



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“REPOTENCIACIÓN DEL EQUIPO INTELLIGENT
POWER MODULE POR MEDIO DE UNA PLATAFORMA
DE SISTEMAS DE CONTROL VECTORIAL DE
MOTORES ELÉCTRICOS”**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

CARLOS EMILIO VILLALBA CABALLERO

JHON EMANUEL RÍOS PACHECO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme culminar mis estudios universitarios, a mis padres y a mi hermano por el esfuerzo y sacrificio que realizaron para que no me falte nada, aun viviendo en otra ciudad. A mi hermana por el apoyo y ayuda brindada no solo en lo académico, sino en mi vida cotidiana.

Al Ing. Raúl Intriago por su colaboración y guía en el desarrollo del presente trabajo. Al Ing. Damián Larco, y a los miembros de la empresa Larcotronic por la ayuda y colaboración prestada en las pruebas y reparación de los equipos utilizados en este proyecto.

A mis amigos y familiares de mi ciudad natal Zaruma, por su constante preocupación y apoyo, los cuales hicieron esta carrera más llevadera.

Jhon Emanuel Ríos Pacheco

Agradezco a Dios de antemano por nunca abandonarme en esta lucha de ser profesional, a mis padres en especial por todo el sacrificio y apoyo que me dieron para que no tenga preocupaciones durante mis estudios. A mis hermanos y primos que con sus bromas y reuniones hicieron esta carrera más fácil. A mis tíos que estuvieron allí cuando más los necesité. A mi novia por su constante preocupación y apoyo desinteresado.

Al Ing. Damián Larco por guiarme no sólo durante este trabajo, sino por ayudarme durante mis últimos semestres con sus clases didácticas y bromas. Al equipo de trabajo de la empresa Larcotronic por la ayuda prestada en los momentos difíciles.

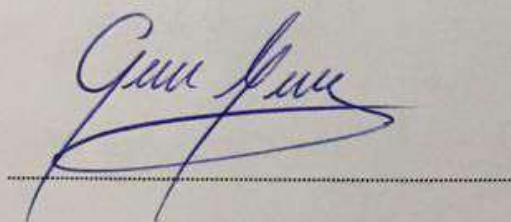
Al Ing. Raúl Intriago por su ayuda brindada para realizar este trabajo, además por aconsejarme durante mi etapa de ayudante académico.

Carlos Emilio Villalba Caballero

DEDICATORIA

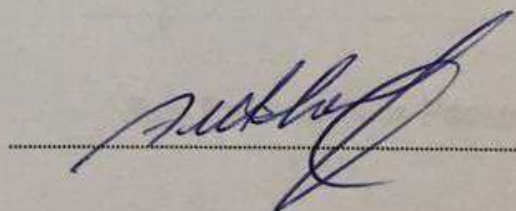
Dedicamos el presente proyecto a nuestros padres y hermanos, que con su esfuerzo y sacrificio nos dieron la posibilidad de ser profesionales.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Janeth Godoy', written over a horizontal dotted line.

MSc. Janeth Carolina Godoy Ortega

PROFESOR EVALUADOR

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Damián Larco', written over a horizontal dotted line.

MSc. Damián Alberto Larco Gómez

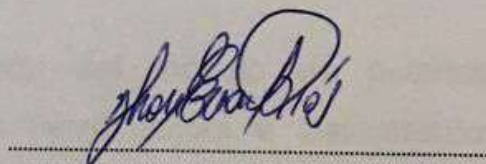
PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Carlos Emilio Villalba Caballero



Jhon Emanuel Ríos Pacheco

RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolla la repotenciación del módulo de potencia inteligente PEC16DSM01 para realizar técnicas de control en un motor AC, utilizando el software gráfico VisSim. Este proyecto nace debido a que, desde que se adquirió el módulo de potencia PEC16DSM01 no ha sido utilizado por profesores o alumnos. Además, junto con el módulo de potencia se adquirió también un controlador MICRO 2812 y una serie de motores AC, los cuales tampoco se han utilizado.

Es por eso que se aplicó ingeniería inversa en las tarjetas electrónicas del módulo de potencia inteligente PEC16DSM01 para obtener los diagramas electrónicos de las mismas, con la finalidad de identificar daños o elementos averiados y así poder repararlas.

Se presentaron dificultades durante la reparación del módulo de potencia PEC16DSM01, debido a que no se disponía de herramientas e instrumentos adecuados para realizar mediciones o comprobar la funcionalidad de los elementos, por lo que fue necesario trasladar el equipo al laboratorio Larcotronic, propiedad del Ing. Damián Larco, profesor de ESPOL.

Finalmente se desarrollaron tres prácticas de control sobre un motor AC con el módulo de potencia inteligente, utilizando la DSP TMS320F2812 embebida en el controlador MICRO 2812 y el software de programación gráfica VisSim.

Adicionalmente, se elaboró un manual de usuario acerca del funcionamiento del módulo de potencia PEC16DSM01, con la finalidad de que el equipo pueda ser operado con facilidad tanto por alumnos como por profesores.

INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Electrónica de Potencia de ESPOL adquirió en el año 2011 dos kits para el desarrollo de control de motores, los cuales consisten en un módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, un controlador MICRO 2812 basado en una DSP TMS320F2812, y una serie de motores tanto AC como DC.

El proyecto implementado consiste en la repotenciación del módulo de potencia inteligente PEC16DSM01 para el desarrollo de tres prácticas de control para un motor AC. Además se requiere obtener el diagrama electrónico y realizar un manual de usuario del módulo de potencia.

En el capítulo uno se describen los problemas encontrados tanto en el módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, como en el controlador MICRO 2812, y en base a dichos problemas se plantean los objetivos del proyecto.

En el capítulo dos se detalla el estado en el cual se encontró el módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, además se realiza una breve descripción de sus partes. Luego se presentan las principales características y funciones del microprocesador DSP TMS320F2812, el cual está embebido en el controlador MICRO 2812. Por último se presenta el software VisSim/ECD.

En el capítulo tres se muestran las acciones a realizar para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto. En primer lugar se describe la repotenciación del módulo de potencia PEC16DSM01, detallando los cambios y correcciones en elementos y tarjetas electrónicas dañadas. Además, se presenta el diagrama electrónico de todas las tarjetas del módulo de potencia, y la explicación del funcionamiento de cada una. Finalmente, se muestran las conexiones realizadas entre los equipos para el desarrollo de las tres prácticas de control para un motor AC.

En el capítulo cuatro se detallan los resultados obtenidos al realizar la repotenciación del módulo de potencia PEC16DSM01, mostrando todas las reparaciones realizadas, y también se presentan los resultados ante las tres técnicas de control implementadas con el módulo de potencia y el motor AC.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA	ii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iii
DECLARACIÓN EXPRESA	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
CAPÍTULO 1	1
1. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO 2.....	3
2. ESTADO DEL ARTE	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Marco Teórico	4
2.2.1. Elementos del sistema	4
MICRO 2812 TRAINER KIT	5
DSP TMS320F2812	14
Software VisSim/ECD	16
Intelligent Power Module (PEC16DSM01)	17
CAPÍTULO 3.....	18
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	18
3.1. Repotenciación del módulo de potencia PEC16DSM01	18
3.1.1. Tarjeta Electrónica de Fuentes DC	18
3.1.2. Tarjeta Electrónica de Acondicionamiento de Señales ...	20

3.1.3.	Tarjeta Electrónica de Potencia.....	25
3.1.4.	Fuente para los disparos de los IGBTs	30
3.2.	Diagrama electrónico del equipo PEC16DSM01.....	32
3.2.1.	Circuito electrónico de las fuentes +15V, -15V y +5V	32
3.2.2.	Tarjeta de Acondicionamiento de señales.....	34
3.2.3.	Tarjeta de Potencia	36
	Convertidor AC/DC	38
	Detección de Corriente y Voltaje de Barra DC	39
	Convertidor DC/AC	40
	Detección de las corrientes de salida.....	42
	Circuito de fuente para los IGBTs	43
3.2.4.	Tarjeta de acondicionamiento de señales	44
	Procesamiento de Señales de Corrientes de Fase	44
	Procesamiento de señales de corriente y voltaje de barra DC	50
	Procesamiento de señales para la protección de barra DC	56
	Procesamiento de Señales PWM.....	61
3.3.	Aplicaciones del Módulo de Potencia PEC16DSM01	64
3.3.1.	Control V/F en lazo abierto para un motor AC.....	65
3.3.2.	Control de campo orientado (FOC) en lazo abierto y cerrado para un motor AC	70
CAPÍTULO 4.....		73
4.	RESULTADOS	73
4.1.	Repotenciación del módulo de potencia PEC16DSM01	73
4.1.1.	Tarjeta electrónica de fuentes DC	73
4.1.2.	Tarjeta electrónica de control	74
	Reemplazo de Potenciómetro	74
	Reemplazo de Integrado TL084.....	75
	Reemplazo de Optocopladores A4506	75

4.1.3. Tarjeta electrónica de la etapa de potencia.....	76
Limpieza y Soldadura de la tarjeta electrónica	76
Fuente para los disparos de los IGBTs.....	78
Gráficas de salida del módulo de potencia	78
4.2. Prácticas con el módulo de potencia PEC16DSM01	80
4.2.1. Primera práctica: Control V/F en lazo abierto de un motor AC	80
4.2.2. Segunda práctica: Control de campo orientado (FOC) en lazo abierto de un motor AC	84
4.2.3. Tercera práctica: Control de campo orientado (FOC) en lazo cerrado de un motor AC	85
Entrada Sinusoidal	86
Entrada Triangular.....	86
Entrada tipo Escalón	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXOS.....	93
ANEXO1 Manual de usuario del equipo PEC16DSM01	93
1. Descripción del panel frontal	93
2. Procedimiento para energizar el Módulo de Potencia Inteligente	106
3. Interior del equipo.....	110
4. Conexión del encoder.....	113
PRÁCTICA #1	119
TEMA.....	119
OBJETIVOS.....	119
TEORÍA	119
LISTADO DE EQUIPOS A EMPLEARSE	122
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	122
PRÁCTICA #2	137

TEMA.....	137
OBJETIVOS.....	137
TEORÍA	138
LISTADO DE EQUIPOS A EMPLEARSE	139
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	140
PRÁCTICA #3	148
TEMA.....	148
OBJETIVOS.....	148
TEORÍA	148
LISTADO DE EQUIPOS A EMPLEARSE	150
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Detalle de pines de Interfaz Analógica a Digital	8
Tabla 2: Detalle de pines de sección DAC.....	9
Tabla 3: Detalle de pines sección PWM	11
Tabla 4: Función de los interruptores de la tarjeta TMS320F2812 TRAINER KIT	12
Tabla 5: Función de los pines del conector P1	13
Tabla 6: Estado 1 de funcionamiento del flip-flop HEF4027	59
Tabla 7: Estado 2 de funcionamiento del flip-flop HEF4027	60
Tabla 8: Estado 3 de funcionamiento del flip-flop HEF4027	60
Tabla 9: Detalle de pines del JTAG XDS510LC y el puerto P2 del controlador MICRO 2812.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Elementos para el desarrollo de técnicas de control.....	4
Figura 2.2 Diagrama Esquemático del TMS320F2812 TRAINER KIT	6
Figura 2.3 Diagrama de bloques de la sección ADC	7
Figura 2.4 Pines del conector P10	7
Figura 2.5 Diagrama esquemático del convertidor D/A.....	8
Figura 2.6 Diagrama de bloque de la sección PWM.....	10
Figura 2.7 Pines del conector P6.....	10
Figura 2.8 Conector de alimentación eléctrica P1.....	13
Figura 2.9 Diagrama de bloques del DSP TMS320F2812	14
Figura 2.10 Equipo Intelligent Power Module	17
Figura 3.1 Gráfica de voltaje en la fuente de +5V	18
Figura 3.2 Gráfica de voltaje en la fuente de +15V	18
Figura 3.3 Gráfica de voltaje en la fuente de -15V.....	19
Figura 3.4 Gráfica de voltaje en la fuente de 300V	19
Figura 3.5 Suciedad en la Tarjeta de Indicación de velocidad.....	20
Figura 3.6 Funciones de la Tarjeta de Acondicionamiento de Señales	21
Figura 3.7 Pin roto en el Potenciómetro Iset.....	21
Figura 3.8 Pistas dañadas y pines mal soldados en los potenciómetros Vset e Iset.....	22
Figura 3.9 Opamp TL084 con pin roto	22
Figura 3.10 Salida de los optocopladores averiados	23
Figura 3.11 Trazador de Curvas ADS1042C	24
Figura 3.12 Prueba a los Optocopladores de la tarjeta de Control	24
Figura 3.13 Salida de los Optocopladores averiados visualizadas con trazador de Curvas	25
Figura 3.14 Componentes de la Tarjeta de Potencia.....	26
Figura 3.15 Diodos del Puente Rectificador Trifásico	26
Figura 3.16 Soldadura fría y suciedad en la Tarjeta Electrónica de Potencia.....	27
Figura 3.17 Pistas dañadas en la parte posterior de la Tarjeta Electrónica de Potencia.....	27
Figura 3.18 Puntos mal soldados en la parte posterior de la Tarjeta Electrónica de Potencia.....	28
Figura 3.19 Módulo de potencia PM25RSB120.....	28
Figura 3.20 Diodos en paralelo a los IGBTs	29
Figura 3.21 Pistas dañadas en los disparos de la Tarjeta de Potencia.....	29

Figura 3.22 Cables de fuente rotos y desoldados.....	30
Figura 3.23 Voltaje de salida de las Líneas U-V	31
Figura 3.24 Voltaje de salida de las Líneas V-W	31
Figura 3.25 Voltaje de salida de las Líneas U-W	31
Figura 3.26 Circuito electrónico de las fuentes +15V y -15V	32
Figura 3.27 Circuito electrónico +5v	33
Figura 3.28 Encapsulado del transistor MJ2955	33
Figura 3.29 Tarjeta de Acondicionamiento de señales	34
Figura 3.30 Conector de encoder en la parte posterior del equipo	35
Figura 3.31 Circuito electrónico utilizado para indicar la velocidad.....	36
Figura 3.32 Circuito electrónico de etapa de potencia	37
Figura 3.33 Circuito de entrada de la etapa de potencia	38
Figura 3.34 Circuito AC/DC.....	39
Figura 3.35 Circuito de detección del voltaje en la barra DC	40
Figura 3.36 Circuito electrónico de potencia.....	41
Figura 3.37 Circuito del troceador clase A	41
Figura 3.38 Circuito inversor formado por 6 IGBTs.....	42
Figura 3.39 Puente Inversor y sensores de efecto Hall	43
Figura 3.40 Circuito de fuente para los IGBTs	43
Figura 3.41 Circuito electrónico de acondicionamiento para la Línea U	44
Figura 3. 42 Circuito electrónico para el voltaje $V_{salida}=V_{TR7}$	45
Figura 3.43 Amplificador diferencial para procesar la señal de corriente de la Línea U	45
Figura 3.44 Voltaje de Salida del amplificador diferencial.....	46
Figura 3.45 Amplificador inversor para regular la ganancia de salida IB	47
Figura 3.46 Circuito de Ganancia para la corriente de la línea U	48
Figura 3.47 Circuito electrónico de acondicionamiento de la Línea V.....	48
Figura 3.48 Circuito electrónico de acondicionamiento de la Línea W.....	49
Figura 3.49 Circuito de acondicionamiento de corriente de barra DC.....	50
Figura 3.50 Circuito para regular el offset de la corriente DC	50
Figura 3.51 Divisor de voltaje de la señal de corriente de barra DC	51
Figura 3. 52 Voltaje de salida V2 del amplificador diferencial	52
Figura 3. 53 Amplificador inversor para regular la ganancia de salida.....	53
Figura 3.54 Circuito de procesamiento del voltaje de barra DC.....	54
Figura 3.55 Circuito de ganancia para la señal de voltaje de barra DC	54
Figura 3.56 Amplificador inversor para regular la ganancia de salida.....	55
Figura 3.57 Circuito de protección de barra DC.....	56

Figura 3.58 Comparador entre el voltaje de barra DC y voltaje seteado (Vset)	57
Figura 3.59 Comparador entre la corriente de barra DC y corriente seteada (Iset)	58
Figura 3.60 Conexiones del integrado flip-flop HEF4027	58
Figura 3.61 Circuito indicador de la protección de barra DC	59
Figura 3. 62 Conexión entre la puerta lógica AND y el optoacoplador A4506	61
Figura 3.63 Circuito para evitar disparos falsos de los IGBTs	61
Figura 3.64 Circuito de disparo y aislamiento usando la señal PWM1.	62
Figura 3.65 Circuitos de disparo y aislamiento usando las señales PWM4, PWM3 Y PWM2.	63
Figura 3.66 Circuitos de disparo y aislamiento usando las señales PWM5 Y PWM6.	63
Figura 3.67 Circuito de activación del troceador clase A	64
Figura 3.68 Emulador J-TAG XDS510LC	65
Figura 3.69 Distribución de pines del Puerto P2 y del emulador XDS510LC	66
Figura 3.70 Conexión entre la PC y el controlador MICRO 2812	67
Figura 3.71 Conector de alimentación del controlador MICRO 2812	67
Figura 3.72 Conexión entre el controlador MICRO 2812 y el módulo PEC16DSM01	68
Figura 3.73 Motor AC 083-4YA80	69
Figura 3.74 Conexiones de entrada y salida de la etapa de potencia del módulo PEC16DSM01	69
Figura 3.75 Encoder HEDS-5645 ubicado en el eje del motor AC	70
Figura 3.76 Distribución de pines del encoder HEDS-5645	71
Figura 3.77 Conexión entre encoder HEDS-5645 y el controlador	72
Figura 4.1 Tarjeta de indicación de velocidad limpia	73
Figura 4.2 Potenciómetros Iset y Vset soldados correctamente	74
Figura 4.3 Anillos reconstruidos para los potenciómetros Iset y Vset	74
Figura 4.4 Amplificador Operacional TL084 nuevo	75
Figura 4.5 Salida de los nuevos optocopladores visualizadas con trazador de curvas	75
Figura 4.6 Señal de salida de los nuevos optocopladores	76
Figura 4.7 Limpieza de la parte superior de la Tarjeta electrónica de potencia	76
Figura 4.8 Resoldado y limpieza de la parte posterior de la Tarjeta electrónica de potencia	77

Figura 4.9 Resoldado y reconstrucción en los disparos de la Tarjeta electrónica de potencia	77
Figura 4.10 Resoldado de cables en la fuente y en la tarjeta de potencia....	78
Figura 4.11 Voltaje de salida de las Líneas U-V	79
Figura 4.12 Voltaje de salida de las Líneas V-W	79
Figura 4.13 Voltaje de salida de las Líneas U-W	79
Figura 4.14 Frecuencia configurada en el software VisSim	80
Figura 4.15 Frecuencia aplicada al motor	81
Figura 4.16 Motor girando en el sentido de las manecillas del reloj.....	81
Figura 4.17 Velocidad de giro del motor visualizada en VisSim	81
Figura 4.18 Velocidad de giro del motor obtenida con un tacómetro	82
Figura 4.19 Frecuencia de comando de 0.32 y Velocidad del motor en 945.4 RPM visualizada en VisSim	82
Figura 4. 20 Frecuencia de 31.99 Hz aplicada al motor.....	83
Figura 4. 21 Velocidad de 946.7 RPM obtenida con tacómetro	83
Figura 4.22 Corriente de la Línea U del motor AC	83
Figura 4.23 Corriente de la Línea V del motor AC	83
Figura 4.24 Setpoint colocado en 400.4 RPM y respuesta del motor 397.3 RPM.....	84
Figura 4.25 Medición de 397.9 RPM utilizando un tacómetro.....	84
Figura 4.26 Setpoint colocado en 815.1 RPM y respuesta del motor 780.1 RPM.....	85
Figura 4.27 Medición de 797.0 RPM utilizando un tacómetro.....	85
Figura 4.28 Respuesta del motor ante una entrada sinusoidal	86
Figura 4.29 Respuesta del motor ante una entrada triangular	87
Figura 4.30 Respuesta del motor ante una entrada escalón	88

CAPÍTULO 1

1. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad el manejo de sistemas digitales constituye una pieza fundamental para el control de motores. El procesamiento digital posee un alto nivel de integración, mayor rapidez, mayor potencia y menor tamaño frente al procesamiento analógico. Por lo cual el Laboratorio de Electrónica de Potencia de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) apunta a incluir el uso de esta tecnología para la formación profesional de los estudiantes.

