER®

Features

- For IGBT with V_{CES} up to 1200V
- Dual driver for half bridge IGBT modules
- May be used as two independent single drivers
- CMOS compatible input drivers
- Short circuit protection by V_{CE} monitoring with soft turn-off
- Secondary side supply under voltage protection
- Error memory, output signal with external or automatic reset
- Interlock TOP/BOTTOM
- DC BUS up to 800V

Typical Applications

- IGBT Driver for UPS, inverter drivers, welding inverter and SMPS

Absolute Maximum Ratings			
Symbol	Term	Value	Types
V_S	Supply voltage primary	18	V
V_{SS}	Supply voltage secondary	30	V
$I_{out,PEAK}$	Output peak current	2,5	A
f_{max}	max. switching frequency	100	kHz
V_{CE}	Collector-Emitter voltage sense across the IGBT	1000	V
dv/dt	Rate of rise and fall of voltage secondary to primary side	15	kV/μs
V_{testIO}	Isolation test voltage input-output (1 min. AC)	2500	Vac
R_{Gmin}	Minimum rating for R_G	7.5	Ω
T_{op}	Operating temperature	-40... +70	°C
T_{stg}	Storage temperature	-40... +85	°C

Electrical Characteristics ($T_a=25^\circ\text{C}$)					
Symbol	Term	min	typ	max	Units
V_S	Supply voltage primary side	14,4	15	15,6	V
I_S	Supply current primary side			45	mA
V_{SS}	Isolated supply voltage secondary side	24	25,5	27	V
I_{SS}	Isolated supply current secondary side			20	mA
V_I	Input signal voltage (on/off)		15 / 0		V
V_{IT+}	Input threshold voltage (High)	11,0	12,4		V
V_{IT-}	Input threshold voltage (Low)		4,8	6,4	V
R_{in}	Input resistance		10		kΩ
$V_{O(on)}$	Turn-on gate voltage output		15	16	V
$V_{O(off)}$	Turn-off gate voltage output	-9	-8	-6	V
R_{GE}	Internal gate-emitter resistance		10		kΩ
$t_{d(on)IO}$	Input-output turn-on propagation time	350	550	750	ns
$t_{d(off)IO}$	Input-output turn-off propagation time	500	700	900	ns
t_{TD}	Top-bottom interlock dead time		4 ¹⁾		μs
$V_{CE(sat)}$	Ref. voltage for V_{CE} monitoring	6,5	7 ²⁾	7,5	V
$t_{d(er)}$	Error input-output propagation time		0,6		μs
$t_{p(ER)reset}$	Error reset time		9 ²⁾		μs
C_{ps}	Coupling capacity primary-secondary		3		pF
w	weight		17,5		g

¹⁾ Factory adjusted; see table Jumper Settings for other values.

²⁾ For resetting the driver is necessary to turn off both pulses (top and bottom) or put reset signal low for at least 9μs.

³⁾ V_{ce} threshold is adjustable.

Anexo B.3. Sonda Hall del convertidor de tensión



Current Transducer LA 25-NP

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic isolation between the primary circuit and the secondary circuit.

$I_{PN} = 5-6-8-12-25 \text{ At}$



Electrical data			
I_{PN}	Primary nominal current rms	25	At
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 ... 36	At
R_M	Measuring resistance @ with $\pm 15 \text{ V}$	$T_A = 70^\circ\text{C}$	
		$R_{M \min}$	$R_{M \max}$
		$R_{M \min}$	$R_{M \max}$
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	
		$R_{M \min}$	$R_{M \max}$
		100	185
		100	315
		100	190
		100	185
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA
K_N	Conversion ratio	1-2-3-4-5	: 1000
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	± 15	V
I_C	Current consumption	$10 + I_S$	mA

Accuracy - Dynamic performance data			
X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.5	%
ϵ_L	Linearity error	< 0.2	%
I_0	Offset current ¹⁾ @ $I_S = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ ± 0.05	Max ± 0.15 mA
I_{0M}	Magnetic offset current ²⁾ @ $I_S = 0$ and specified R_M after an overload of $3 \times I_{PN}$	± 0.05	± 0.15 mA
I_{0T}	Temperature variation of I_0	$0^\circ\text{C} \dots +25^\circ\text{C}$	± 0.06 ± 0.25 mA
		$+25^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$	± 0.10 ± 0.35 mA
		$-25^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	± 0.5 mA
		$-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	± 1.2 mA
t_r	Response time ³⁾ to 90 % of I_{PN} step	< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed	> 50	A/ μs
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)	DC ... 150	kHz

General data			
T_A	Ambient operating temperature	$-40 \dots +85$	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	$-45 \dots +90$	$^\circ\text{C}$
R_p	Primary coil resistance per turn @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	< 1.25	m Ω
R_s	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
		115	Ω
		115	Ω
R_{15}	Isolation resistance @ 500 V, $T_A = 25^\circ\text{C}$	> 1500	M Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Notes: ¹⁾ Measurement carried out after 15 min functioning
²⁾ The result of the coercive field of the magnetic circuit
³⁾ With a di/dt of 100 A/ μs .