El Laboratorio de Electrónica de Potencia tiene a disposición el equipo MICRO 2812 que es un kit de entrenamiento DSP (Procesador digital de señal) y módulos inteligentes de potencia como el PEC16DSM01 para el desarrollo de técnicas modernas de control de motores tanto AC como DC.

El kit MICRO 2812 basado en el DSP TMS320F2812 es una herramienta muy útil y versátil principalmente para el control de motores. Al momento de adquirir este equipo el fabricante suministró un manual de funcionamiento pero dicho manual no es el correspondiente al equipo MICRO 2812, sino a uno similar.

Por lo cual si se requiere utilizar el kit MICRO2812 no se dispone de mucha información acerca de la función de los elementos presentes en la tarjeta electrónica, la forma de conexión de los puertos como el JTAG y CPLD, localización de entradas y salidas analógicas o digitales, ADC, entre otras. Debido a esto se realizará una investigación detallada de la tarjeta del kit MICRO2812.

El módulo inteligente de potencia PEC16DSM01 posee varias tarjetas electrónicas tales como fuente, sección de potencia, sección de acondicionamiento de señales y sección de encoder, de las cuales no se conoce

los diagramas electrónicos, la forma de conexión, funcionamiento o el estado en que se encuentran los elementos.

Dado que este equipo ha estado guardado y sin utilizarse existe la probabilidad de que por suciedad o polvo los elementos de las tarjetas electrónicas tanto integrados como pistas tengan fallas de continuidad provocando errores al momento de utilizar este equipo. Es por ello que los diagramas electrónicos son de crítica importancia para saber cómo funciona exactamente el equipo y en caso de que ocurra alguna falla eléctrica en alguna parte de las tarjetas, tendremos una idea de donde podría estar localizada y así resolverla sin emplear tiempo innecesario.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Repotenciar el equipo Intelligent Power Module para el control de un motor AC mediante el DSP 320F2812 embebido en el equipo MICRO 2812.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Programar la tarjeta electrónica MICRO 2812 para realizar el control vectorial y escalar de un motor AC mediante el software VisSim.
- Aplicar ingeniería inversa al equipo Intelligent Power Module para obtener el diagrama electrónico de la etapa de potencia.
- Realizar un manual de usuario del equipo Intelligent Power Module.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes

El laboratorio de Electrónica de Potencia de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) es uno de los laboratorios más importantes para el desarrollo profesional del estudiante de la carrera de Electrónica y Automatización Industrial, es por esta razón que el mismo fue equipado con tecnología moderna en el año 2011, sin embargo, no se ha utilizado hasta la actualidad.

Los equipos Intelligent Power Module y Trainer Kit MICRO 2812 fueron fabricados por la empresa India Vi Microsystems en el año 2011, estos equipos tienen la capacidad de realizar diferentes tipos de control para motores eléctricos. Esta es la razón por la cual fueron adquiridos, para realizar prácticas en las que los estudiantes se familiaricen no solo con los elementos de potencia tales como IGBTs, puente rectificador trifásico, chopper, sino que además de elementos de control digitales como el procesador digital de señal o por sus siglas en inglés DSP (Digital Signal Processing).

Estos equipos una vez adquiridos por la universidad para el laboratorio de Electrónica de Potencia fueron guardados en bodega hasta su utilización en este proyecto de materia integradora. Una vez extraídos los equipos de la bodega se observaron ciertos desperfectos, producto de la no utilización del equipo.

En el módulo de potencia Intelligent Power Module se encontraron ciertas fallas como: capacitores que carecían de conexión hacia la tarjeta por falta de soldadura, conectores y buses datos desconectados, potenciómetros dañados y terminales de alimentación con poca fijación con el módulo.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Elementos del sistema

Para aplicar técnicas de control en un motor AC se utiliza la estructura de un variador de frecuencia, el cual está formado por una sección de control y una sección de potencia. En la sección de control se generan los disparos para los IGBTs utilizando técnicas de modulación con el vector espacial, se manejan entradas analógicas, etc. En la sección de potencia, mediante la conmutación de los IGBTs se controla el movimiento del motor. A continuación en la figura 2.1 se muestran los elementos que intervienen en el desarrollo de las técnicas de control.

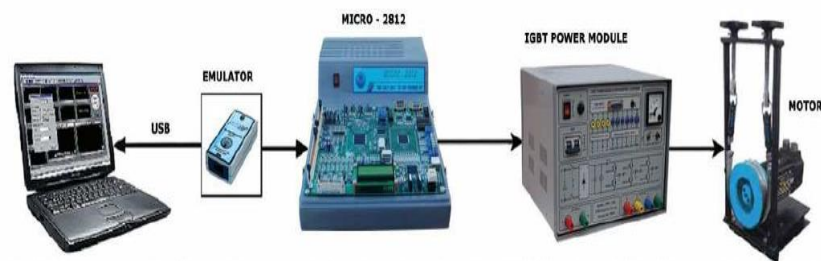


Figura 2.1 Elementos para el desarrollo de técnicas de control

Se utilizará un computador con el programa VisSim/ECD, además es muy importante recalcar que el sistema operativo debe ser Windows XP ya que versiones posteriores de Windows generan problemas en el momento de la instalación del software.

El computador se conecta con el emulador XDS510LC USB JTAG cuya función es realizar la transferencia de datos desde la PC (puerto USB) hacia el equipo MICRO 2812 y viceversa utilizando una interface JTAG (Joint Test Action Group) [6].

El equipo MICRO 2812 es el controlador del sistema, el cual maneja tanto salidas como entradas necesarias para el control del motor. Dicho equipo tiene embebido el DSP TMS320F2812, al cual se cargarán los programas para así monitorear el proceso o desarrollo del proyecto en tiempo real a través de la PC.

Una vez que se transfiera o cargue el programa en el DSP se conectará el equipo MICRO 2812 al módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, dicho módulo contiene un puente inversor compuesto por seis IGBTs.

Se conectará el motor a la salida de dicho puente inversor y mediante la conmutación de los IGBTs controlamos el motor. A continuación se describen un poco más en detalle las características de los equipos utilizados en el desarrollo de las técnicas de control.

MICRO 2812 TRAINER KIT

Micro 2812 es un kit de entrenamiento DSP de punto fijo de 16 bits basado en el procesador DSP TMS320F2812. Este kit permite al usuario aprender los conceptos básicos del procesamiento digital de señales y control digital junto con muchas otras funciones básicas del DSP como filtrado, generación de PWM, manejo de señales analógicas, etc.

Dada la versatilidad que posee el kit se pueden implementar algoritmos muy complejos en tiempo real, como por el ejemplo el control de motores. Tiene embebido el microprocesador DSP TMS320F2812, cuyas características se verán más adelante en este capítulo. En la figura 2.2 se muestra el diagrama esquemático del equipo MICRO 2812 con todas sus partes.

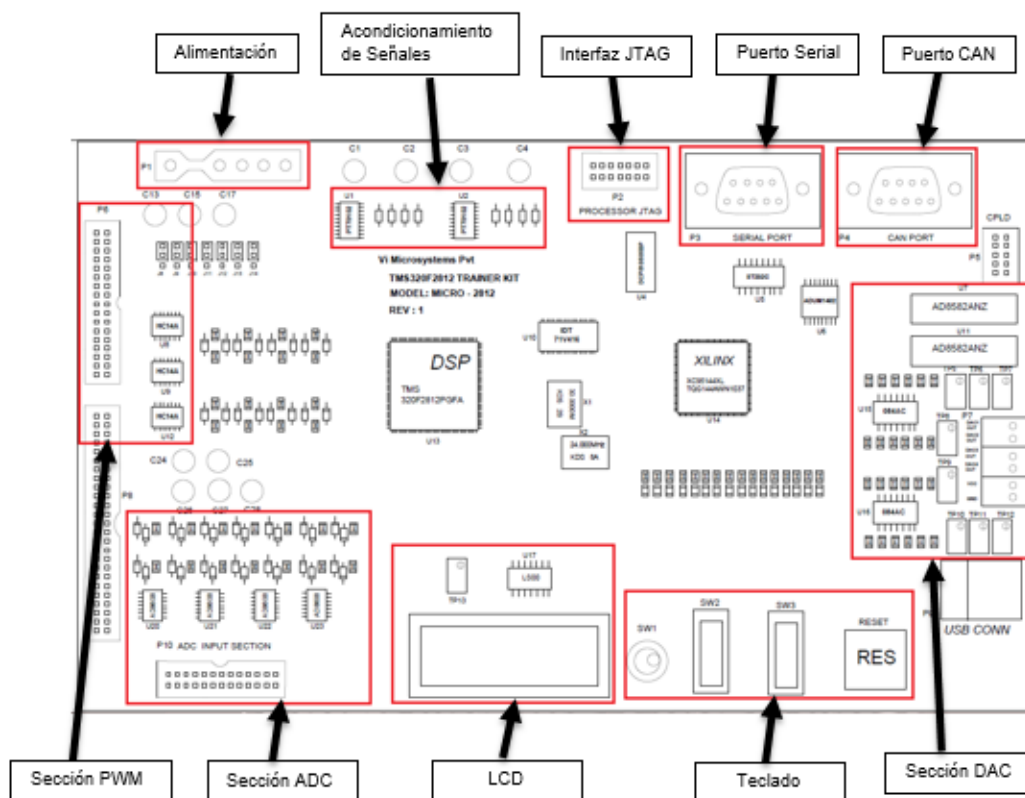


Figura 2.2 Diagrama Esquemático del TMS320F2812 TRAINER KIT

El kit MICRO 2812 consiste de las siguientes partes:

- Sección ADC
- Sección DAC
- Sección PWM
- LCD y Teclado
- Acondicionamiento de Señales
- Comunicación Serial y CAN

Sección ADC

El kit 2812 posee 16 canales ADC los cuales se encuentran en el conector P10, dicho conector P10 tiene 26 pines, los 10 pines restantes son tierra. Las señales analógicas de entrada se almacenan en un búfer usando los circuitos integrados AD8608 (U20, U21, U22 y U23). Cada uno de estos elementos (AD8608) consta de 4 búferes, uno para cada una de las 16 entradas analógicas. Antes de llegar al DSP las entradas analógicas pasan por una sección de protección, la cual se construye utilizando zeners para prevenir un voltaje superior a 3.3 V en el microprocesador DSP. En la figura 2.3 se presenta el diagrama de bloques de la sección ADC.

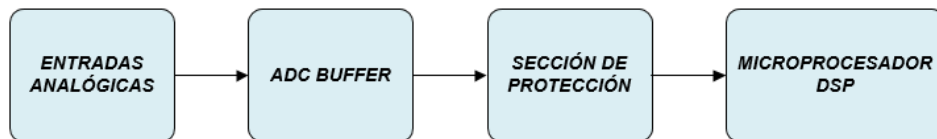


Figura 2.3 Diagrama de bloques de la sección ADC

En la figura 2.4 se muestra la asignación de pines del conector P10.

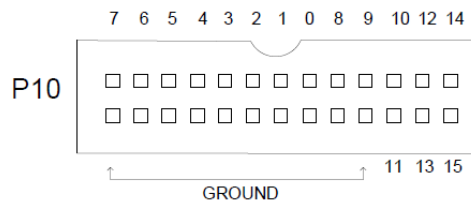


Figura 2.4 Pines del conector P10

En la tabla 1 se muestra el detalle de los pines del conector P10 correspondiente a la interfaz analógica a digital.

Pin	Detalle	Pin	Detalle
0	ADCINA0	9	ADCINB1
1	ADCINA1	10	ADCINB2
2	ADCINA2	11	ADCINB3
3	ADCINA3	12	ADCINB4
4	ADCINA4	13	ADCINB5
5	ADCINA5	14	ADCINB6
6	ADCINA6	15	ADCINB7
7	ADCINA7	16,17,18,19	GND
8	ADCINB0	20,21,22,23,24,25	GND

Tabla 1: Detalle de pines de Interfaz Analógica a Digital

Sección DAC (Conversión digital analógica)

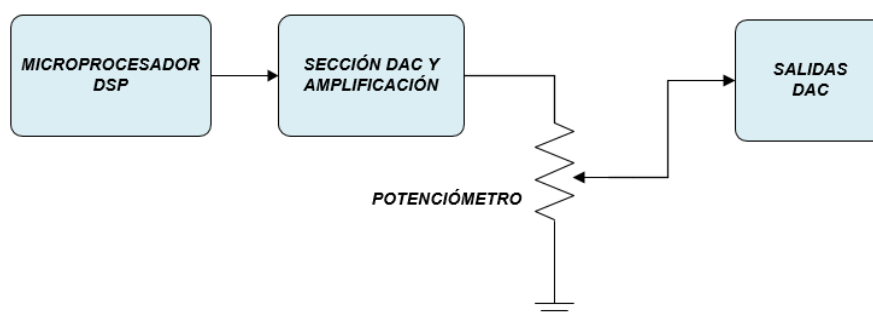


Figura 2.5 Diagrama esquemático del convertidor D/A

Como se observa en el diagrama de la figura 2.5 la sección DAC está compuesta por los integrados de conversión y amplificación, y por los potenciómetros de ajuste. Las salidas digitales del microprocesador DSP se

convierten a analógicas utilizando el circuito integrado AD8582 (U7 y U11). Cada uno de estos integrados posee 2 salidas. La salida del convertidor digital a analógico es de baja tensión, por lo tanto, los integrados TL084 (U15 y U16), que son amplificadores operacionales, se colocan a la salida del DAC para amplificar dicha salida. Además, en la sección DAC se tienen ocho potenciómetros, que se utilizan para ajustar la ganancia y el offset de cada una de las salidas.

El conector P7 es la salida del DAC, donde se tienen 6 pines, de los cuales cuatro son las salidas propiamente dichas y los dos pines restantes son +5V y tierra. En la tabla 2 se muestra la función de cada uno de los potenciómetros de la sección DAC.

Potenciómetro	Función
TP5	Offset Salida 2
TP6	Ganancia Salida 2
TP7	Ganancia Salida 1
TP8	Offset Salida 1
TP9	Offset Salida 4
TP10	Offset Salida 3
TP11	Ganancia Salida 3
TP12	Ganancia Salida 4

Tabla 2: Detalle de pines de sección DAC

Sección PWM

En la sección de PWM se tienen tres integrados HC14A (U8, U9 Y U12). Las salidas PWM por defecto son señales de nivel lógico alto, por lo cual se utilizan los HC14A, que son puertas inversoras para invertir las salidas PWM con el fin de evitar disparos falsos o disparos producidos por fallas. El conector de 34 pines (P6) es la salida de la sección PWM. En este conector se tiene las salidas PWM, señales de TIMER, captura de entradas, alimentación (+5V) y tierra. En la figura 2.6 se muestra el diagrama de bloques de la sección PWM.

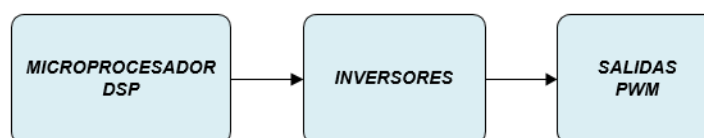


Figura 2.6 Diagrama de bloque de la sección PWM

En la figura 2.7 se muestra la asignación de pines del conector P6.

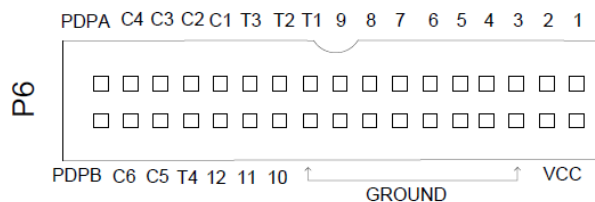


Figura 2.7 Pines del conector P6

En la tabla 3 se describe los pines correspondientes a la sección PWM.

Pin	Detalle	Pin	Detalle
1	PWM1H	C3	CAP3
2	PWM2H	C4	CAP4
3	PWM3H	PDPA	PDPINTA
4	PWM4H	VCC	+5v
5	PWM5H	VCC	+5v
6	PWM6H	10	PWM10H
7	PWM7H	11	PWM11H
8	PWM8H	12	PWM12H
9	PWM9H	T4	T4 PWMCMP
T1	T1 PWMCMP	C5	CAP5
T2	T2 PWMCMP	C6	CAP6
T3	T3 PWMCMP	PDPB	PDPINTB1-
C1	CAP1	GROUND	Tierra
C2	CAP2		

Tabla 3: Detalle de pines sección PWM

LCD y Teclado

La pantalla LCD está conectada directamente a la DSP, y el potenciómetro TP13 se utiliza para manejar el brillo de la pantalla. El teclado consiste en cuatro botones, los cuales se conectan al microprocesador DSP a través de los circuitos integrados LS00 que son puertas NAND. La función de dichas puertas es asegurar que la señal proveniente de los botones sea de nivel alto.

En la tabla 4 se describen cada una de las funciones de los interruptores de la tarjeta TMS320F2812 TRAINER KIT. En el modo 1 (modo serie) el kit está configurado para comunicarse con la PC a través del puerto serial, y en el modo 2 (modo independiente), el usuario puede interactuar con el kit a través de los botones y la pantalla LCD de 16 x 2.

Interruptor	Función
SW1	Selecciona entre el modo 1 o el modo 2
SW2	Entrada 1
SW3	Entrada 2
SW4	Reset

Tabla 4: Función de los interruptores de la tarjeta TMS320F2812 TRAINER KIT

Acondicionamiento de Señales

La tarjeta electrónica es alimentada a través del conector P1. Posee cuatro entradas de voltaje: +5V, +10V, -10V y GND. Debido a que el microprocesador DSP necesita un voltaje de alimentación de 1.8V es necesario acondicionar la señal de 5V a 1.8V, por lo cual se coloca el circuito integrado (PT102) entre la fuente de alimentación y el microprocesador. Este integrado también tiene una salida de voltaje de 3.3V necesarios para

alimentar la CPLD XC95144. En la figura 2.8 se muestra el conector de alimentación eléctrica P1.

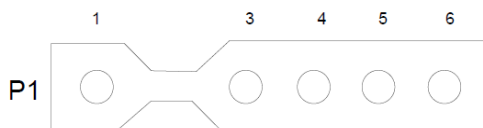


Figura 2.8 Conector de alimentación eléctrica P1

La tabla 5 muestra la función de cada pin del conector de alimentación eléctrica P1.

Pin	Función
1	GND o Tierra
3	-10V
4	+10V
5	NC
6	+5V

Tabla 5: Función de los pines del conector P1

Comunicación Serial y CAN

Para operar el kit a través de la PC, se utiliza un detector de nivel ST232 (U5), que sirve para enviar y recibir datos a través del puerto serial. Además de esto se utiliza el integrado ADUM1402 (U6) que es un aislador, el cual se coloca entre los puertos Serial, Can y la DSP, para aislar el lado del puerto serial de alto voltaje del lado del microprocesador de bajo voltaje [1].

DSP TMS320F2812

El controlador TMS320F2812 DSP es un controlador digital programable. El controlador está constituido por la CPU, memoria y los diferentes periféricos, figura 2.9

El controlador ofrece 60 MIPS (millones de instrucciones por segundo) de rendimiento. Este rápido rendimiento es muy adecuado para el procesamiento de parámetros de control en aplicaciones donde gran cantidad de cálculos deben realizarse rápidamente [2].

El Diagrama de bloques del DSP TMS320F2812 se puede dividir en 4 bloques funcionales:

- Sistema de bus interno y externo
- Unidad Central de Procesamiento (CPU)
- Memoria
- Periféricos

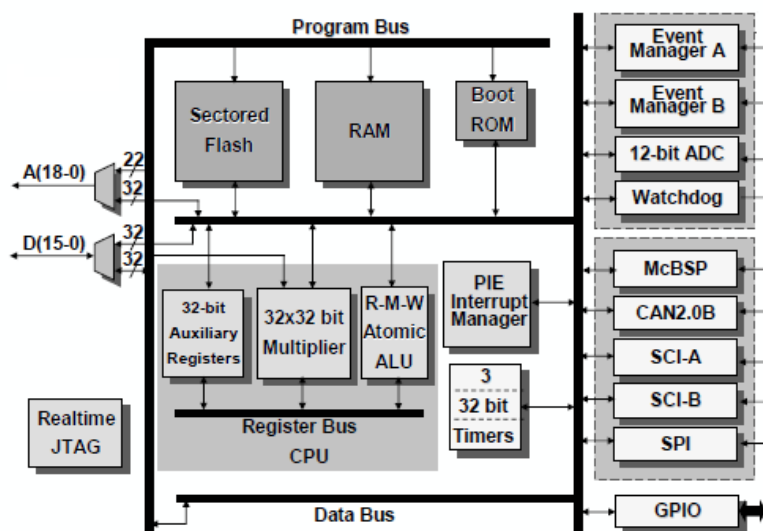


Figura 2.9 Diagrama de bloques del DSP TMS320F2812

Este microprocesador tiene la capacidad de extraer dos datos de la memoria de la unidad central de proceso en un solo ciclo de reloj, para esto el F2812 está equipado con dos sistemas de buses independientes: bus de programa y bus de datos. Esta habilidad de operar con datos tanto de la memoria de datos como de la memoria de programa se denomina “arquitectura de Harvard” [7].

CPU F2812

El F2812-CPU es capaz de ejecutar la mayoría de las instrucciones para realizar operaciones de registro a registro, desempaqueado y manipulación de bits en un solo ciclo.

La arquitectura también es apoyada por poderosos modos de direccionamiento, que permiten al usuario generar código compacto a través de lenguaje C, ensamblador o programación gráfica.

Además, posee tres temporizadores de 32 bits, un administrador de expansión de Interrupción Periférica (PIE) que permite una rápida respuesta de interrupción a las diversas fuentes de señales externas e internas, un multiplicador de hardware de 32 por 32 bits y una unidad lógica aritmética de 32 bits (ALU) que permite ejecutar operaciones de multiplicación y adición simultáneamente.

La interfaz JTAG es una herramienta muy potente para realizar el intercambio de datos en tiempo real entre la PC y el DSP. Es posible observar y modificar variables mientras el código se ejecuta en tiempo real, sin ninguna demora en el código de control.

Sistema de bus interno y externo

Al igual que con muchos dispositivos de tipo DSP, se utilizan múltiples buses para mover datos entre ubicaciones de memoria, unidades periféricas y la CPU. La arquitectura del bus de memoria F2812 contiene bus de lectura de programa, bus de lectura de datos y bus de escritura de datos.

Memoria

El espacio de memoria en el F2812 se divide en memoria de programa y de datos. Hay varios tipos diferentes de memoria disponibles que se pueden utilizar como memoria de programa o de datos las cuales son: memoria flash, RAM de acceso único (SARAM) y ROM. El ancho del espacio de memoria es siempre de 16 bits [5].

Periféricos

El F2812 admite los siguientes periféricos que se utilizan para el control y la comunicación:

- Dos Módulos de gestión de eventos o Event Manager (EVA, EVB).
- Un módulo convertidor de Analógico Digital (ADC) de 12 bits.
- Periféricos de comunicación serial.

Software VisSim/ECD

VisSim/ECD es un entorno visual creado por TI Visual Solutions para el desarrollo basado en modelos y la simulación dinámica de sistemas complejos. Combina una interfaz gráfica intuitiva con un poderoso motor matemático para representar con precisión los sistemas lineales y no lineales, y simular su comportamiento en tiempo continuo, tiempo muestreado, o una combinación de ambos. Es muy versátil, ya que permite el manejo desde una simple salida PWM hasta un elaborado control PID.

Además, el entorno de desarrollo integrado de VisSim facilita las etapas de construcción de modelos, simulación, optimización, validación y generación de código, lo que le permite crear, verificar y validar prototipos antes de comprometerse con el diseño [3].

Intelligent Power Module (PEC16DSM01)

El equipo Intelligent Power Module (PEC16DSM01), el cual se muestra en la figura 2.10, es un módulo de potencia desarrollado por la compañía Vi Microsystems Pvt que permite el control tanto de motores AC como DC. Dicho módulo está formado principalmente por un puente rectificador trifásico, los condensadores de la barra DC, un troceador (chopper) clase A y un puente inversor compuesto de seis IGBTs [4]. Las características de este equipo se analizarán en detalle en el capítulo siguiente.

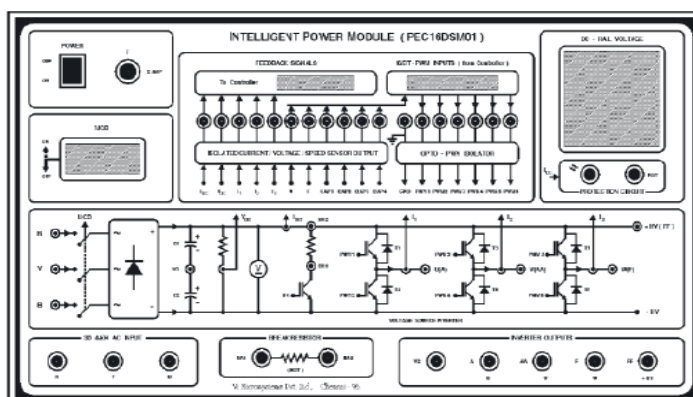


Figura 2.10 Equipo Intelligent Power Module

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1. Repotenciación del módulo de potencia PEC16DSM01

El módulo de potencia PEC16DSM01 está formado por cuatro tarjetas electrónicas, las cuales tienen que estar en buen estado para el correcto funcionamiento del equipo.

Para realizar la repotenciación del módulo se revisó detalladamente cada tarjeta electrónica en busca de posibles fallas o daños. Una vez identificados dichos fallos, se procedió a corregirlos. En esta sección se detallan los métodos, procesos y técnicas que se usaron para la reparación de las tarjetas electrónicas.

3.1.1. Tarjeta Electrónica de Fuentes DC

Se empezó por revisar las tres fuentes de alimentación DC del módulo que son +5, +15, y -15V. Estos voltajes se utilizan para alimentar a todas las tarjetas electrónicas del módulo, por lo cual es muy importante que se encuentren en buen estado. Para comprobar que las fuentes funcionan correctamente se midió en los terminales de las mismas utilizando un osciloscopio y las formas de onda se muestran en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3.



Figura 3.1 Gráfica de voltaje en la fuente de +5V



Figura 3.2 Gráfica de voltaje en la fuente de +15V

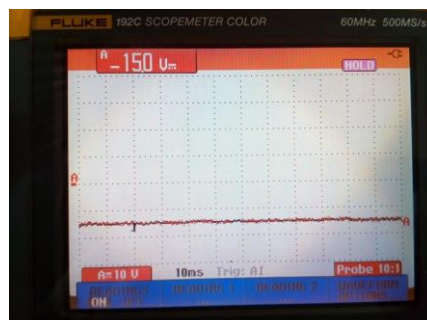


Figura 3.3 Gráfica de voltaje en la fuente de -15V

Se puede observar que todas las fuentes funcionan correctamente por lo tanto no es necesario realizar ninguna corrección en la tarjeta de fuentes DC. Adicionalmente, en el equipo se tiene otra fuente ubicada en la tarjeta de indicación de velocidad, cuya función es generar los voltajes de alimentación para los IGBTs del puente inversor. Esta fuente es de aproximadamente 300Vdc, se midió con el osciloscopio y su forma de onda se observa en la figura 3.4.

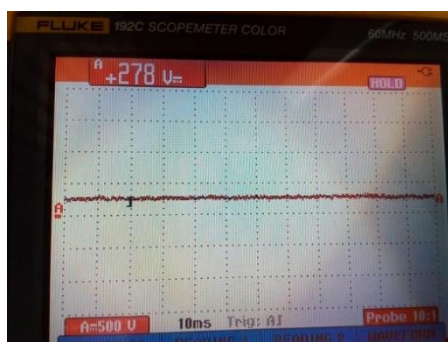


Figura 3.4 Gráfica de voltaje en la fuente de 300V

Como se observa en la figura 3.4 el nivel de voltaje es de 278V, el cual es muy bajo en comparación a los 300V nominales necesarios para generar los voltajes de alimentación para los IGBTs del puente inversor. Esta caída de tensión en la fuente se da debido a que el equipo está diseñado para alimentarse con 230Vac, pero en el Laboratorio de Electrónica de Potencia solo se dispone de 208Vac. Dado que la entrada alterna es menor, el voltaje de salida también es menor, pero la diferencia de 20 Vdc en la fuente no

produce ningún error en la generación de los voltajes para los IGBTs. Adicionalmente se encontró que la tarjeta se encontraba muy sucia figura 3.5 debido a todo el tiempo que el equipo estuvo sin utilizarse.

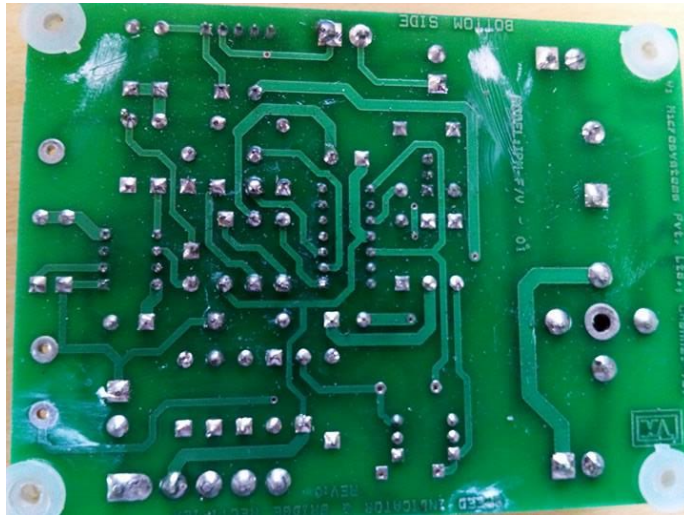


Figura 3.5 Suciedad en la Tarjeta de Indicación de velocidad

3.1.2. Tarjeta Electrónica de Acondicionamiento de Señales

En la tarjeta electrónica de la figura 3.6 se realizan tres procesos importantes, el procesamiento de las señales PWM de disparo para los IGBTs, la adquisición de las corrientes de línea y la protección contra cortocircuitos en la barra DC. Para comprender mejor el funcionamiento de esta tarjeta electrónica se sugiere revisar el diagrama electrónico del equipo en la sección 3.2 de este capítulo.

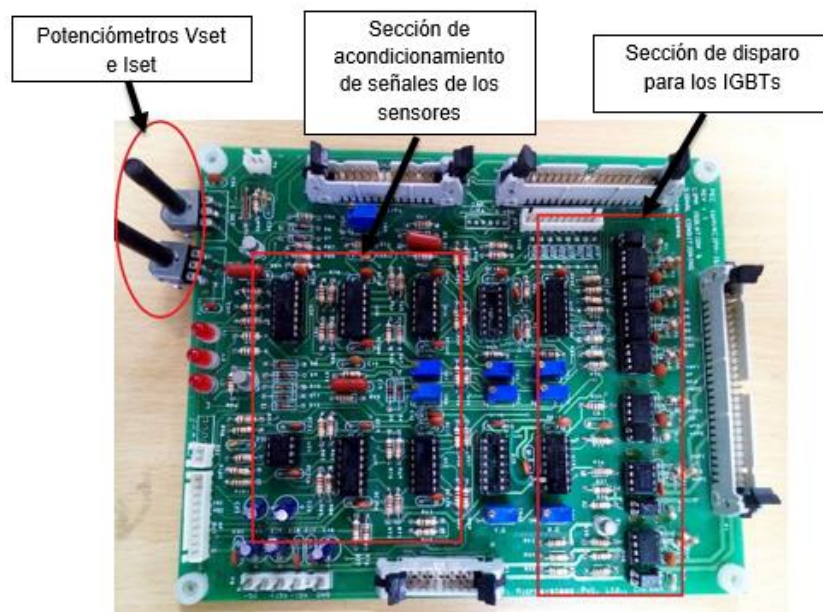


Figura 3.6 Funciones de la Tarjeta de Acondicionamiento de Señales

En primer lugar se revisó la sección de protección de la barra DC, en donde se encontró que los potenciómetros que setean los valores máximos permitidos de voltaje y corriente de barra DC, Vset e Iset respectivamente no estaban adecuadamente soldados a la tarjeta, e incluso tenían pines rotos.



Figura 3.7 Pin roto en el Potenciómetro Iset

Dado que el potenciómetro que se observa en la figura 3.7 no es fácil de conseguir en el mercado local, y que se tiene dos tarjetas electrónicas de acondicionamiento de señales, se reemplazó el potenciómetro que tenía los pines rotos por uno de los potenciómetros de la segunda tarjeta que estaba en buen estado. Además, se tenían pérdidas de continuidad entre los potenciómetros y la tarjeta electrónica, debido a que algunas pistas

estaban levantadas, y se habían perdido algunos anillos de soldadura. Se reconstruyó las pistas y se resolvió los potenciómetros como se muestra en la figura 3.8, además se ajustó los valores de resistencia de los mismos para evitar que el equipo se alarme por falsa detección de cortocircuito en la barra DC.

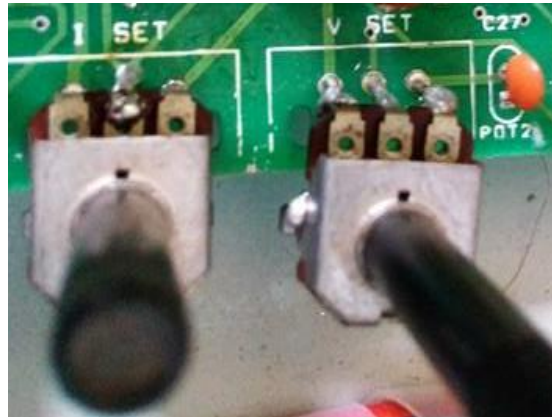


Figura 3.8 Pistas dañadas y pines mal soldados en los potenciómetros Vset e Iset

Luego, se revisó los amplificadores operacionales TL084 de la sección de acondicionamiento de las señales de voltaje obtenidas a través de los sensores de efecto Hall, figura 3.9, y se encontró que el integrado U17 (véase figuras 3.60 y 3.61) se calentaba mucho, produciendo errores en el funcionamiento del circuito. Al extraerlo se notó que tenía un pin roto, por lo cual se lo reemplazó.

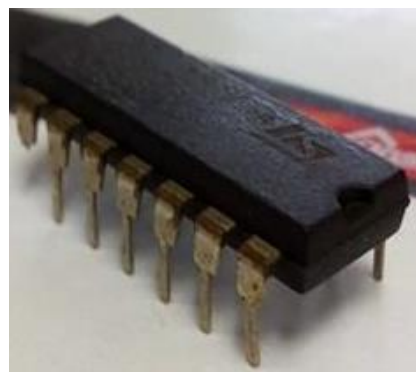


Figura 3.9 Opamp TL084 con pin roto

Los amplificadores operacionales restantes de esta sección estaban en buen estado, por lo que no fue necesario reemplazarlos.

Por último, en ésta sección, se revisó la etapa de disparo para los IGBTs, la cual consiste en dos puertas AND CD4081 y seis optocopladores A4506. Para la revisión de los pulsos de disparo en la salida de los optocopladores se utilizó un osciloscopio y la forma de onda se muestra en la figura 3.10.

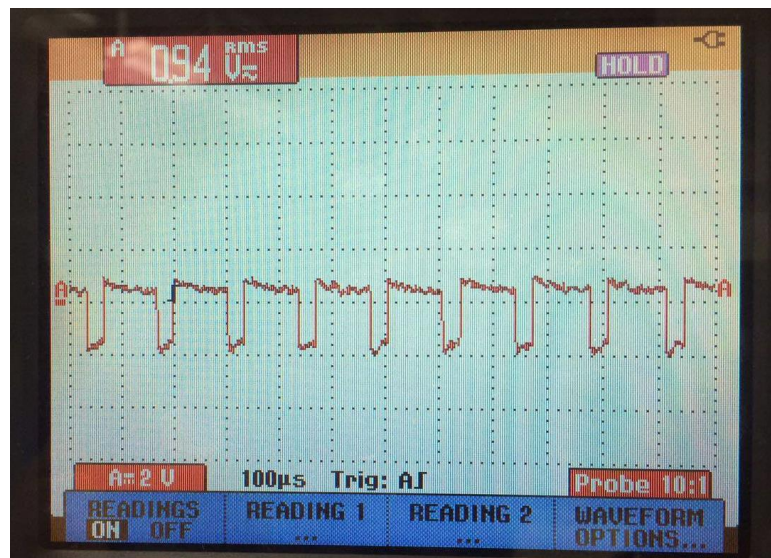


Figura 3.10 Salida de los optocopladores averiados

Como se observa en la figura 3.10 los disparos no se realizan de manera correcta. Este error se produce en los optocopladores U3 y U8, por lo que se los extrajeron para revisarlos. Para la revisión de estos integrados se utilizó un trazador de curvas, figura 3.11, con el cual inyectamos un voltaje DC a los integrados y observamos su respuesta a dicho voltaje.



Figura 3.11 Trazador de Curvas ADS1042C

Se inyectaron 10V a los optocopladores con el trazador de curvas, figura 3.12, y se encontró que en la salida de los integrados se tiene una ruptura de voltaje, como se observa en la figura 3.13.

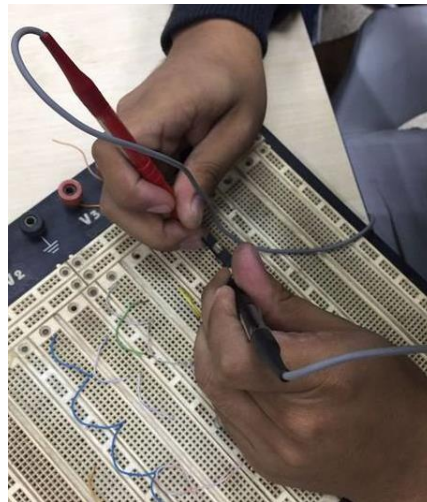


Figura 3.12 Prueba a los Optocopladores de la tarjeta de Control

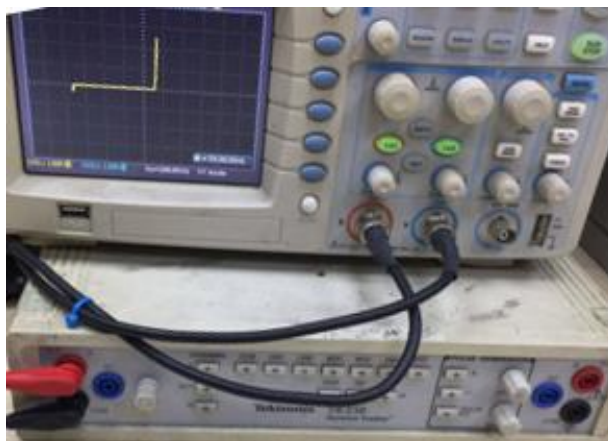


Figura 3.13 Salida de los Optocopladores averiados visualizadas con trazador de Curvas

Los optocopladores A4506, no se encuentran comercialmente en el país, por lo que no se pudo comprar nuevos integrados para reemplazar los dañados. Como se mencionó anteriormente se dispone de dos tarjetas electrónicas de acondicionamiento de señales, por lo que se extrajeron tres optocopladores de la segunda tarjeta y se reemplazaron en lugar de los dos dañados.

3.1.3. Tarjeta Electrónica de Potencia

La tarjeta de potencia, la cual se muestra en la figura 3.14 es la más importante para el funcionamiento del equipo ya que en ella se encuentra el módulo de potencia inteligente, que permitirá realizar el control de motores AC. Además del módulo de potencia, se tienen otros elementos importantes a revisar como el puente rectificador, capacitores de barra DC y las fuentes de +15V para los disparos de los IGBTs.