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Isolated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

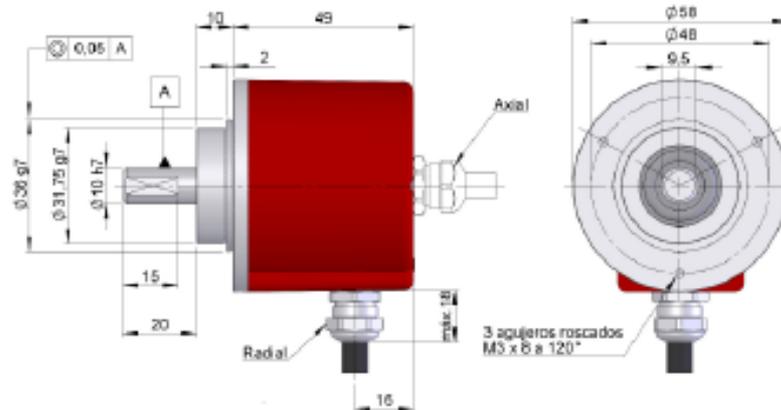
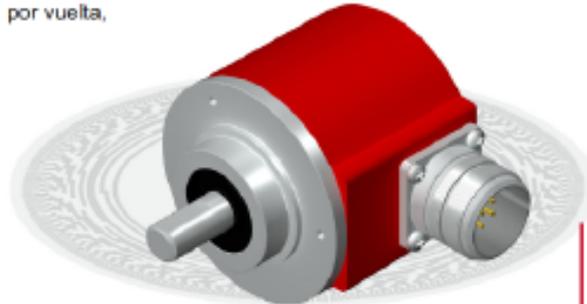
- Industrial.

Anexo B.4. Encoder

SERIE 10

ENCODER INCREMENTAL EJE SALIENTE PARA APLICACIONES INDUSTRIALES

- Disponible cualquier número de impulsos por vuelta, de 1 hasta 10.000
- Diámetro exterior 58 mm
- Eje de 6 a 12 mm
- Protección IP65 según DIN 40050
- Gran flexibilidad en bridas y diferentes configuraciones
- Ejecuciones mecánicas, electrónicas y ópticas especiales bajo pedido
- Conexión cable (disponible cualquier longitud de cable) o conector industrial



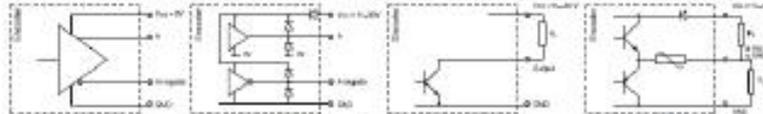
Previo montaje e instalación del encoder, se recomienda la lectura del apartado "CONSIDERACIONES TÉCNICAS".

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Cuerpo	Aluminio
Eje	Acero inoxidable
Rodamientos	De bolas
Vida de los rodamientos	1x10 ⁶ rev.
Nº máx. rev. permisible mecánicamente	6000 rpm
Protección contra polvo y salpicaduras según DIN 40050	IP65
Momento de inercia del rotor	30 gcm ²
Par de arranque a 20°C (68°F)	Max. / 2,0 Nom.
Carga máxima admisible sobre eje axial	40 N
Carga máxima admisible sobre eje radial	50 N
Peso aprox.	0,5 Kg
Gama de temperatura en funcionamiento	-30°C a +80°C
Vibración	100 m/s ² (10Hz...2000Hz)
Impacto	1000 m/s ² (6ms)
Nº máximo de impulsos por vuelta	10.000
Conexión axial o radial	Cable 2 metros o conector industrial. (otras long. de cable o conector según sobre pedido).

CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS

SEÑALES DE SALIDA



	RS422 (TTL compatible)	Push-Pull Differential	NPN Open Collector	Push-Pull sin complementarias
Tensión de Alimentación	5 V ±5%	11...30 V	11...30 V	11...30V
Consumo	Típico: 70 mA Máximo: 150 mA	Típico: 45 mA Máximo: 150 mA	40 mA	Típico: 45 mA Máximo: 150 mA
Capacidad de carga máxima	±20 mA	±30 mA	40 mA	±30 mA
Longitud de cable admisible	1200 m	100 m	50 m (a 24 V)	50 m
Nivel de señal "Low"	$V_{OL} < 0.5 V$	$V_{OL} < 2.5 V$	$V_{OL} < 0.4 V$ (a 24 V)	$V_{OL} < 2.5 V$
Nivel de señal "High"	$V_{OH} > 2.5 V$	$V_{OH} > V_{CC} - 3 V$	$V_{OH} > 22 V$ (a 24 V)	$V_{OH} > V_{CC} - 3 V$
Frecuencia	300 kHz	200 kHz	100 kHz	200 kHz
Protección contra Cortocircuito	SI	SI	No permanente	SI
Protección Inversión Polarida	No	SI	SI	SI

Canal B adelanta 90° eléctrico canal A.