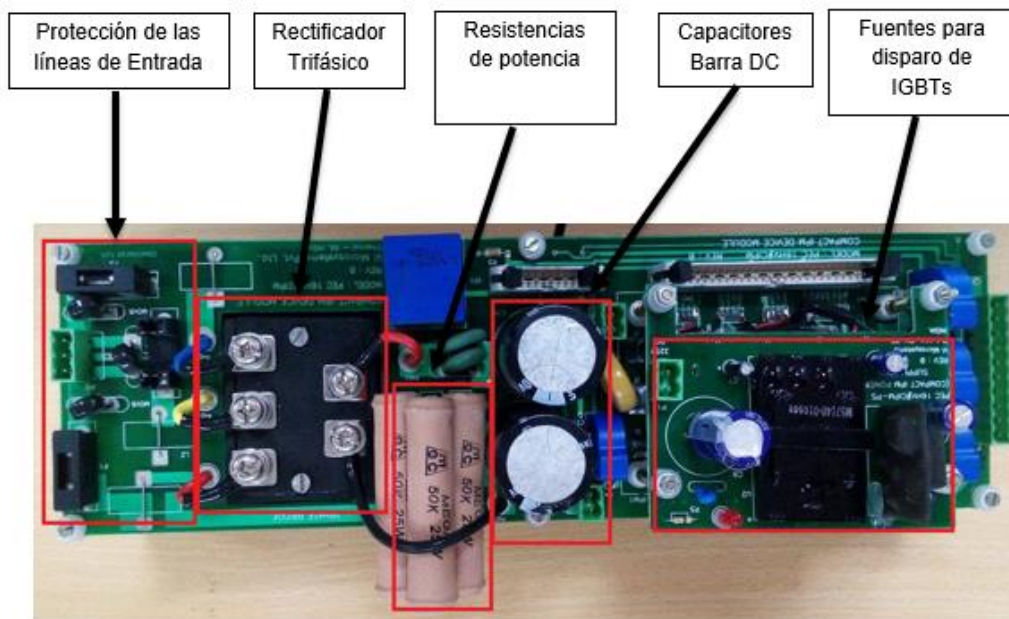


Figura 3.14 Componentes de la Tarjeta de Potencia

La revisión de la tarjeta empezó con la sección de entrada, donde se comprobó que los dispositivos de protección como son fusibles y varistores funcionaban adecuadamente.

En el caso del rectificador trifásico no controlado, se revisó que ninguno de los seis diodos que tiene internamente estén abiertos figura 3.15, es decir la caída de voltaje en cada diodo es la misma.

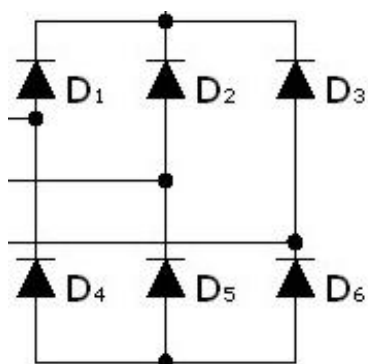


Figura 3.15 Diodos del Puente Rectificador Trifásico

Al revisar la parte posterior de tarjeta de potencia se encontró soldadura fría en varios elementos tales como los capacitores de barra DC como se observa en la figura 3.16, termistores de protección contra sobre temperatura y el mismo módulo de potencia. Además, uno de los tres termistores del equipo estaba explotado, por lo que se reemplazó por un termistor en buen estado que se extrajo de la tarjeta de potencia del segundo equipo.

También, se encontró pistas abiertas desde los pines del módulo de potencia hacia el conector de salida de la tarjeta electrónica como se muestra en las figuras 3.17 y 3.18, causando graves errores en los voltajes de salida hacia el motor.



Figura 3.16 Soldadura fría y suciedad en la Tarjeta Electrónica de Potencia

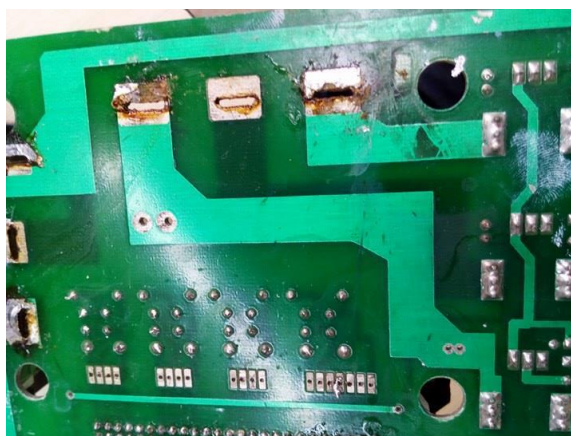


Figura 3.17 Pistas dañadas en la parte posterior de la Tarjeta Electrónica de Potencia

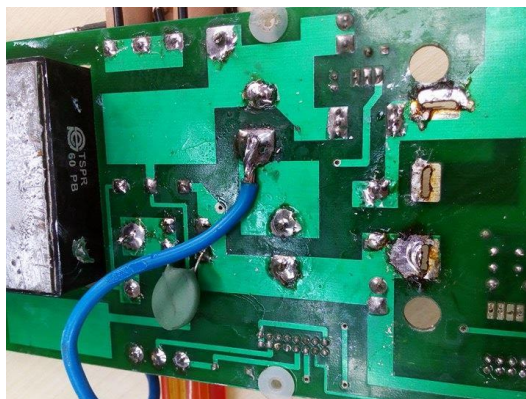


Figura 3.18 Puntos mal soldados en la parte posterior de la Tarjeta Electrónica de Potencia

Además de volver a soldar los puntos con soldadura fría y limpiar la suciedad de la tarjeta, se extrajo el módulo de potencia PM25RSB120 Figura 3.19 para realizarle pruebas.

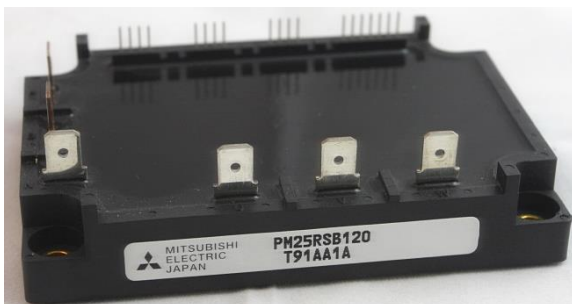


Figura 3.19 Módulo de potencia PM25RSB120

Para realizar las pruebas al módulo nuevamente se utilizó el trazador de curvas, en el cual se inyectó un voltaje DC y se observó la respuesta del módulo a dicho voltaje. Se aplicó voltaje a pasos desde 20V hasta un máximo de 60Vdc, y se midió entre U, V y W y el terminal positivo de la barra DC, y luego entre el terminal negativo de la barra DC y las líneas U, V y W. En la medición se buscó que al incrementar los pasos de voltaje, la curva característica del diodo no se pierda, sino que se mantenga constante. En la figura 3.20 se muestran los IGBTs con su respectivo diodo donde se realiza prueba.

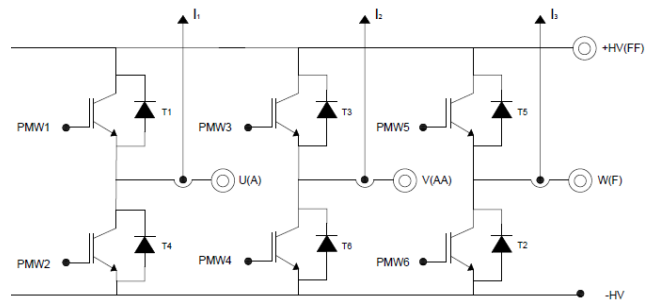


Figura 3.20 Diodos en paralelo a los IGBTs

Al realizar la prueba con el trazador de curvas se determinó que el módulo de potencia se encontraba en perfecto estado, por lo que el mismo se volvió a soldar en la tarjeta.

La tarjeta de potencia también tenía daños en la entrada de los disparos al módulo de potencia, en donde se tenían pérdidas de continuidad debido a varias pistas dañadas, figura 3.21.

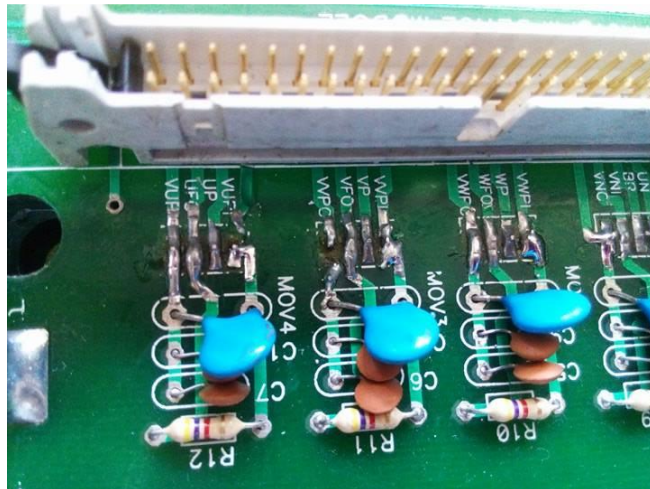


Figura 3.21 Pistas dañadas en los disparos de la Tarjeta de Potencia

Después de soldar el módulo de potencia a la tarjeta electrónica, se reconstruyó las pistas, y se comprobó la continuidad con ayuda de un multímetro.

3.1.4. Fuente para los disparos de los IGBTs

La fuente para los disparos de los IGBTs consiste en dos convertidores DC-DC. El primero reduce el voltaje de 300V a 20V, y el segundo transforma 20V de entrada en 4 fuentes de +15V, con las cuales se alimentan los IGBTs.

Al igual que en la tarjeta de potencia, se encontró capacitores y resistencias mal soldadas, lo cual producía inestabilidad en las fuentes. Además, se utilizan ocho cables para realizar la conexión entre las fuentes y los IGBTs, los cuales estaban desoldados e incluso rotos.

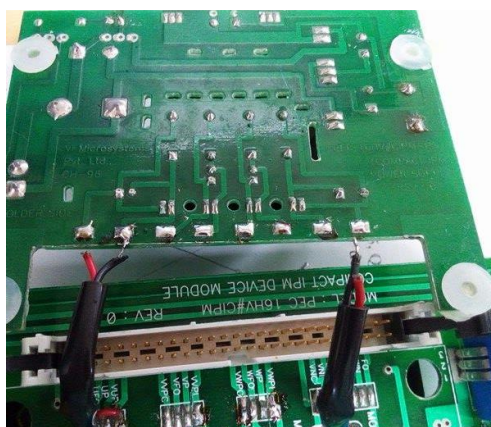


Figura 3.22 Cables de fuente rotos y desoldados

En la figura 3.22 se observa el estado de los cables, por lo que se los reemplazó por cables nuevos, y se volvió a soldar tanto en la fuente como en la tarjeta de potencia.

Gráficas de Salida del Módulo de Potencia

A continuación, en las figuras 3.23, 3.24 y 3.25 se muestran los voltajes de salida del inversor antes de la reparación del equipo. Dichos voltajes deben ser iguales para las tres líneas de salida y además deben alcanzar el valor de 300V.

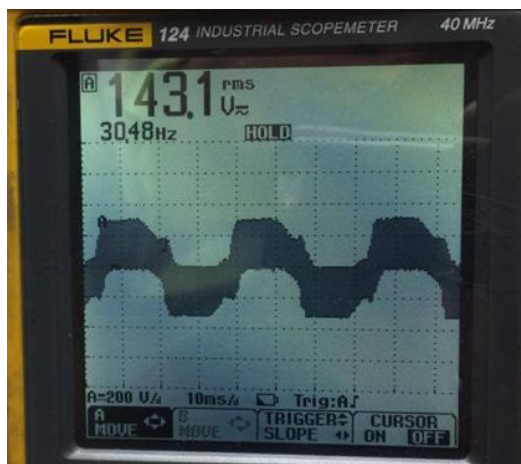


Figura 3.23 Voltaje de salida de las Líneas U-V

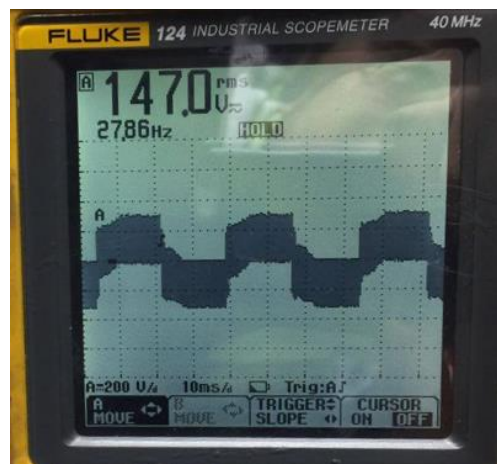


Figura 3.24 Voltaje de salida de las Líneas V-W

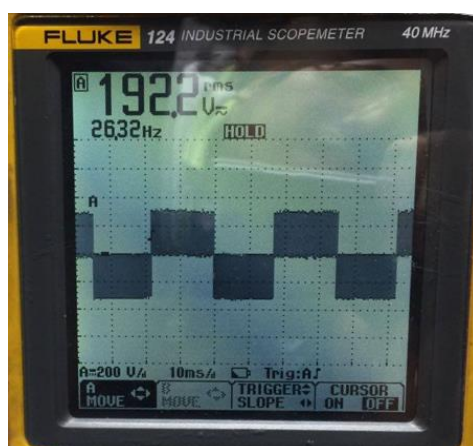


Figura 3.25 Voltaje de salida de las Líneas U-W

Se puede observar que la única salida correcta es el voltaje U-W, mientras que los voltajes restantes muestran patrones irregulares y ruido. Al conectar estas señales al motor se producía un calentamiento excesivo en el mismo, además de que no giraba de manera adecuada.

Luego de realizar todas las reparaciones mostradas en esta sección, el equipo quedó funcional y se pudo desarrollar las tres prácticas de control para un motor AC.

Los resultados de las reparaciones realizadas a las tarjetas electrónicas se muestran en el capítulo resultados.

3.2. Diagrama electrónico del equipo PEC16DSM01

En esta sección se mostrara los circuitos electrónicos de las distintas tarjetas que forman el modulo y se describirá su funcionamiento en detalle.

3.2.1. Circuito electrónico de las fuentes +15V, -15V y +5V

Para alimentar los circuitos electrónicos del equipo se necesitan voltajes de +15V, -15V y +5V.

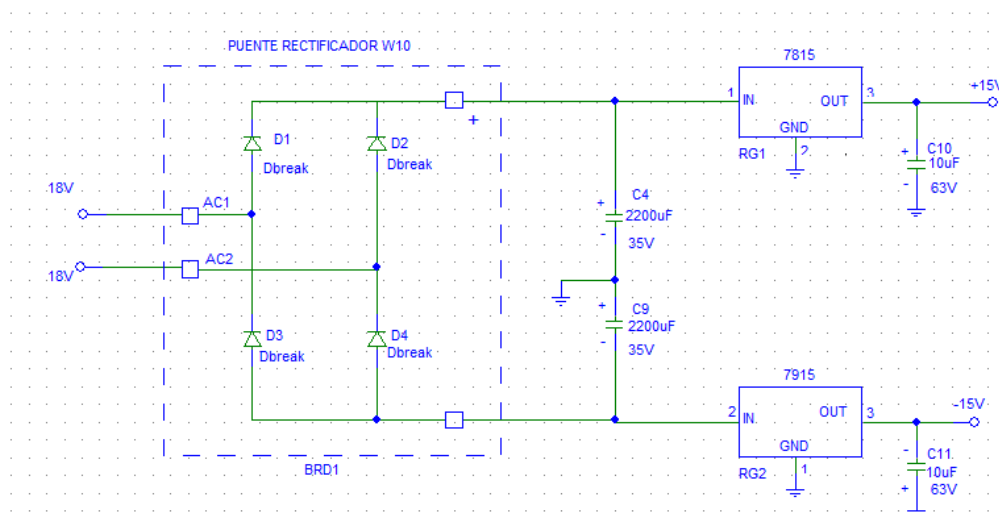


Figura 3.26 Circuito electrónico de las fuentes +15V y -15V

El circuito de la figura 3.26 se alimenta con 18Vac, el cual se obtiene del secundario del transformador. Este voltaje se rectifica utilizando el puente rectificador de onda completa no controlado W10.

En la salida del rectificador se tienen dos capacitores de 2200uF y 63V para tener una señal DC pura. El terminal DC positivo está conectado al regulador 7815 el cual genera un voltaje de +15V en su salida. De la misma manera el terminal negativo de la barra DC se conecta al regulador 7915, en cuya salida se tendrá -15V. Adicionalmente en la salida de los reguladores se dispone de condensadores de 10uF (C10 y C11) como filtro para mejorar las señales DC de salida. La principal función de esta fuente

es polarizar los amplificadores operacionales presentes en las demás tarjetas electrónicas.

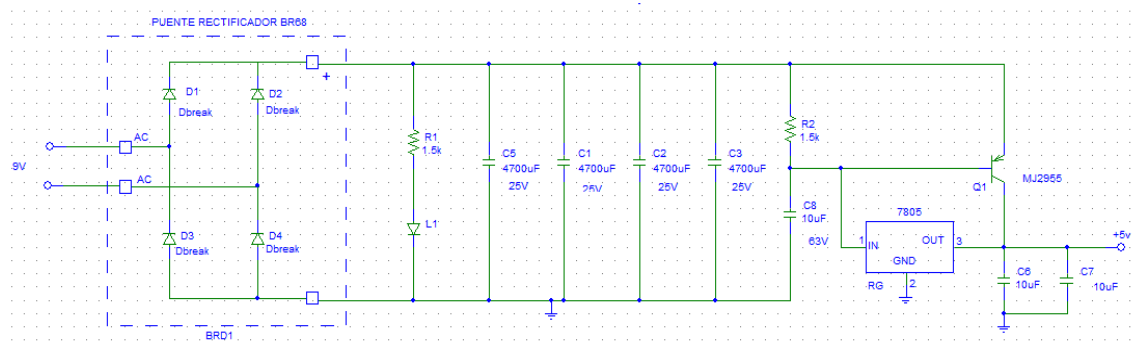


Figura 3.27 Circuito electrónico +5v

La estructura del circuito electrónico de la fuente de la figura 3.27 es similar a la fuente de +15 y -15V. Se utiliza un rectificador de onda completa no controlado BR68 para convertir la entrada alterna de 9V a tensión DC.

Cuatro capacitores de 4700uF (C5, C1, C2, C3) ubicados en la salida del rectificador forman la barra DC y su función es filtrar el voltaje para tener una señal continua más pura. Además, se tiene un led L1 que se enciende para indicar que la fuente está funcionando.

El regulador 7805 permite obtener +5V en su salida, pero adicionalmente se tiene una configuración de un transistor PNP (MJ2955) y una resistencia de 1.5K (R2) con el fin de aumentar la corriente de salida del regulador.



Figura 3.28 Encapsulado del transistor MJ2955

El transistor MJ2955 es un transistor especial, ya que como se observa en la figura 3.28 posee solo dos patas o pines que son base y emisor. El pin restante, es decir el colector está conectado a la carcasa y la corriente máxima que soporta es 4A. Por último, dos capacitores de 10uF (C6 y C7) se utilizan para la filtrar la señal DC de +5V.

3.2.2. Tarjeta de Acondicionamiento de señales

La tarjeta de indicación de velocidad consiste en un circuito de fuente y un circuito basado en operacionales para procesar las señales provenientes del encoder y obtener la velocidad.

El circuito de fuente se alimenta con 220Vac, y se rectifica utilizando el puente rectificador de onda completa BR68, con el cual se obtiene un voltaje DC de 300V en el conector P4, figura 3.29. Este voltaje se utiliza para alimentar el circuito de fuente para los IGBTs de la tarjeta de potencia.

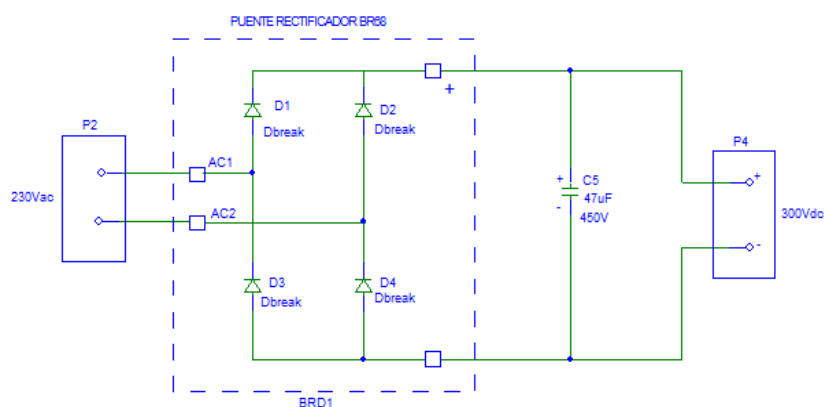


Figura 3.29 Tarjeta de Acondicionamiento de señales

El circuito indicador de velocidad recibe las cinco señales del encoder, a través de un conector ubicado en la parte posterior del módulo de potencia PEC16DSM01 como se observa en la figura 3.30.



Figura 3.30 Conector de encoder en la parte posterior del equipo

En la figura 3.31 se muestra el circuito utilizado para indicar la velocidad, donde en el conector P3 se conecta el encoder y el conector P5 es la salida hacia el panel frontal y el controlador. La salida del conector P5 lleva una señal de voltaje, la cual es proporcional a la velocidad a la que gira el motor, esto quiere decir que entre mayor sea la velocidad de rotación del motor, mayor será el voltaje en la salida del circuito. Dicho voltaje se envía al controlador, y de esta manera se puede visualizar en el computador en tiempo real la velocidad del motor. Este método de conexión del encoder no es aconsejable debido a que permite obtener la velocidad del motor, pero no su posición, ya que no tiene en su salida los canales A y B del encoder, por lo que si se requiere utilizar el encoder, se recomienda realizar la conexión descrita en la sección anexos

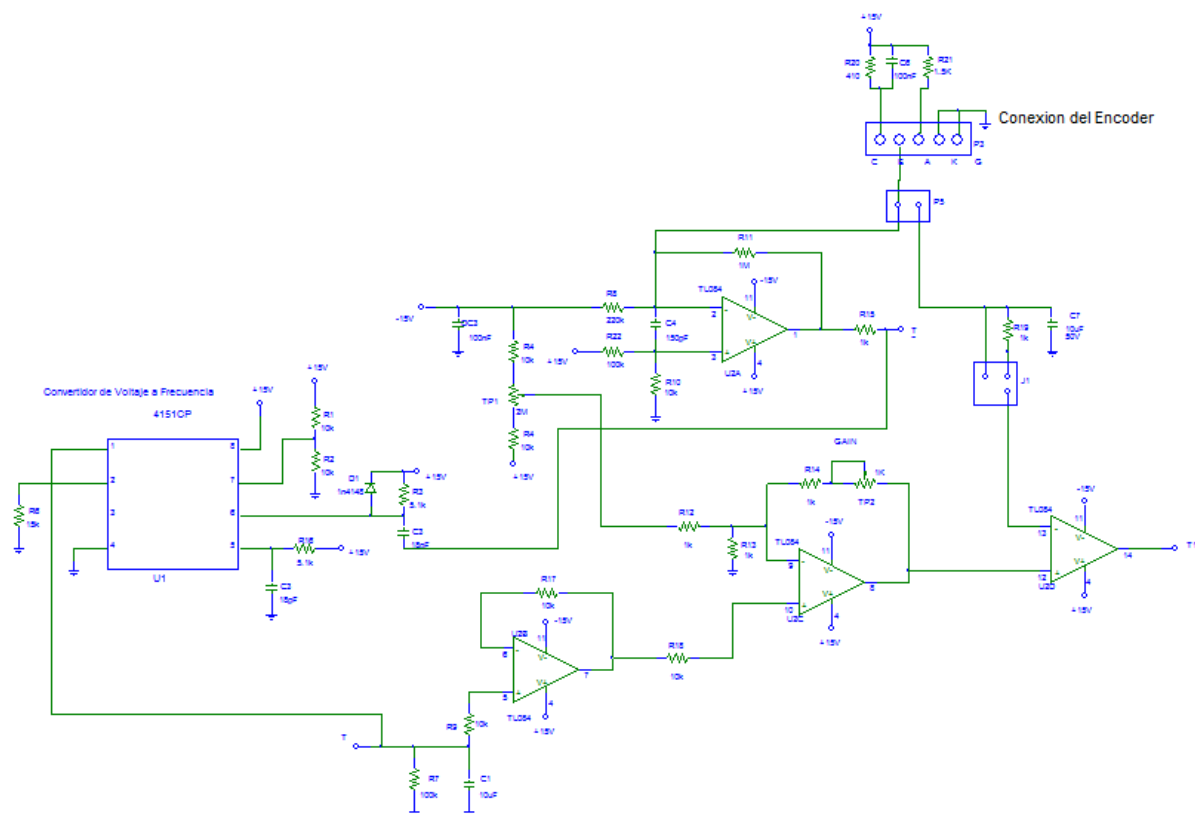


Figura 3.31 Circuito electrónico utilizado para indicar la velocidad

3.2.3. Tarjeta de Potencia

En la tarjeta electrónica de Potencia de la figura 3.32 se tienen todos los elementos de potencia necesarios para el movimiento y control de motores tanto AC como DC.

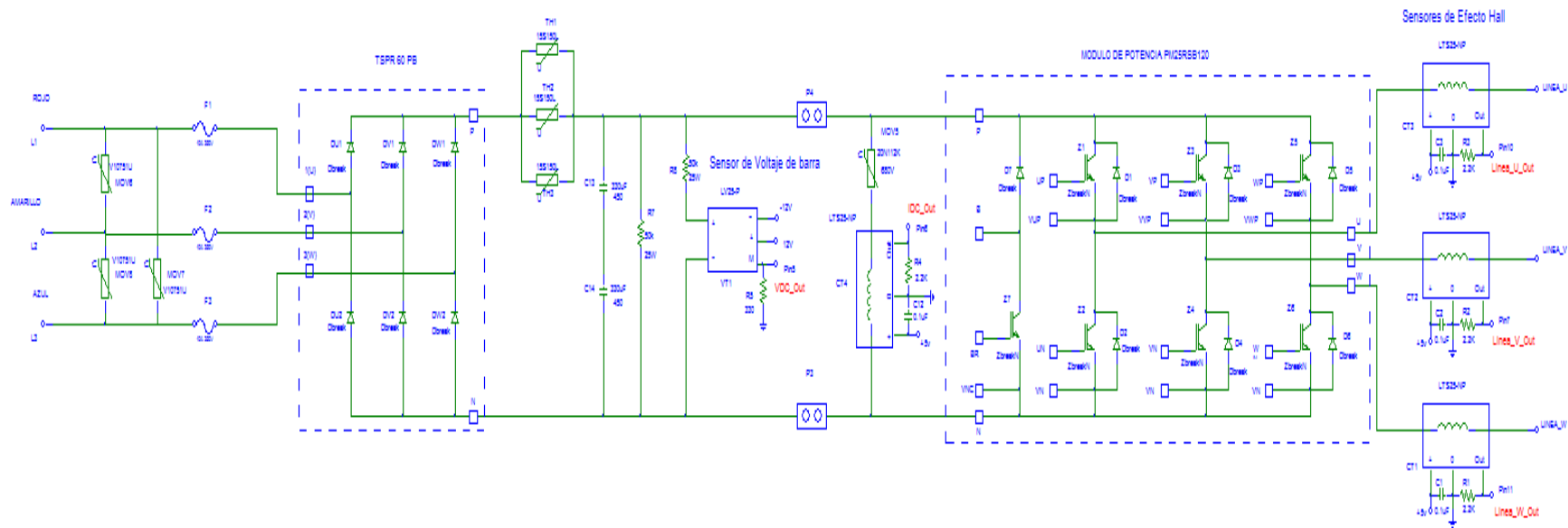


Figura 3.32 Circuito electrónico de la etapa de potencia

El circuito de entrada de la etapa de potencia dispone de tres terminales para alimentación alterna marcados como L1 (rojo), L2 (amarillo) y L3 (azul) como se muestra en la figura 3.33. El voltaje de alimentación nominal para estos terminales es de 440Vac, pero se pueden utilizar tensiones menores en caso de no disponer de este voltaje.

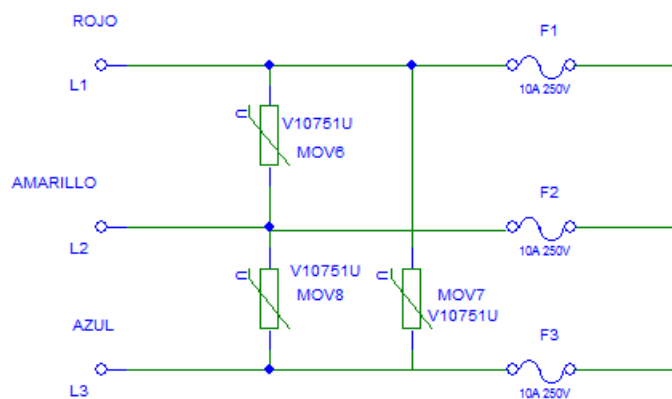


Figura 3.33 Circuito de entrada de la etapa de potencia

Como se puede observar en la figura 3.33 se tiene ubicados varistores de 750V (V10751U) entre línea y línea de alimentación, con la finalidad de proteger el equipo contra sobretensiones. En caso de tener un voltaje superior al nominal, los varistores se cortocircuitan, impidiendo que la corriente pase a través del resto de componentes, evitando dañarlos.

Además, cada línea dispone de un fusible de 250V y 10A para proteger el equipo en caso que se exceda la corriente máxima permitida.

Convertidor AC/DC

Para convertir la entrada alterna en DC se utiliza el rectificador trifásico de onda completa no controlado TSPR 60PB. Las líneas de alimentación ingresan por los terminales 1, 2 y 3 del rectificador, y en la salida se tiene la barra DC entre los terminales P y N como se muestra en la figura 3.34.

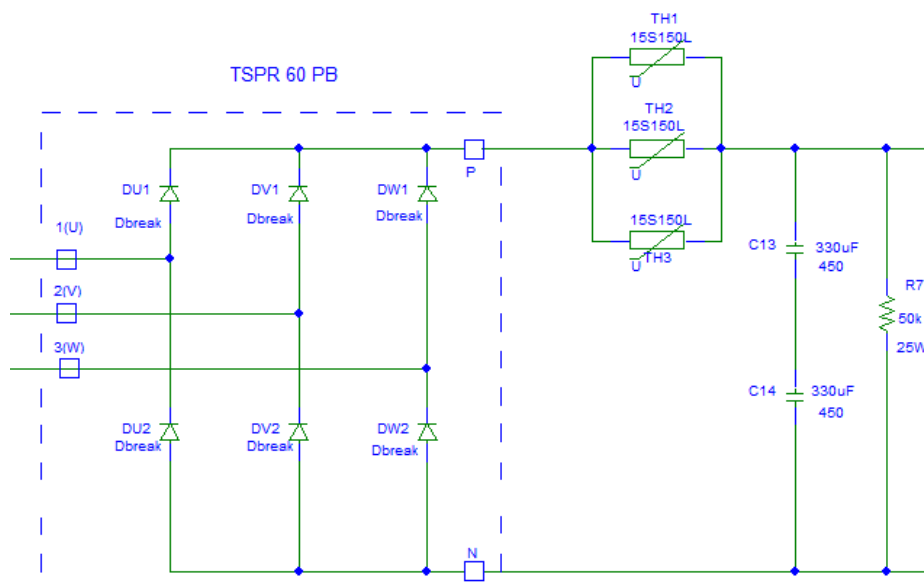


Figura 3.34 Circuito AC/DC

En el terminal positivo de la barra DC se ubican tres termistores 15S150L (TH1, TH2 y TH3) en paralelo, los cuales se utilizan para proteger el equipo contra altas temperaturas, debido a corrientes excesivas. Los capacitores de 330uF (C13 y C14) se utilizan para estabilizar el voltaje DC de la barra y la resistencia de 50K (R7) sirve para la descarga de los capacitores.

Detección de Corriente y Voltaje de Barra DC

Es necesario conocer los valores de voltaje y corriente de barra, para saber si el equipo está funcionando de manera adecuada, o se ha producido un cortocircuito o alguna falla en la tarjeta electrónica. Para el voltaje se utiliza un sensor LV25-P y para la corriente un sensor de efecto Hall LTS25-NP.

Para detectar el voltaje, el sensor LV25-P utiliza el principio de la Ley de Ohm, por lo cual se detecta la corriente y a través de una resistencia se obtiene el valor de voltaje [8]. Como se observa en la figura 3.35 las entradas del sensor se conectan a los terminales donde se desea la medición, es decir a los terminales positivo y negativo de la barra, y como se mencionó anteriormente se conecta una resistencia de 50K (R8), para a través de la corriente, tener la medición de voltaje.

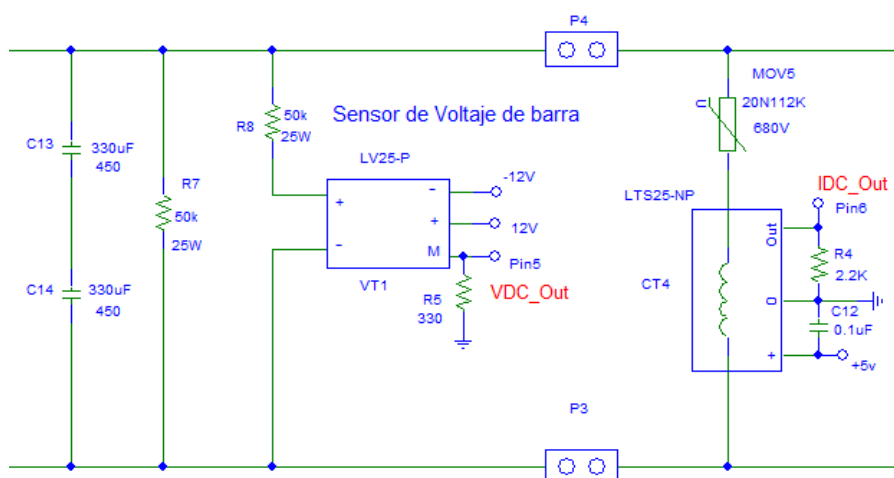


Figura 3.35 Circuito de detección del voltaje en la barra DC

Para la medición de corriente en la barra DC, se tiene un sensor de efecto Hall LTS25-NP, el cual entrega un voltaje proporcional a la corriente medida (IDC_Out) [9], el cual se envía a través de conectores o buses al panel frontal del equipo, y posteriormente al controlador. Adicionalmente, se dispone de un varistor 20N112K de 680 V para evitar cortocircuitos en la barra DC

Convertidor DC/AC

Para convertir la señal DC de la barra en un voltaje alterno se utiliza el módulo de potencia PM25RSB120 figura 3.19, el cual está compuesto internamente por un troceador clase A y un puente inversor, el cual maneja el voltaje de salida.

El módulo consiste en seis terminales de fuerza y 19 terminales de control [10]. En la figura 3.36 se muestra la estructura interna del módulo de potencia, donde se observa que en la entrada del módulo se tiene los terminales positivo y negativo de la barra DC (P y N respectivamente), y en la salida se tienen los terminales U, V y W, donde se conecta la carga. El terminal restante B se utiliza para el troceador.

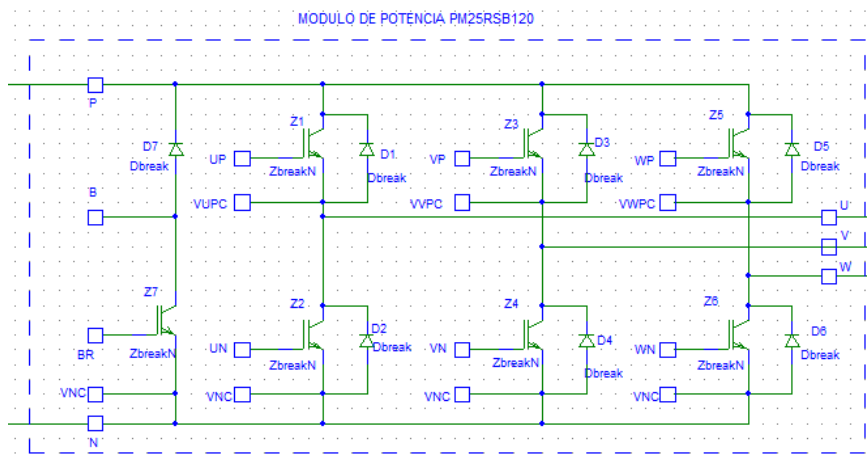


Figura 3.36 Circuito electrónico de potencia

El troceador clase A de la figura 3.37 está formado por un IGBT Z7 y un diodo de potencia D7, y su función es estabilizar o limitar el voltaje de la barra DC. Para utilizar el troceador se aplica una señal de voltaje entre los pines BR y VNC. Dicha señal debe ser programada en el controlador. Adicionalmente en el troceador se dispone de los terminales B y P, que sirven para conectar la resistencia de frenado.

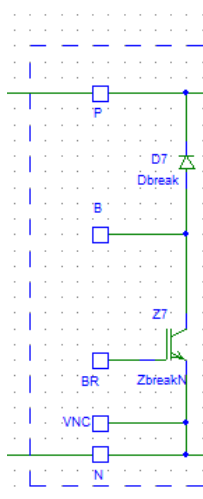


Figura 3.37 Circuito del troceador clase A

Además del troceador, el módulo de potencia contiene un puente inversor formado por seis IGBTs como se muestra en la figura 3.38, a través de los cuales se maneja el voltaje de salida. Las señales de control PWM se envían a las compuertas de los IGBTs, y en las salidas U, V y W se conecta la carga. Cabe recalcar que los IGBTs de un mismo ramal, por ejemplo Z1 y Z2 no deben conducir al mismo tiempo ya que se produciría un cortocircuito en la barra DC.

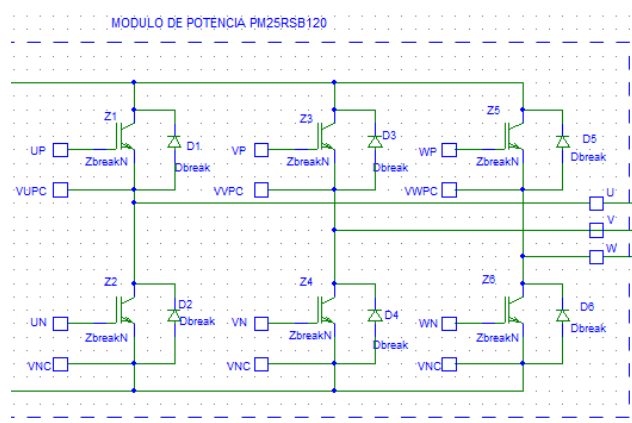


Figura 3.38 Circuito inversor formado por 6 IGBTs

Detección de las corrientes de salida

En la salida trifásica del puente inversor, se tienen sensores de efecto Hall figura 3.39, al igual que para la corriente de la barra DC, los cuales se utilizan para detectar las corrientes en las líneas U, V y W, y envían el valor detectado al panel frontal del equipo y al controlador en caso de que se quiera observar las señales en el computador. Cabe recalcar que, para su funcionamiento estos sensores se tienen que alimentar con un voltaje DC de 5V. Por último se conectan las líneas del motor trifásico en las salidas Línea_U, Línea_V y Línea_W.