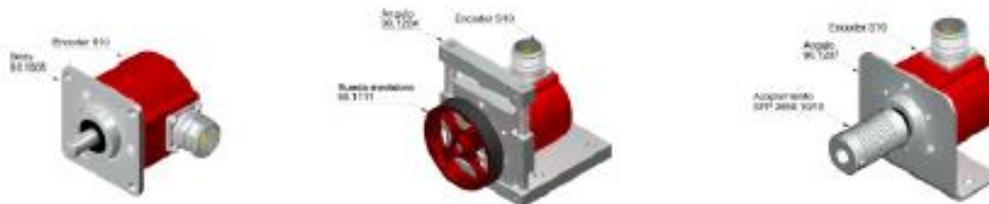
CONEXIONADO

	Cable 5x0.14	Cable 3x2x0.14+2x0.34	90.9504 DIN 43659	90.9507 MIL 7p	90.9508 M12 8p	90.9510 MIL 10p	90.9512 M23 12p
GND	Amarillo	Negro	1	A	1	A	1
Vcc	Bianco	Rojo	2	B	2	B	2
A	Marrón	Amarillo	3	C	3	C	3
B	Verde	Verde	4	D	4	D	4
A complementaria		Marrón		E	5	E	5
B complementaria		Azul		F	6	F	6
0 (referencia)	Gris	Gris		G	7	G	7
0 complementario	Gris	Naranja		G	8	H	8

REFERENCIA

SERIE	EJE	BRIDA	SEÑALES SALIDA	CONEXIÓN	SALIDA ELECTRONICA	NUMERO DE IMPULSOS	EJECUCION ESPECIAL
10	<ul style="list-style-type: none"> 1- Ø10 x 20 mm 2- Ø6 x 10 mm 3- Ø8 x 20 mm 5- Ø9,52 x 20 mm 6- Ø6,35 x 10 mm 8- Ø12 x 20 mm 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Sin brida 2- 90.1002 3- 90.1003 4- 90.1004 5- 90.1005 7- 90.1006 	<ul style="list-style-type: none"> 1- A 2- A + B 3- A + B + 0 5- AA + BB 6- AA + BB + 00 9- A + B + 0 	<ul style="list-style-type: none"> 1- 90.9504 radial 3- Cable radial 4- 90.9507 radial 5- 90.9512 radial 6- 90.9504 axial 8- Cable axial 9- 90.9507 axial 0- 90.9512 axial M- 90.9510 radial N- 90.9510 axial L- 90.9506 radial K- 90.9506 axial 	<ul style="list-style-type: none"> 0- Open collector NPN 11...30V 1- Push-Pull 11...30V (sin complementarios) 7- Standard RS422, 5V. Compatible TTL 9- Diferencial line driver. Push-Pull 11...30V 		

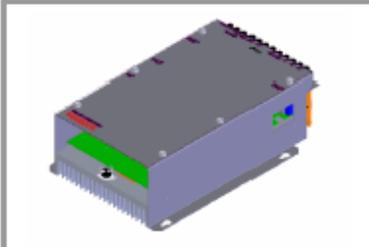
ACCESORIOS



Todos los accesorios disponibles en los apartados "MODULOS ELECTRONICOS Y CONTADORES" y "ACCESORIOS DE MONTAJE".

Anexo B.5. Convertidor de tensión SKS 46F

SEMISTACK - IGBT



SEMITOP Stack 1)

Three-phase inverter

SKS 46F B6U+E1CIF+B6CI 17 V06
 SK 80 GB 063
 SK 70 GAL 063
 SK 95 D 12
 P 35/325F
 SKHI 20opA
 Preliminary Data

Features

- Compact design
- Hall Effect Current Sensor
- Circuit for soft charge the capacitors
- IGBT Braking chopper
- Vce monitoring

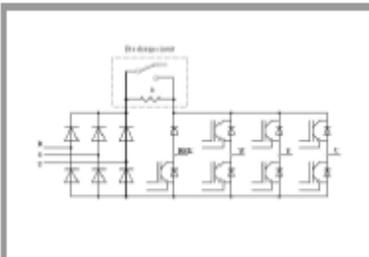
Typical Applications

- AC Motor Control
- Elevator
- Industrial

1) Photo non- contractual

Circuit	I_{rms}	V_{ac} (V_{dc})		Types
B6CI	46	250	350	SKS 46F B6U+E1CIF+B6CI 17 V06
		-	-	

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{rms} max	No overload; 10 kHz	46	A
$T_{amb} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	150% overload, 60s every 10min (I_{ov}/I_N)	57/38	A
	200% overload, 10s every 10min (I_{ov}/I_N)	68/34	A
V_{ce} max		600	V
f_{sw} max	Absolute maximum switching frequency	15	kHz
f_{sw} maxCsl	Advise maximum switching frequency	10	kHz
C	Type EPCOS B43303A0158	1500/200	$\mu\text{F}/\text{V}$
C_{oqv}	Equivalent capacitor bank	4500/400	$\mu\text{F}/\text{V}$
$T_{ds\%}$	Discharge time of the capacitor bank	-	s
V_{DC} max	Max DC voltage applied to capacitor bank	350	V
Rectifier		250	V_{ac}
V_{net} max	Max network voltage (line side)	-20%/+15%	
T_{vj}	Junction temperature for continous operation	-40...+125	$^{\circ}\text{C}$
T_{stg}	without requirement of reforming of capacitors	-20...+40	$^{\circ}\text{C}$
T_{amb}		-20...+55	$^{\circ}\text{C}$
V_{isol}	60Hz/1min	2500	V
w	Aprox. total weight	-	Kg
Cooling	Fan, DC power supply	24	V
	Current Consumption (per fan)	0.11	A
	Required air flow (per fan)	42.5	m^3/h
Losses	B6CI , Converter at P_{max} , $T_{amb} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	504	W
	Efficiency	96	%
Current sensor	Hall-type Honeywell CSNF161		
Thermal trip	normally closed	71	$^{\circ}\text{C}$
Others components	Relay Metaltex J1NAC3		
Options			
Tests	Functional Test		
	Short Circuit Test		
	Visual Inspection		
	-		