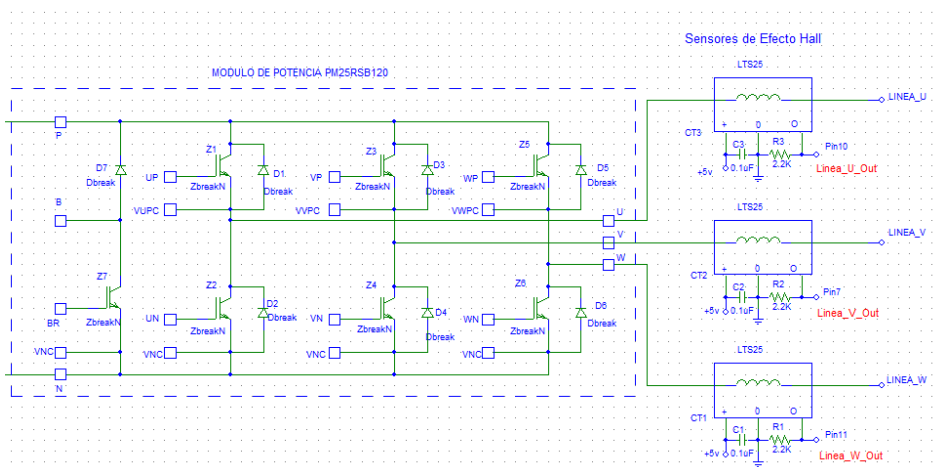


Figura 3.39 Puente Inversor y sensores de efecto Hall

Circuito de fuente para los IGBTs

Además de las señales PWM, para su funcionamiento los IGBTs necesitan un voltaje DC de alimentación de 15V, para lo que se utiliza el circuito de la figura 3.40.

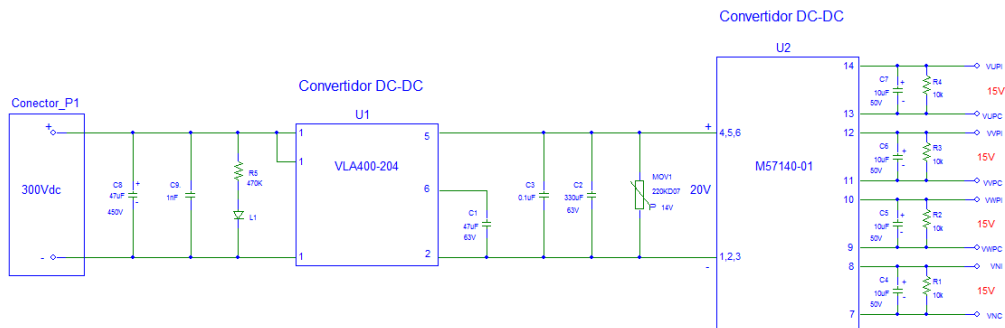


Figura 3.40 Circuito de fuente para los IGBTs

En la entrada del circuito se tiene un voltaje DC de 300V, el cual pasa por una etapa de filtrado con los capacitores de 47uF (C8 y C9) e ingresa al convertidor VLA400-204, el mismo que reduce el nivel de voltaje de 300V a 20V [11]. Esta tensión de 20V también se filtra usando los capacitores C3 y C2, y además se dispone de un varistor 220KD07 de 14V para protección del circuito. La señal de 20V es la entrada de un segundo convertidor DC-DC (M57140-01), que permite tener 4 salidas de 15 V que se usan para

alimentar a los IGBTs del puente inversor [12]. A pesar de que en el puente inversor se tienen 7 IGBTs, se necesitan solo 4 fuentes de alimentación, debido a que los IGBTs Z2, Z4, Z6 y Z7 de la figura 3.39 están conectados a la misma referencia por lo tanto tienen la misma fuente. Las tres fuentes restantes se conectan a Z1, Z3 y Z5.

3.2.4. Tarjeta de acondicionamiento de señales

En la tarjeta de acondicionamiento de señales se realizan los procesamientos de las señales provenientes de los sensores de efecto Hall y las señales PWM adquiridas del controlador, además del circuito de protección de barra DC. A continuación se detallará cada una de ellas.

Procesamiento de Señales de Corrientes de Fase

Los circuitos para trabajar las corrientes de las líneas de salida del inversor son similares tanto para la línea U, V y W.

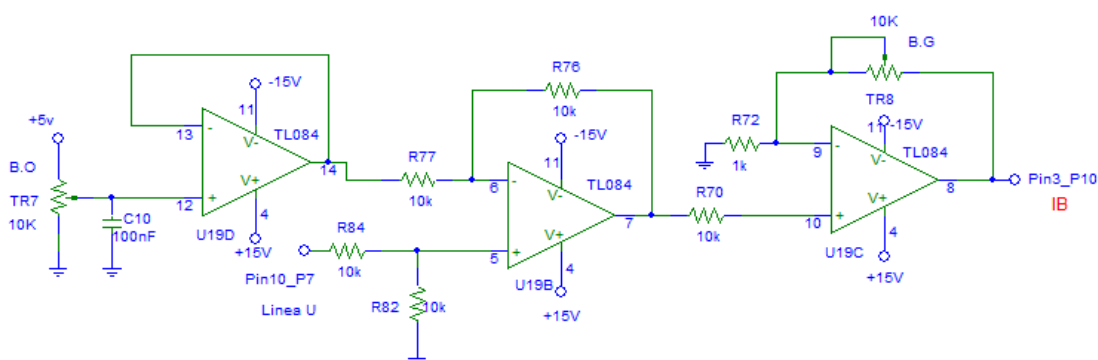


Figura 3.41 Circuito electrónico de acondicionamiento para la corriente de la Línea U

El circuito electrónico de la figura 3.41 permite procesar la corriente de la línea U del inversor, mediante un sensor de efecto Hall. El sensor de efecto Hall se encuentra en la tarjeta de potencia la cual se verá más adelante. La señal proveniente del sensor llega al pin 10 del conector P7 de la tarjeta electrónica y se conecta a la entrada no inversora (pin 5) del operacional TL084 (U19B) la cual se marcó con Línea U. El circuito está compuesto por tres amplificadores operacionales, los cuales se analizarán a continuación:

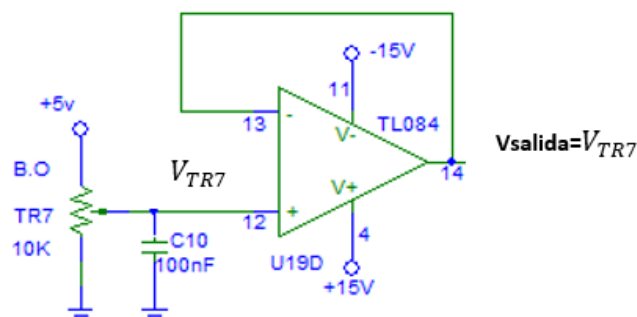


Figura 3. 42 Circuito electrónico para el voltaje $V_{salida}=V_{TR7}$

En el terminal no inversor (pin 12) del primer operacional (U19D) está conectado un potenciómetro de 10K (TR7) el cual permite regular el offset de la señal de voltaje entregada por el sensor de efecto Hall de la línea U. El potenciómetro esta alimentado con +5V y conectado a tierra por lo que se genera un divisor de tensión en la entrada no inversora del operacional, el cual se marca con V_{TR7} . El amplificador operacional está conectado en una configuración de seguidor no inversor por lo cual el voltaje V_{ref} del pin 12 se verá reflejado en el pin 13 y también en la salida (pin 14).

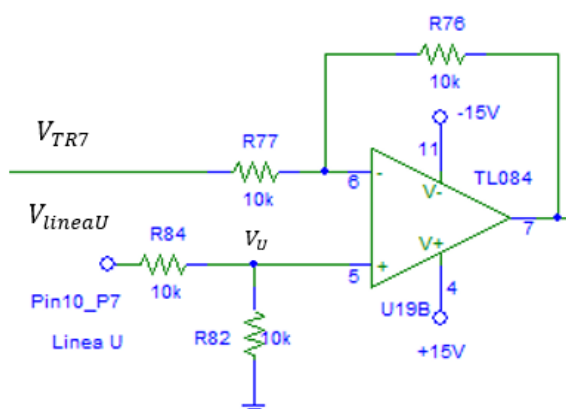


Figura 3.43 Amplificador diferencial para procesar la señal de corriente de la Línea U

El operacional de la figura 3.43 está conectado en una configuración de amplificador diferencial. En el terminal no inversor se tiene un divisor de tensión entre el voltaje provisto por el sensor de la corriente de línea U y las resistencias R84 y R82. En el terminal inversor llega la señal de salida del seguidor de voltaje (U19D) V_{ref} .

$$V_U = V_{lineaU} \left(\frac{R82}{R82 + R84} \right)$$

$$V_U = V_{lineaU} \left(\frac{10k}{10k + 10k} \right)$$

$$V_U = V_{lineaU} \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$V_U = \frac{V_{lineaU}}{2} \quad (3.1)$$

Debido a la propiedad de los Opamps:

$$V^+ = V^-$$

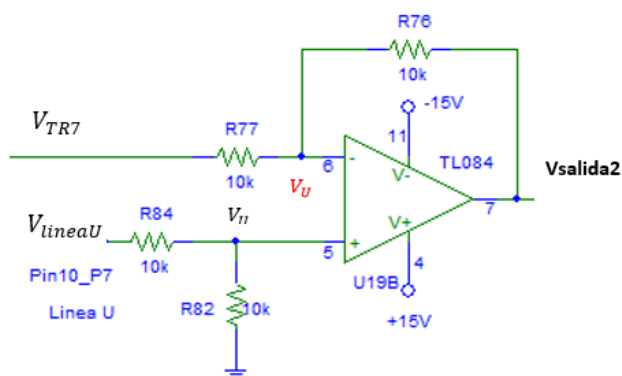


Figura 3.44 Voltaje de Salida del amplificador diferencial

$$\frac{V_{TR7} - V_u}{R77} = \frac{V_u - V_{salida2}}{R76}$$

$$\frac{V_{TR7} - V_U}{10K} = \frac{V_U - V_{salida2}}{10K}$$

$$V_{TR7} - V_U = V_U - V_{salida2}$$

$$V_{TR7} - 2V_U = -V_{salida2}$$

$$V_{salida2} = 2V_U - V_{TR7} \quad (3.2)$$

La configuración de la figura 3.45 es un amplificador inversor. En el pin no inversor (pin 10) está conectada la salida del amplificador diferencial U19B ($V_{salida2}$) y en la entrada inversora se tiene un potenciómetro de 10K (BG) que sirve para manejar la ganancia de la salida del amplificador marcada con IB.

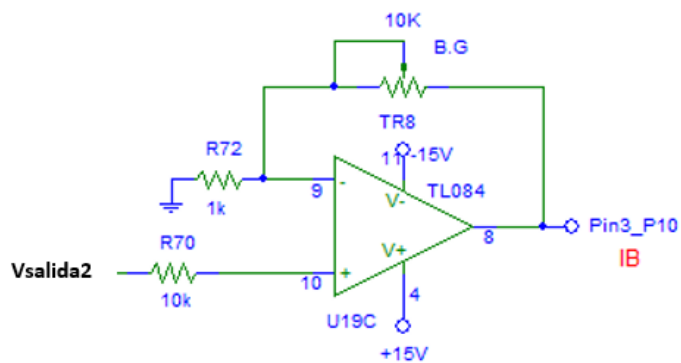


Figura 3.45 Amplificador inversor para regular la ganancia de salida IB

Debido a la propiedad de los Opamps:

$$V^+ = V^-$$

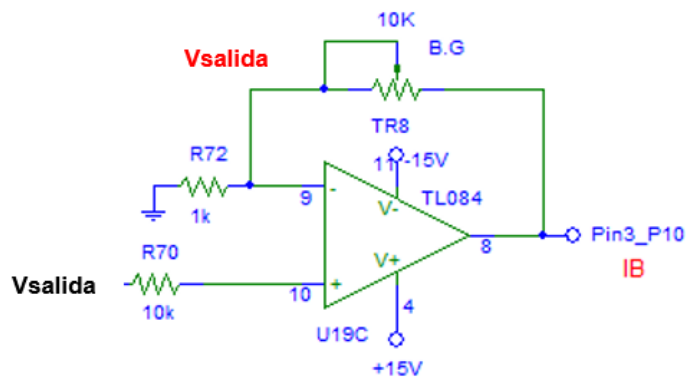


Figura 3.46 Circuito de Ganancia para la corriente de la línea U

$$\frac{0 - V_{salida2}}{1K} = \frac{V_{salida2} - IB}{TR8}$$

$$V_{salida2} \left(\frac{TR8}{1K} \right) + V_{salida2} = IB \quad (3.3)$$

Reemplazando 3.2 en 3.3:

$$IB = V_{salida2} \left(\frac{TR8}{1K} \right) + V_{salida2}$$

$$IB = (2V_U - V_{TR7}) \left(\frac{TR8}{1K} \right) + (2V_U - V_{TR7}) \quad (3.4)$$

Ahora se reemplaza 3.1 en 3.4 y se simplifica:

$$IB = \left(2 \frac{V_{lineaU}}{2} - V_{TR7} \right) \left(\frac{TR8}{1K} \right) + \left(2 \frac{V_{lineaU}}{2} - V_{TR7} \right)$$

$$IB = (V_{lineaU} - V_{TR7}) \left(\frac{TR8}{1K} \right) + (V_{lineaU} - V_{TR7}) \quad (3.5)$$

La variable IB es el valor en términos de voltaje de la corriente de la línea U que se envía al controlador, y como se observa en la Ec. 3.4 depende del sensor de efecto Hall (V_{lineaU}), y los potenciómetros que regulan offset y ganancia, V_{TR7} y $TR8$ respectivamente.

➤ Circuito Electrónico Línea V

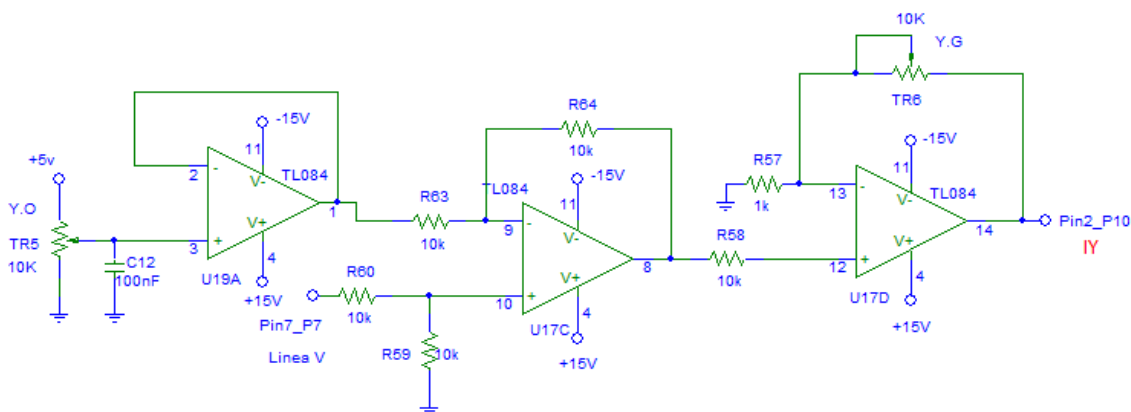


Figura 3.47 Circuito electrónico de acondicionamiento de la Línea V

El circuito de la figura 3.47 compuesto por tres amplificadores operacionales se utiliza para procesar la corriente de la línea W del inversor. Como se puede observar es similar al circuito utilizado para la línea U, por lo que para obtener la expresión IY se utiliza el mismo procedimiento.

$$IY = (V_{lineaV} - V_{TR5})\left(\frac{TR6}{1K}\right) + (V_{lineaV} - V_{TR5}) \quad (3.6)$$

➤ Circuito Electrónico Línea W

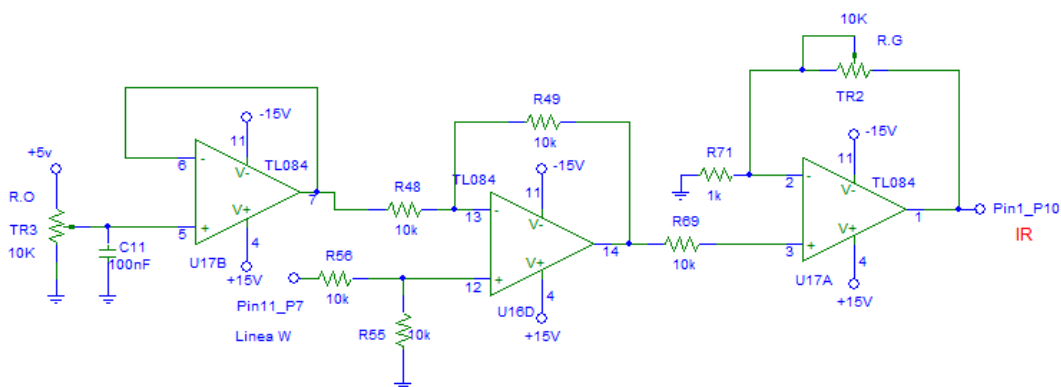


Figura 3.48 Circuito electrónico de acondicionamiento de la Línea W

El circuito de la figura 3.48 tiene el mismo funcionamiento que los circuitos para las líneas U y V. El sensor de efecto de Hall adquiere el valor de la corriente de línea W y se procesa con los amplificadores operacionales.

$$IR = (V_{lineaW} - V_{TR3})\left(\frac{TR2}{1K}\right) + (V_{lineaW} - V_{TR3}) \quad (3.7)$$

Procesamiento de señales de corriente y voltaje de barra DC

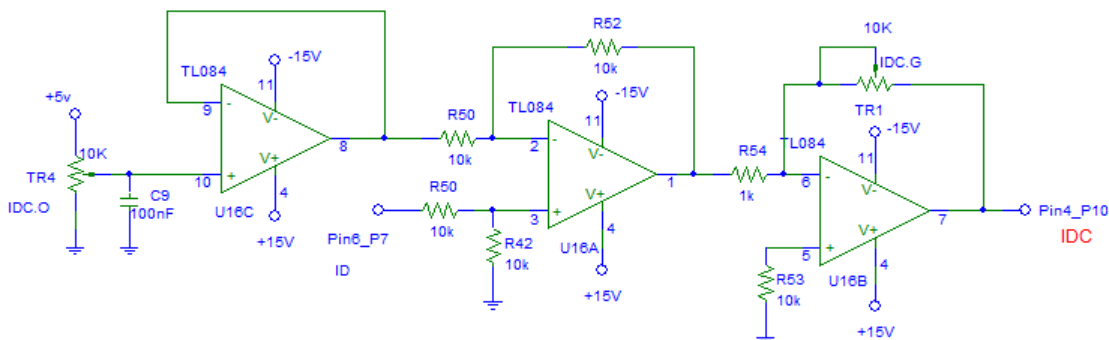


Figura 3.49 Circuito de acondicionamiento de corriente de barra DC

Al igual que para las corrientes de línea, el circuito de procesamiento de la corriente de barra DC está formado por tres amplificadores operacionales (U16C, U16A, U16B), figura 3.49. A continuación, se analiza su funcionamiento.

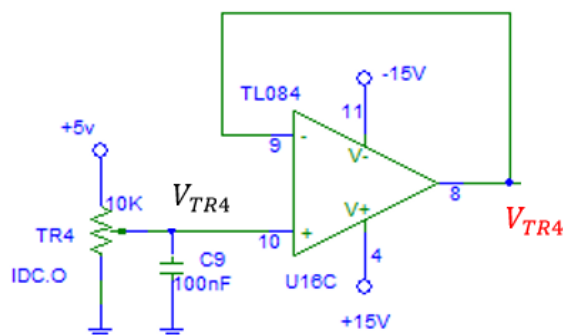


Figura 3.50 Circuito para regular el offset de la corriente DC

El operacional U16C es un seguidor de voltaje, por lo que, la señal de entrada V_{TR4} se tendrá también en la salida. El potenciómetro TR4 se utiliza para regular el offset de la señal de corriente DC adquirida a través del sensor de efecto Hall y el valor de V_{TR4} dependerá del valor de resistencia que se coloque en el potenciómetro.