B6U+E1CIF+B6CI

Anexo B.6. Sensor de par



T21WN

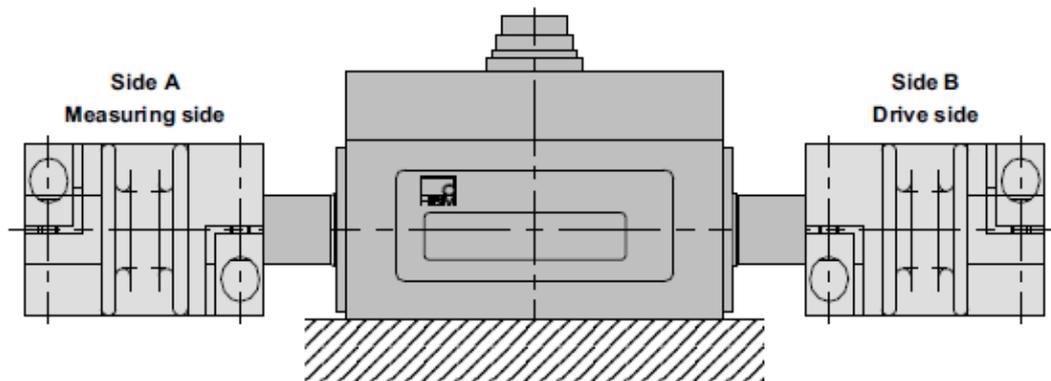
Torque transducers

Special features

- Nominal (rated) torques 0.1 N·m, 0.2 N·m, 0.5 N·m, 1 N·m, 2 N·m, 5 N·m, 10 N·m, 20 N·m, 50 N·m, 100 N·m, 200 N·m
- Non-linearity including hysteresis $\leq 0.1\%$
- Non-contacting transmission of measured values
- High speeds for angle of rotation measurements up to 20,000 rpm
- Cylindrical shaft ends for friction fits
- Integrated measurement system for rotational speed and angle of rotation
- Torque output signal ± 10 V, 10 kHz ± 5 kHz

Data sheet

Installation example with bellows couplings



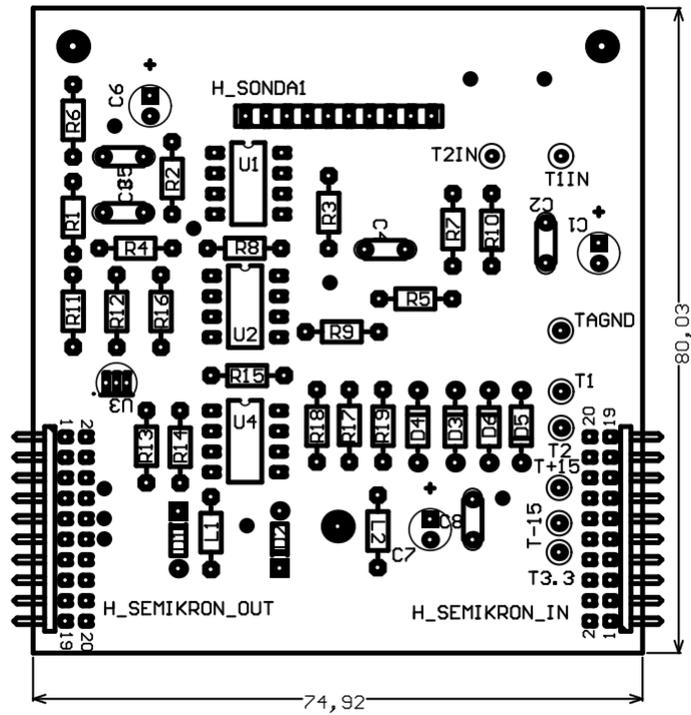
Two of the couplings provided are needed for this example

Specifications for T21WN

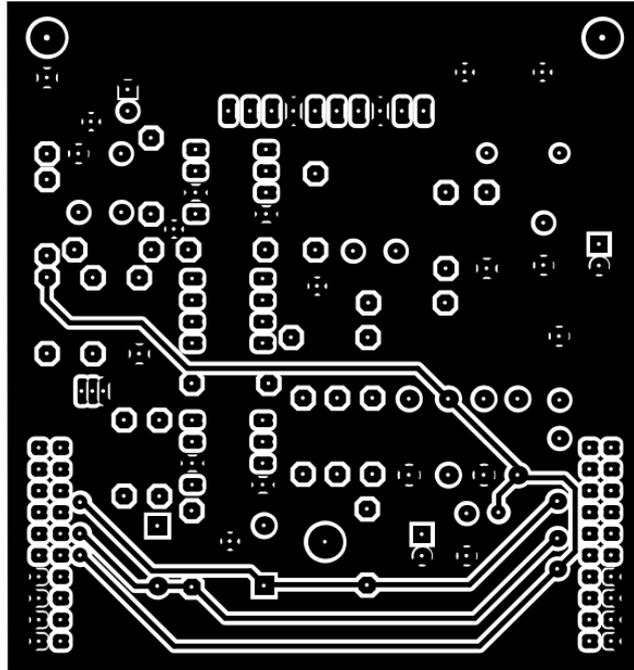
Type		T21WN										
Accuracy class		0.2										
Nominal (rated) torque M_{nom}	N·m	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100	200
Nominal (rated) rotational speed	rpm	20,000					19,000			13,500		
Non-linearity including hysteresis relative to the nominal (rated) sensitivity	%	<±0.1										
Rel. standard deviation of repeatability per DIN 1319 relative to the variation of the output signal	%	<±0.05										
Temperature effect per 10 K in the nominal (rated) temperature range on the output signal relative to the actual value of the signal span												
Frequency output	%	<±0.1										
Voltage output	%	±0.1										
on the zero signal relative to the nominal (rated) sensitivity												
Frequency output	%	<±0.2										
Voltage output	%	<±0.2										
Nominal (rated) sensitivity (nominal (rated) signal range between torque = zero and nominal (rated) torque)												
Frequency output 10 kHz	kHz	5										
Voltage output	V	10										
Sensitivity tolerance (deviation of actual output quantity at M_{nom} from the nominal (rated) signal range)	%	±0.2										
Nominal output signal												
Frequency output (RS422, 5V symmetrical)												
with positive nominal (rated) torque	kHz	15										
with negative nominal (rated) torque	kHz	5										
Voltage output												
with positive nominal (rated) torque	V	+10										
with negative nominal (rated) torque	V	-10										
Load resistance	MΩ	> 1										
Long-term drift over 48 h	mV	<±50										
Cut-off frequency (-3 dB)	kHz	1										
Residual ripple (voltage output)	mV _{SS}	< 100										
Group delay	ms	< 1.0										
Maximum modulation range												
Frequency output	kHz	3.7 ... 16.3										
Voltage output	V	-11 ... +11										
Resolution												
Frequency signal	mHz	0.19										
Voltage signal	mV	0.38										
Energy supply												
Nominal (rated) supply voltage (safety extra-low voltage (SELV))	V (DC)	10 ... 28.8										
Calibration signal triggering	V	5 ... 24										
Current consumption in measuring mode	A	with U_b 12V <0.2										
Nominal (rated) power consumption	W	< 2.4										
Permissible residual ripple of supply voltage	mV _{SS}	200										
Calibration signal	V	+10 ±0.2%										
Output signal at torque = zero	V	0 ±0.05										
	Hz	0 ±50										

Anexo C. Placas de circuito impreso

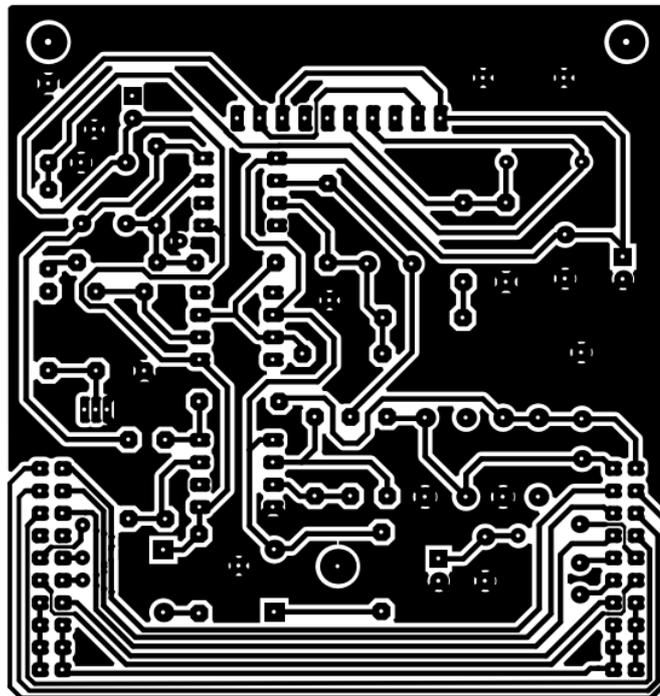
Anexo C.1. Placa de adaptación de la sonda Hall