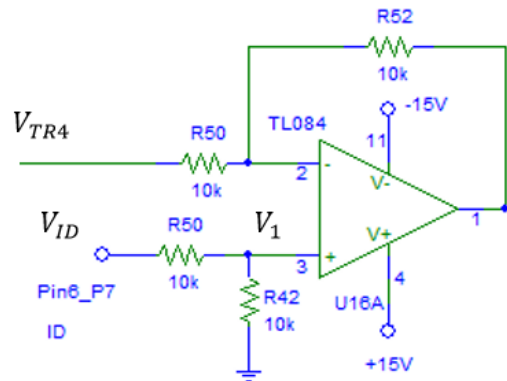


Figura 3.51 Divisor de voltaje de la señal de corriente de barra DC

El amplificador de la figura 3.51 está conectado en una configuración diferencial. En la entrada no inversora se tiene un divisor de voltaje para encontrar el voltaje V_1 .

$$V_1 = V_{ID} \left(\frac{R50}{R50 + R42} \right)$$

$$V_1 = V_{ID} \left(\frac{10k}{10k + 10k} \right)$$

$$V_1 = V_{ID} \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$V_1 = \frac{V_{ID}}{2} \quad (3.8)$$

Debido a la propiedad de los Opamps:

$$V^+ = V^-$$

El amplificador de la figura 3.52 está conectado en una configuración diferencial.

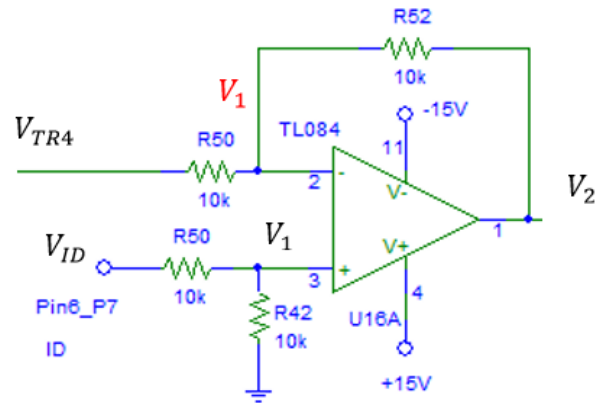


Figura 3. 52 Voltaje de salida V2 del amplificador diferencial

$$\frac{V_{TR4} - V_1}{R50} = \frac{V_1 - V_2}{R52}$$

$$\frac{V_{TR4} - V_1}{10K} = \frac{V_1 - V_2}{10K}$$

$$V_{TR4} - V_1 = V_1 - V_2$$

$$V_{TR4} - 2V_1 = -V_2$$

$$V_2 = 2V_1 - V_{TR4} \quad (3.9)$$

La configuración del amplificador U16B de la figura 3.53 es la de un inversor. La entrada inversora (pin 6) es V_2 , que a su vez es la salida del amplificador diferencial U16A y la entrada no inversora está conectada a tierra. El potenciómetro de 10K (TR1) sirve para regular la ganancia de la salida IDC.

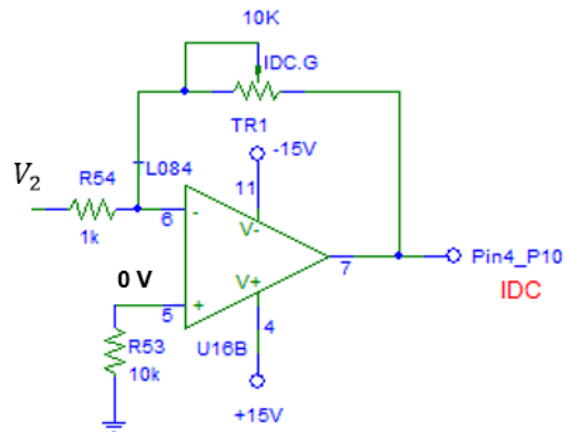


Figura 3. 53 Amplificador inversor para regular la ganancia de salida

$$\frac{V_2 - 0}{R54} = \frac{0 - IDC}{TR1}$$

$$\frac{V_2}{1K} = \frac{-IDC}{TR1}$$

$$IDC = -\left(\frac{TR1}{1K}\right)V_2 \quad (3.10)$$

Se reemplaza 3.9 en 3.10.

$$IDC = -\left(\frac{TR1}{1K}\right)(2V_1 - V_{TR4}) \quad (3.11)$$

Ahora se reemplaza 3.8 en 3.11 y se simplifica:

$$IDC = -\left(\frac{TR1}{1K}\right)\left(2\frac{V_{ID}}{2} - V_{TR4}\right)$$

$$IDC = -\left(\frac{TR1}{1K}\right)(V_{ID} - V_{TR4}) \quad (3.12)$$

Se observa que el valor IDC depende del valor detectado de corriente DC (V_{ID}) y de los potenciómetros TR4 y TR1. Cabe recalcar que la ecuación tiene signo negativo por lo que hay que tener cuidado al configurar los valores de los potenciómetros.

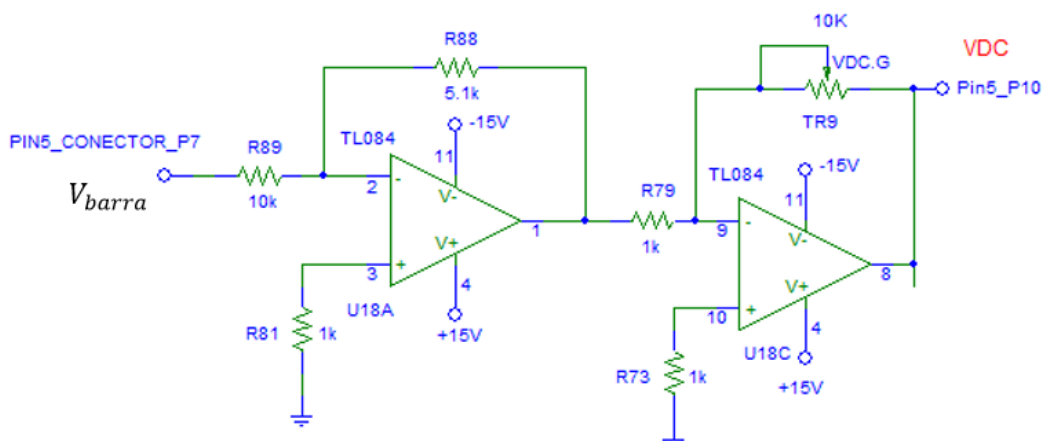


Figura 3.54 Circuito de procesamiento del voltaje de barra DC

El circuito para procesar el voltaje de barra DC está formado por dos operacionales (U18A y U18C) como se muestra en la figura 3.54. A diferencia de los circuitos de acondicionamiento de corriente solo se dispone de un potenciómetro el cual permite aumentar o disminuir la ganancia de la salida de voltaje VDC.

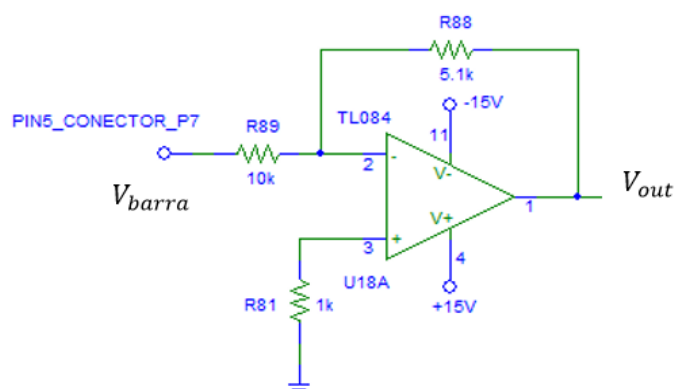


Figura 3.55 Circuito de ganancia para la señal de voltaje de barra DC

El amplificador está conectado como inversor por lo cual la salida será negativa como se muestra en la figura 3.55, y debido a que la resistencia R89 es el doble de R88, la salida será la mitad del voltaje de entrada V_{barra} .

$$\frac{V_{barra} - 0}{R89} = \frac{0 - V_{out}}{R88}$$

$$\frac{V_{barra}}{10K} = \frac{-V_{out}}{5.1K}$$

$$V_{out} = -\left(\frac{5.1K}{10K}\right) V_{barra}$$

$$V_{out} = -\frac{V_{barra}}{2} \quad (3.13)$$

Al igual que el operacional U18A, el amplificador U18C es un inversor por lo cual la salida VDC también será negativa como se muestra en la figura 3.56. La ganancia se ajusta a través del potenciómetro TR9, lo que quiere decir que entre mayor sea el valor de TR9, mayor será el valor de VDC.

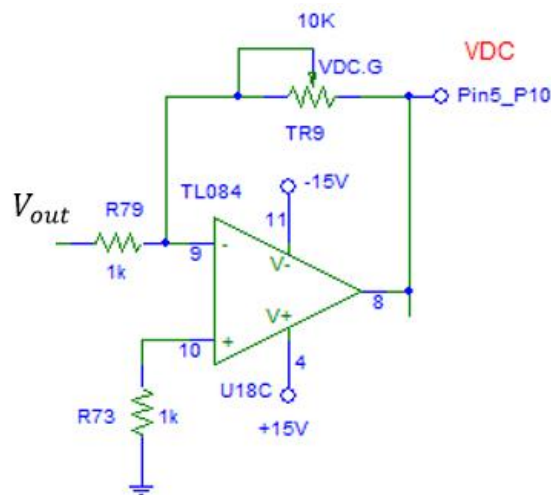


Figura 3.56 Amplificador inversor para regular la ganancia de salida

$$\frac{V_{out} - 0}{R79} = \frac{0 - VDC}{TR9}$$

$$\frac{V_{out}}{1K} = \frac{-VDC}{TR9}$$

$$VDC = -\left(\frac{TR9}{1K}\right) V_{out} \quad (3.14)$$

Reemplazamos 3.13 en 3.14

$$VDC = -\left(\frac{TR9}{1K}\right) \left(-\frac{V_{barra}}{2}\right)$$

$$VDC = \left(\frac{TR9}{2K}\right) V_{barra} \quad (3.15)$$

Se observa que el voltaje de barra que se enviara al controlador depende únicamente del potenciómetro TR9, por lo que hay que ajustarlo de manera adecuada.

Procesamiento de señales para la protección de barra DC

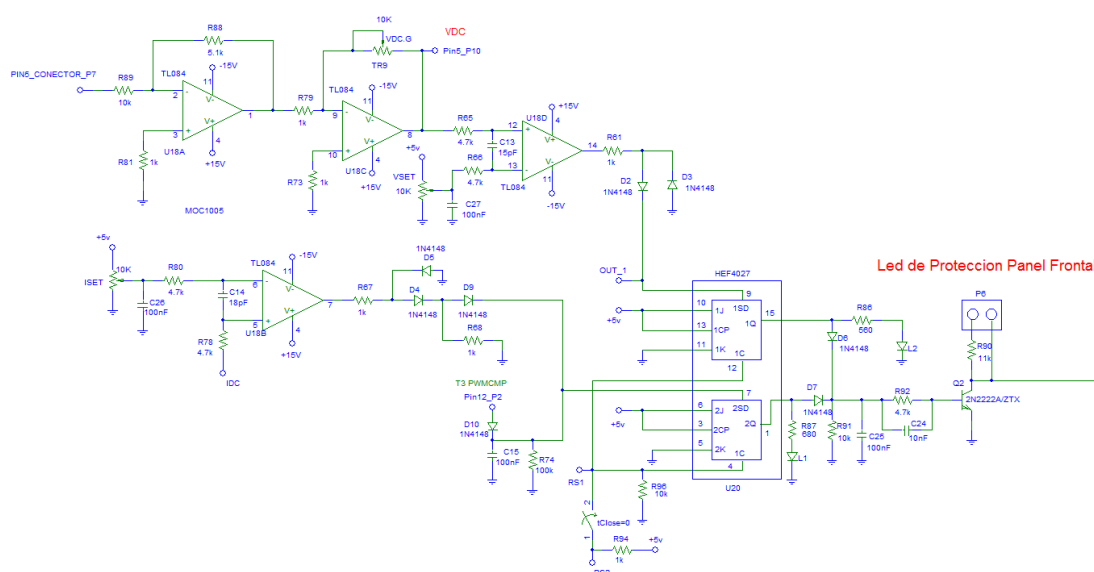


Figura 3.57 Circuito de protección de barra DC

El circuito de protección de barra DC está compuesto por amplificadores operacionales, un flip-flop tipo JK y varios leds indicadores. La principal función de esta sección de la tarjeta electrónica de acondicionamiento de señales es la de prevenir cortocircuitos en la barra DC, los cuales pueden provocar una explosión y causar daños tanto al equipo como al usuario.

La primera etapa es la adquisición del voltaje presente en la barra DC, este circuito ya se analizó anteriormente en este capítulo, por lo tanto se utilizará la expresión encontrada para el voltaje VDC (Ec. 3.15).

$$VDC = \left(\frac{TR9}{2K}\right) V_{barra} \quad (3.16)$$

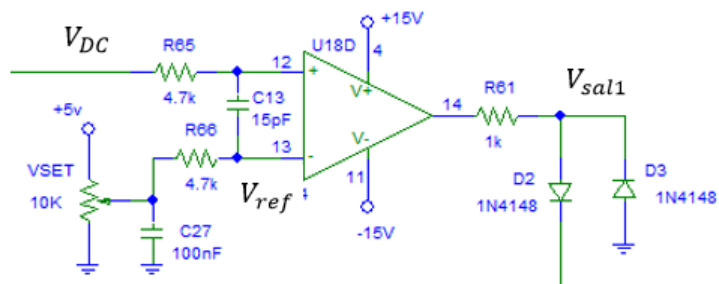


Figura 3.58 Comparador entre el voltaje de barra DC y voltaje seteado (Vset)

El voltaje V_{DC} es la señal acondicionada adquirida por el sensor de voltaje de barra como se muestra en la figura 3.58, es decir entrega la medida actual de la barra DC. Dicho valor de voltaje ingresa a la entrada no inversora del operacional U18D, el cual funciona como comparador. En la entrada inversora se tiene un voltaje de referencia que depende de la posición del potenciómetro de 10K (Vset).

Por lo tanto, se está comparando el voltaje de la barra DC con un valor seteado en el potenciómetro Vset. De esta forma en el momento que V_{DC} exceda a V_{ref} se tendrá +15V en la salida del operacional, caso contrario se tendrá -15V. Si la salida V_{sal1} es positiva conduce el diodo D2 y, si es negativa conduce el diodo D3.

De igual manera se tiene que proteger el equipo contra sobrecorrientes, por lo que es necesario también comparar el valor de corriente en la barra (IDC) con el valor seteado en el potenciómetro Iset. Cabe recalcar que el valor de Iset tiene que colocarse con cuidado de no exceder el valor de corriente nominal del equipo.

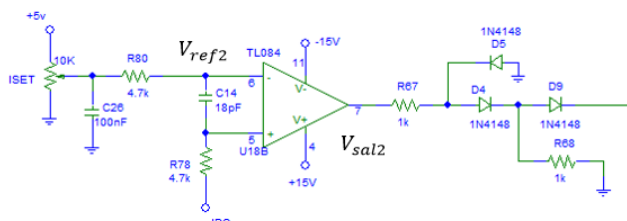


Figura 3.59 Comparador entre la corriente de barra DC y corriente seteada (Iset)

Se compara la señal IDC con el valor V_{ref2} que depende del valor de resistencia colocado en Iset, y se tiene en la salida (V_{sal2}) un voltaje de +15V o -15V. En el caso de que la salida V_{sal2} sea positiva los diodos D4 y D9 conducirán, caso contrario conducirá D5.

Ambas señales V_{sal1} y V_{sal2} están conectadas al integrado HEF4027, el cual tiene en su interior dos flip-flop JK, con los cuales se realiza la activación de los leds de protección.

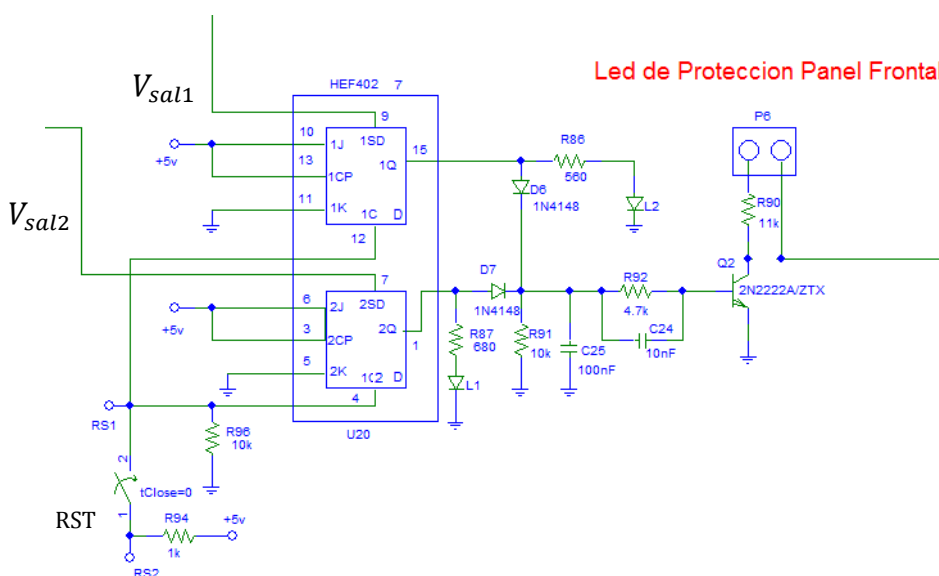


Figura 3.60 Conexiones del integrado flip-flop HEF4027

Como se observa en la figura 3.60 cada flip-flop tiene cinco entradas y una salida. La salida de los flip-flops depende del estado (alto o bajo) de las entradas. Inicialmente las señales 1CD (pin 12) y 2CD (pin 4) están en bajo y mientras no se encienda la parte de potencia del circuito los sensores de voltaje y corriente de barra DC enviarán 0V, por lo cual las salidas V_{sal1} y V_{sal2} también estarán en bajo. Además de esto las señales J y CP están

conectadas a +5V (alto) y K a tierra (bajo) [13]. Por lo tanto, en base a la tabla 6 se observa que ambas salidas están en alto.

Inputs					Outputs	
nSD	nCD	nCP	nJ	nK	nQ	n \bar{Q}
H	L	X	X	X	H	L
L	H	X	X	X	L	H
H	H	X	X	X	H	H
L	L	↑	L	L	no change	no change
L	L	↑	H	L	H	L
L	L	↑	L	H	L	H
L	L	↑	H	H	n \bar{Q}	nQ

Tabla 6: Estado 1 de funcionamiento del flip-flop HEF4027

Si las salidas de los flip-flops (1Q y 2Q) están en alto se encenderán los leds L1 y L2 en la tarjeta, además el transistor 2N2222 (Q2) se satura por lo que la resistencia R90 se conecta a tierra y el pin 2 del conector P6 está conectado a +3.5V provenientes del controlador como se verá más adelante en este capítulo. Esta conexión permite cerrar el circuito con lo cual se enciende el led del panel frontal indicando alarma, como se muestra en la figura 3.61

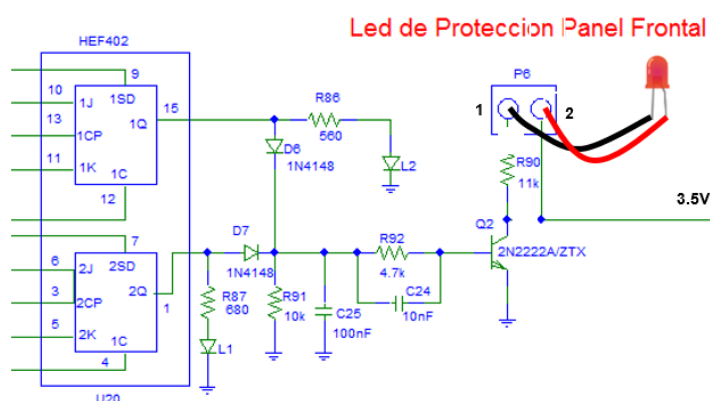


Figura 3.61 Circuito indicador de la protección de barra DC

El circuito de protección también posee un botón de Reset (RST). Cuando se presiona este botón se coloca un alto en los pines 1CD (pin 12) y 2CD

(pin 4) y las señales de entrada restantes permanecen iguales, J y CP están conectadas a +5V (alto) y K a tierra (bajo), por lo cual la salida de los flip-flops cambia a bajo.