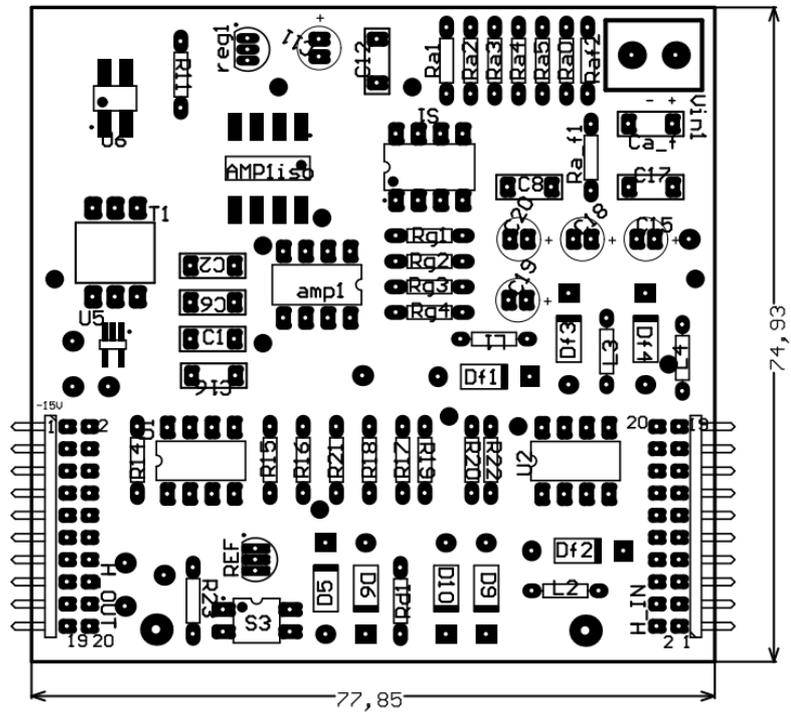
Vista Superior



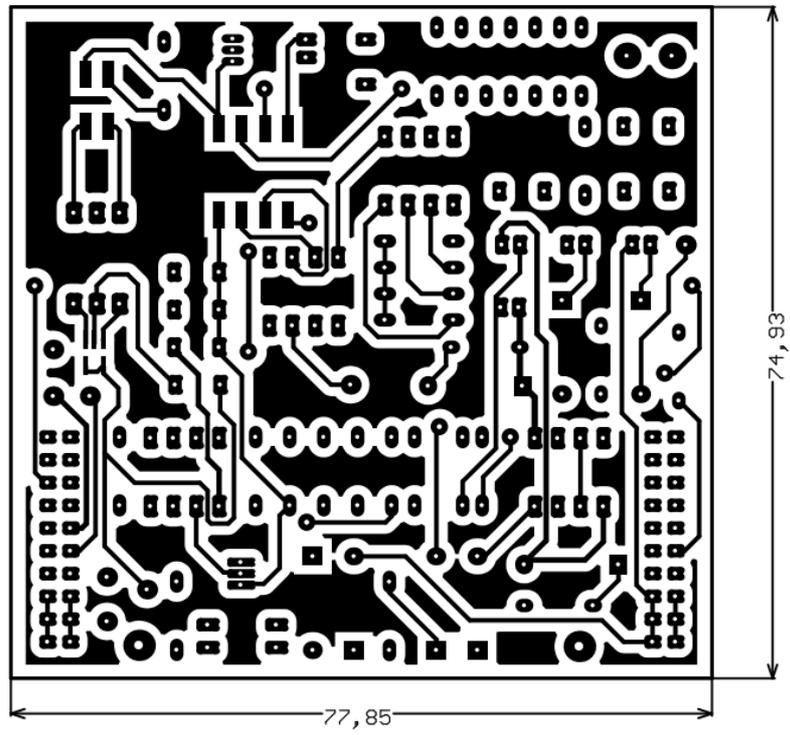
Vista inferior



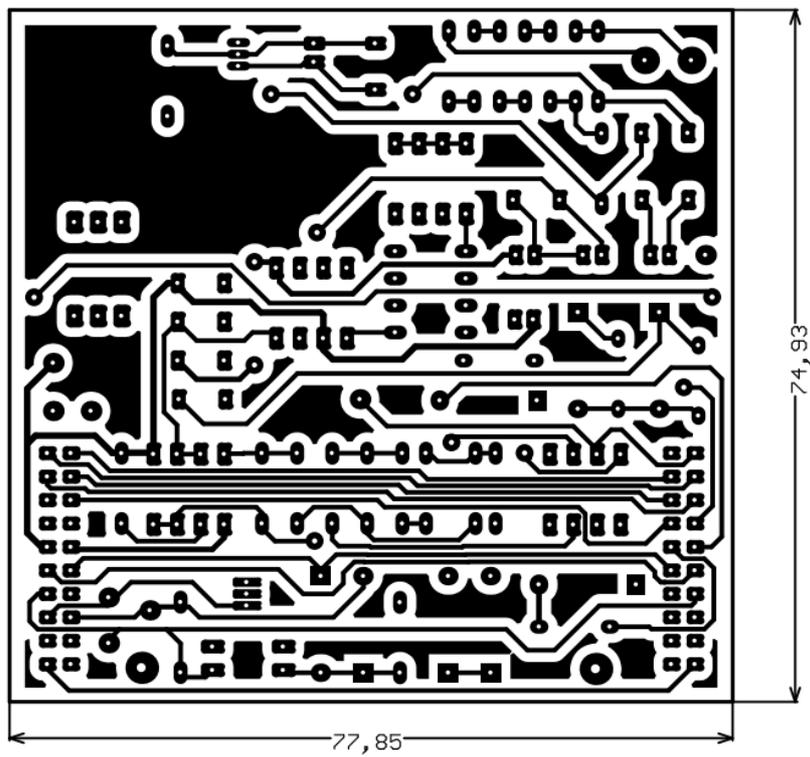
Anexo C.2. Placa de adaptación de voltaje



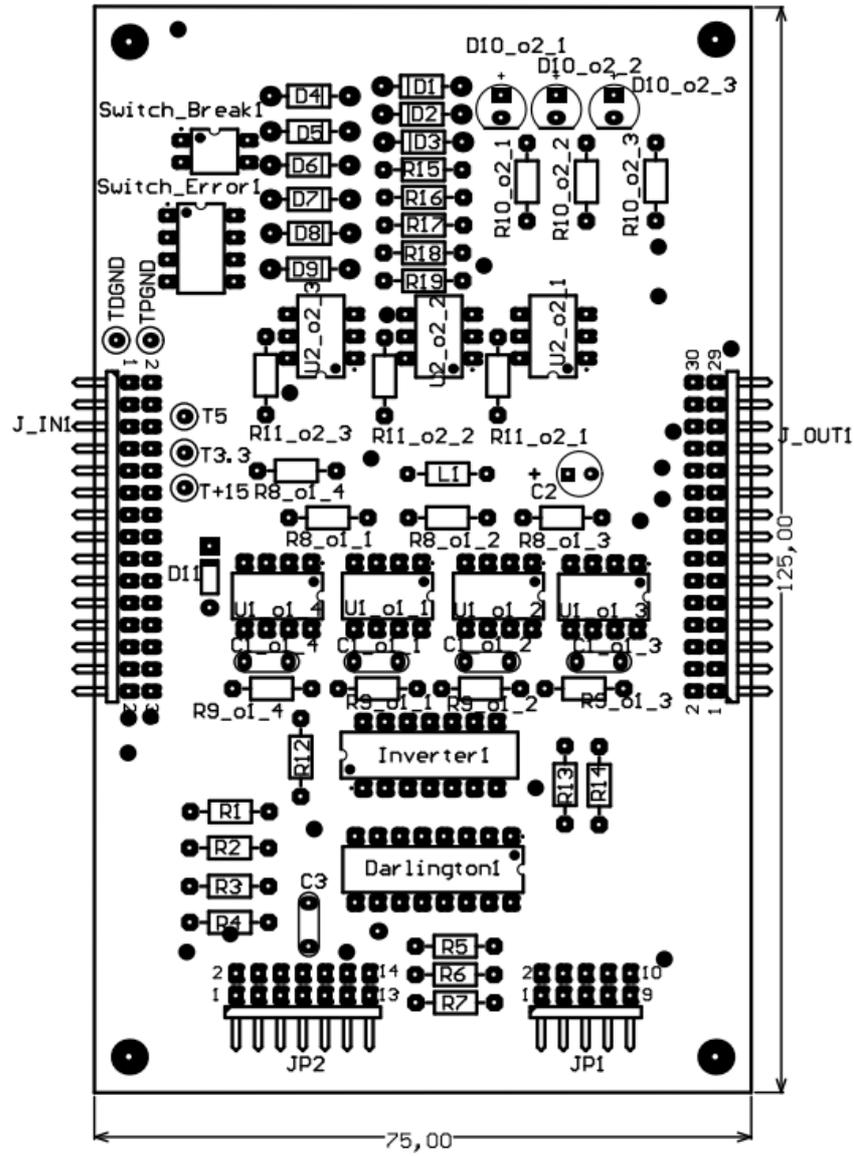
Vista superior



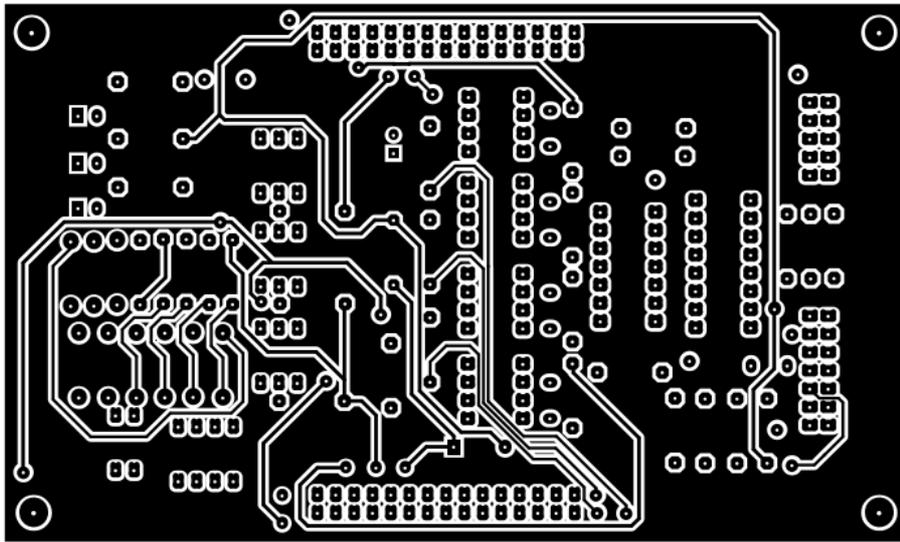
Vista inferior



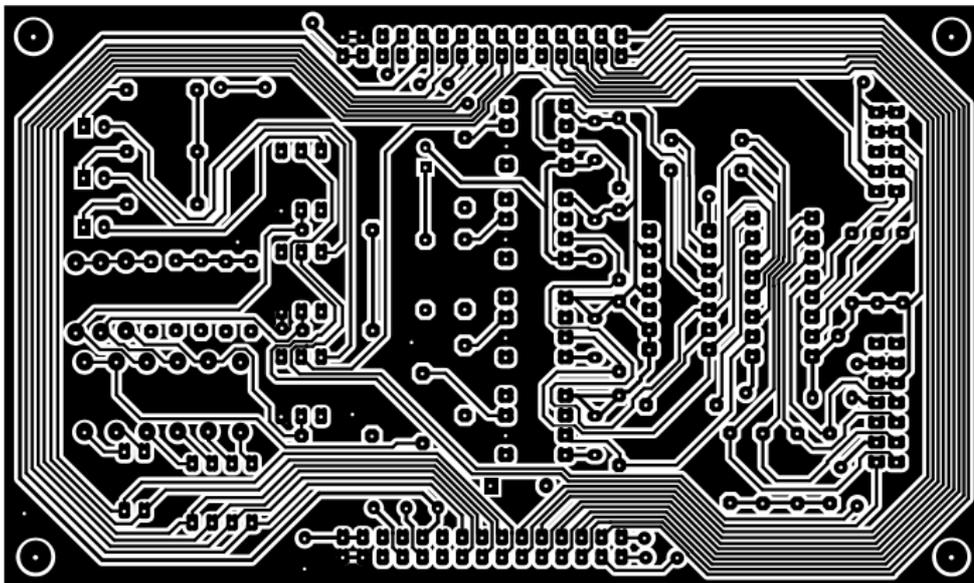
Anexo C.3. Placa de adaptación del convertidor



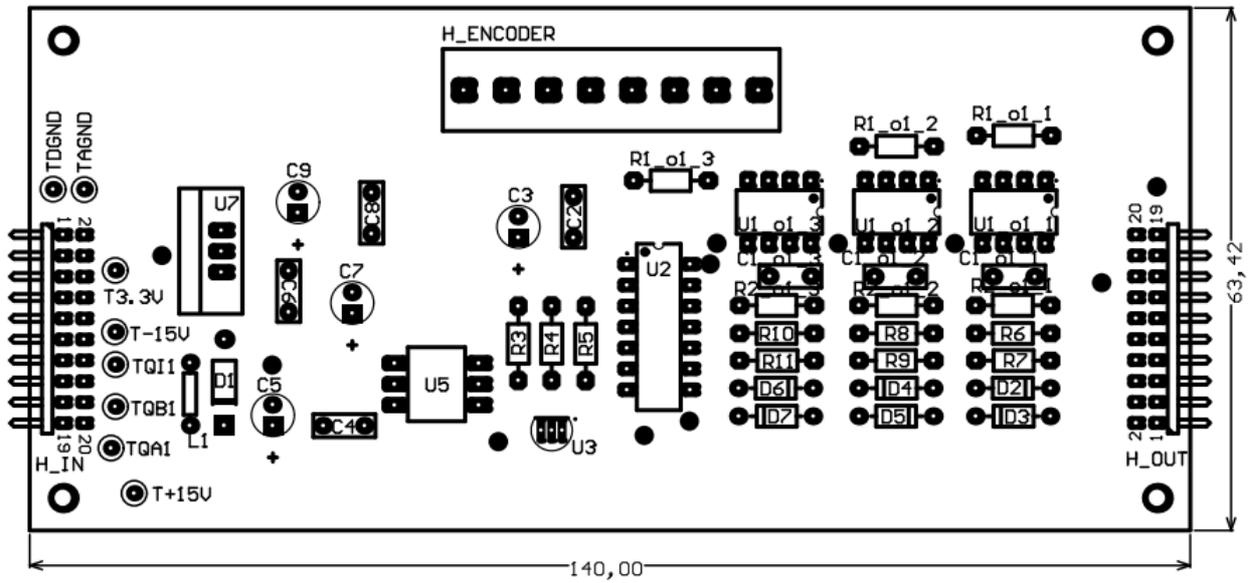
Vista superior



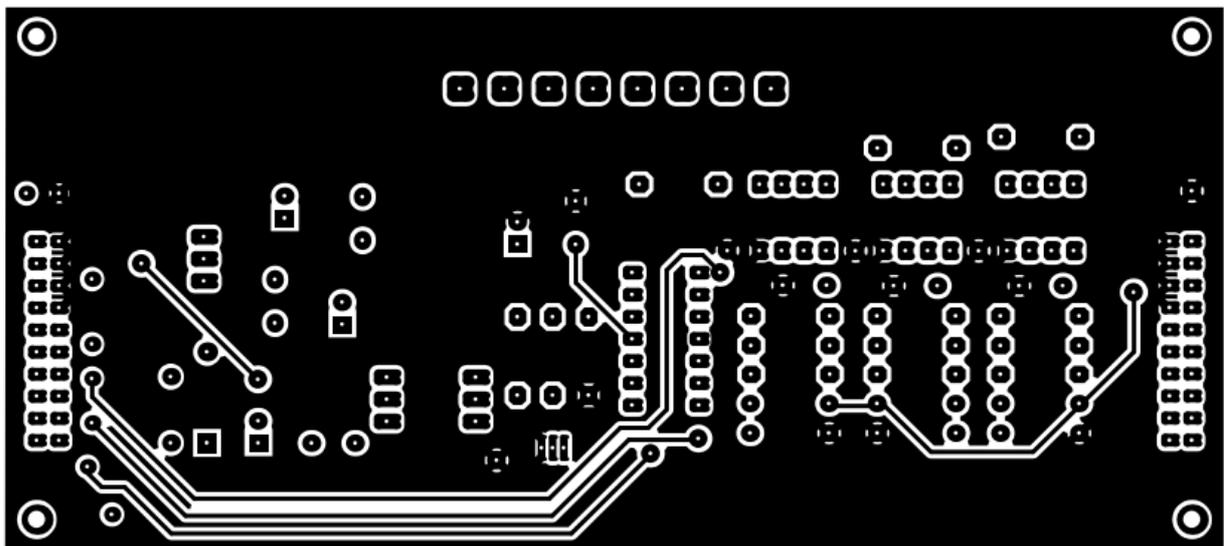
Vista inferior



Anexo C.4. Placa de adaptación del encoder



Vista superior



Vista inferior