Inputs					Outputs	
nSD	nCD	nCP	nJ	nK	nQ	n \bar{Q}
H	L	X	X	X	H	L
L	H	X	X	X	L	H
H	H	X	X	X	H	H
L	L	↑	L	L	no change	no change
L	L	↑	H	L	H	L
L	L	↑	L	H	L	H
L	L	↑	H	H	n \bar{Q}	nQ

Tabla 7: Estado 2 de funcionamiento del flip-flop HEF4027

Dado que las salidas de los flip-flops (1Q y 2Q) están en bajo no se encenderán los leds L1 y L2 en la tarjeta, y debido a que hay 0V en la base del transistor 2N2222 (Q2), el mismo entra en estado de corte por lo que la resistencia R90 queda flotante y el led de protección se apaga.

El último caso de análisis, se da cuando el voltaje V_{DC} supera el voltaje seteado V_{ref1} (V_{sal1} en alto) o cuando la corriente I_{DC} supera el valor de V_{ref2} (V_{sal2} en alto). En cualquiera de los dos casos se tiene un cambio de bajo a alto en la salida de los flip-flops, produciendo que el equipo se alarme para proteger al usuario de explosiones. De esta manera se evita el exceso de voltaje en la barra DC.

Inputs					Outputs	
nSD	nCD	nCP	nJ	nK	nQ	n \bar{Q}
H	L	X	X	X	H	L
L	H	X	X	X	L	H
H	H	X	X	X	H	H
L	L	↑	L	L	no change	no change
L	L	↑	H	L	H	L
L	L	↑	L	H	L	H
L	L	↑	H	H	n \bar{Q}	nQ

Tabla 8: Estado 3 de funcionamiento del flip-flop HEF4027

Procesamiento de Señales PWM

Se necesitan seis señales PWM para disparar los IGBTs del puente inversor, estas señales provienen del controlador y se procesan en la tarjeta de adquisición de señales, para lo cual se utilizan puertas lógicas AND y optocopladores como se observa en la figura 3.62.

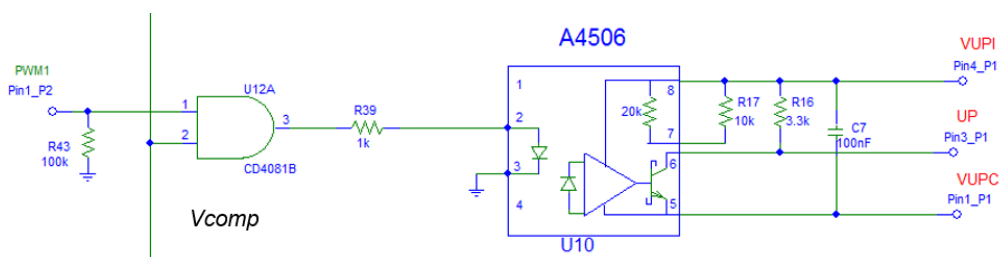


Figura 3.62 Conexión entre la puerta lógica AND y el optocoplador A4506

Dada la característica de las puertas AND, en las cuales su salida es un alto, solo si ambas entradas están alto, son muy útiles para evitar disparos falsos en los IGBTs. En la entrada de la puerta AND se tiene la señal PWM1 (pin 1) y la señal Vcomp, la cual se observa en figura 3.63.

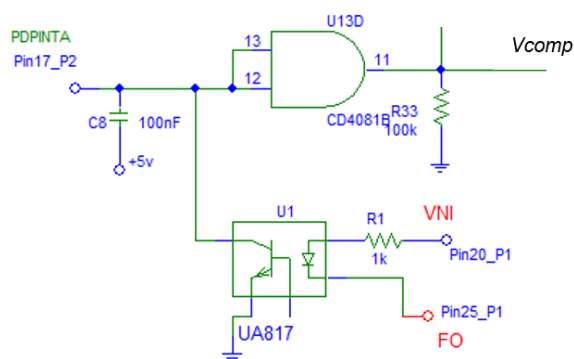


Figura 3.63 Circuito para evitar disparos falsos de los IGBTs

La señal PDPINTA proviene del controlador, se conecta en el pin 17 del conector P2, que es la entrada de la puerta AND (U13D). Esta señal se utiliza para asegurar el disparo de los IGBTs y dado que los pines 12 y 13 de la puerta AND están puenteados, solo cuando la señal PDPINTA sea positiva la salida Vcomp será positiva.

Por lo tanto la salida de la puerta AND U12A estará en alto si y solo las señales Vcomp y PWM1 están en alto.

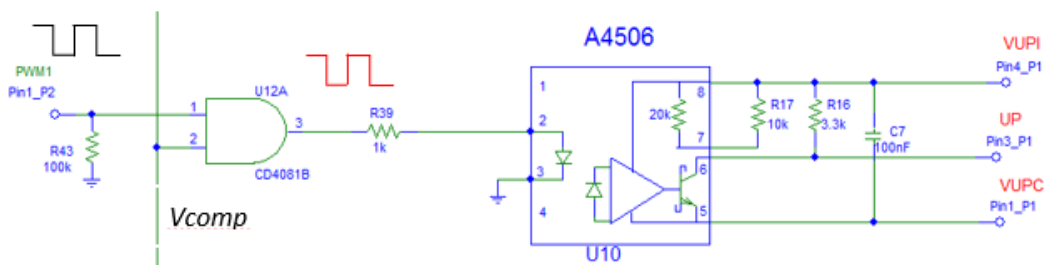


Figura 3.64 Circuito de disparo y aislamiento usando la señal PWM1.

La señal PWM1 es un pulso cuadrado como se muestra en la figura 3.64 cuya frecuencia viene dada por la programación del DSP, y dado que la señal Vcomp es una señal DC constante, en la salida de la puerta AND se tiene el mismo pulso cuadrado de la entrada. Dicho pulso cuadrado excita el fotodiodo del optocoplador A4506, produciendo que el pulso de la entrada se refleje en la salida en los terminales UP y VUPC, lo que quiere decir que en la salida del optocoplador se tiene la onda cuadrada PWM1. Los terminales UP y VUPC se conectan a través del conector P1 a la entrada de uno de los IGBTs de la tarjeta de potencia. El terminal restante VUPI es la alimentación para el IGBT.

Los circuitos para las señales PWM restantes son exactamente iguales, los pulsos cuadrados están conectados a la entrada de puertas AND, al igual que la señal Vcomp que es común para todas las puertas lógicas como se observa en la figura 3.6.

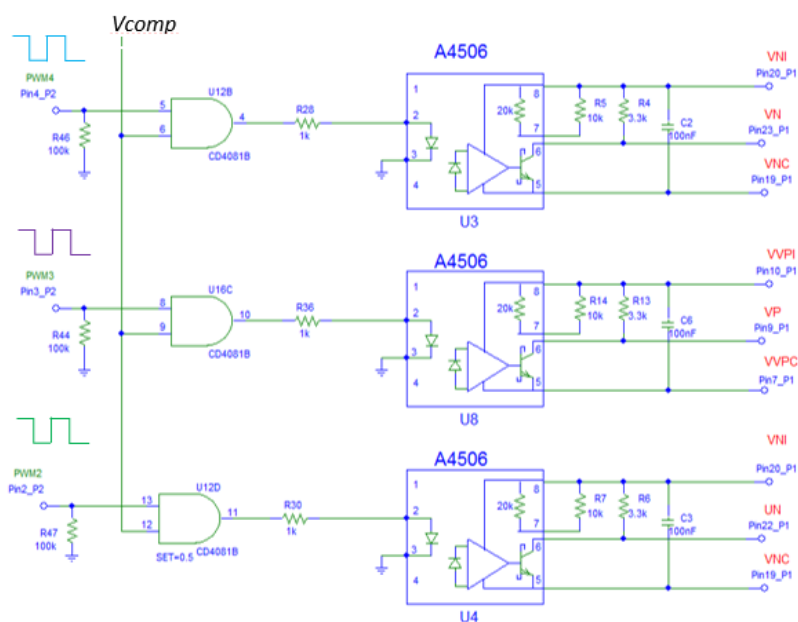


Figura 3.65 Circuitos de disparo y aislamiento usando las señales PWM4, PWM3 Y PWM2.

Las señales PWM producen la conmutación de los IGBTs, a través de optocopladores, cuya principal función es la de aislar el circuito de potencia del circuito de control. Para el optocoplador U3 entre los pines VN y VNC se encuentra el pulso de disparo, y el pin VNI es alimentación.

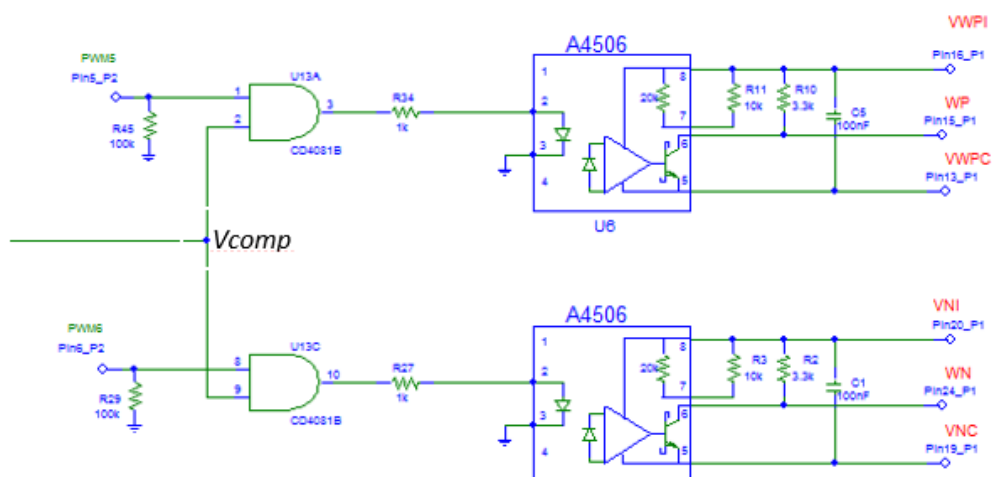


Figura 3.66 Circuitos de disparo y aislamiento usando las señales PWM5 Y PWM6.

En total se tienen seis señales manejar los IGBTs, y como se puede observar en la figura 3.66 los circuitos para procesar las señales PWM5 y PWM6 funcionan de la misma manera que los circuitos para las señales PWM que se analizaron anteriormente. Cabe recalcar que las señales PWM2, PWM4 y PWM6 son complementarias a las señales PWM1, PWM3 y PWM5 respectivamente.

Adicionalmente, se dispone de un circuito disparador más figura 3.67, cuya función es la conmutación del IGBT que pone en funcionamiento al troceador.

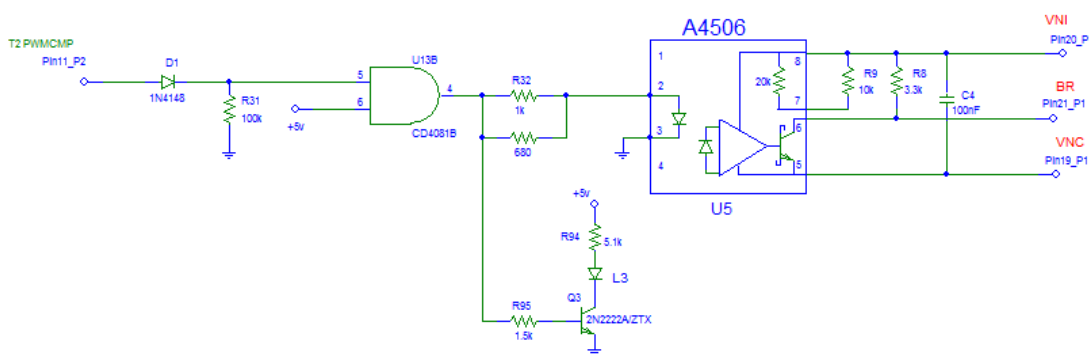


Figura 3.67 Circuito de activación del troceador clase A

Para la activación del troceador se utiliza la señal T2 PWMCMPP proveniente del controlador, y de igual manera que en las señales PWM se utiliza un optocoplador para conectar la etapa de control con la etapa de potencia. La señal de entrada para el troceador está en los pines BR y VNC, el pin restante VNI es alimentación. Además, se dispone de un transistor Q3 que sirve para encender el led L3 que indica si el troceador está en funcionamiento.

3.3. Aplicaciones del Módulo de Potencia PEC16DSM01

Para demostrar la funcionalidad del módulo de potencia, se desarrollaron tres prácticas con el mismo, las cuales son:

- Control V/F en lazo abierto para un motor AC.

- Control de campo orientado (FOC) en lazo abierto para un motor AC.
- Control de campo orientado (FOC) en lazo cerrado para un motor AC.

3.3.1. Control V/F en lazo abierto para un motor AC.

Para realizar el control voltaje frecuencia (V/F) de un motor AC se necesitan tres componentes, los cuales son un circuito controlador (TRAINER KIT MICRO 2812), un circuito de fuerza (Modulo de potencia PEC16DSM01) y una interfaz de control, en este caso la computadora.

Primeramente se realiza la conexión entre la computadora y el controlador MICRO 2812. Como enlace, para efectuar dicha conexión, se utiliza un emulador J-TAG XDS510LC, el cual se muestra en la figura 3.68.



Figura 3.68 Emulador J-TAG XDS510LC

El emulador J-TAG XDS510LC posee un cable USB que se conecta al computador y además tiene 13 pines que se conectan al controlador MICRO 2812. A su vez, la conexión en el controlador se realiza a través del puerto P2, el cual posee 14 pines. La distribución de los pines del conector P2 del controlador y del emulador J-TAG se muestran en la figura 3.69.

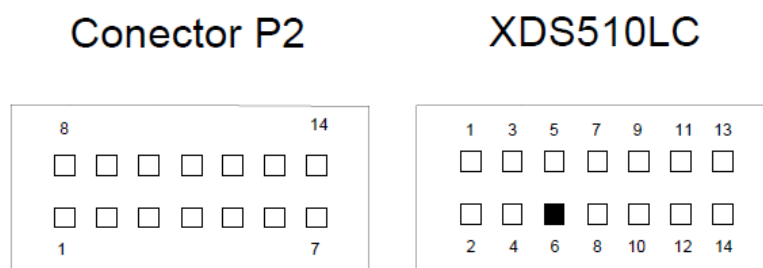


Figura 3.69 Distribución de pines del Puerto P2 y del emulador XDS510LC

La forma de conexión entre el emulador JTAG XDS510LC y el puerto P2 del controlador MICRO 2812 se muestra en la tabla 9.

Conector P2	JTAG XDS510LC	Conector P2	JTAG XDS510LC
1	1	8	2
2	3	9	4
3	5	10	6
4	7	11	8
5	9	12	10
6	11	13	12
7	13	14	14

Tabla 9: Detalle de pines del JTAG XDS510LC y el puerto P2 del controlador MICRO 2812

Finalmente, la conexión entre la computadora y el controlador MICRO 2812 se observa en la figura 3.70. Para realizar el conexionado desde los pines

del emulador JTAG hacia los pines del puerto P2 del controlador se utilizaron cables puentes.



Figura 3.70 Conexión entre la PC y el controlador MICRO 2812

Cabe recalcar que el controlador MICRO 2812 se alimenta con 120Vac, a través de un puerto ubicado en la parte posterior del equipo como se muestra en la figura 3.71.



Figura 3.71 Conector de alimentación del controlador MICRO 2812

Luego, se realizó la conexión entre el controlador MICRO 2812 y el módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, para ello se identifican los puertos de entrada y salida tanto del controlador como del módulo.

Para el controlador MICRO 2812, se utiliza el puerto P6 de 34 pines como salida figura 2.7 y el puerto P10 de 26 pines como entrada figura 2.4, y en el caso del módulo de potencia PEC16DSM01, el conector de entrada es el que tiene la marca IGBT – PWM INPUTS, figura 3 y el conector de salida

es el marcado con FEEDBACK SIGNALS, figura 4, que se observan en la sección de anexos.

En la figura 3.72 se muestran las conexiones entre el controlador MICRO 2812 y el módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, las cuales se realizan utilizando buses de datos.

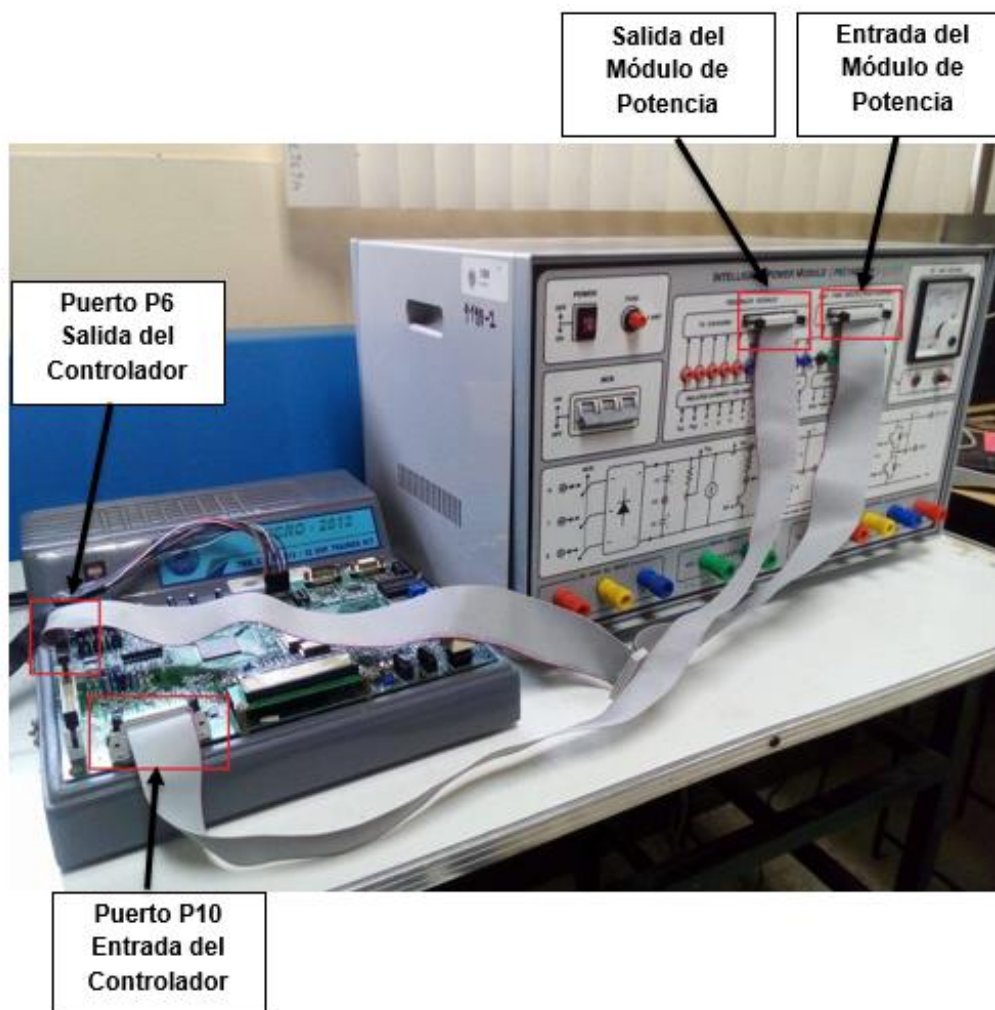


Figura 3.72 Conexión entre el controlador MICRO 2812 y el módulo PEC16DSM01

Una vez realizada la conexión de entradas y salidas entre ambos equipos, se procede a energizar la etapa de potencia del módulo PEC16DSM01. Nominalmente el equipo funciona con 440V, pero debido a que en el

laboratorio de Electrónica de Potencia no se dispone de dicha tensión, se utiliza un voltaje de 200V. Este cambio en el nivel de voltaje de alimentación, no altera el funcionamiento del módulo de potencia.

En los terminales de salida del módulo de potencia se conecta el motor trifásico 083-4YA80 que se usa en las tres prácticas. La potencia y corriente nominal del motor es 1HP y 1.8A respectivamente, además sus devanados están conectados en estrella.



Figura 3.73 Motor AC 083-4YA80

En la figura 3.74 se muestran las conexiones en la entrada y salida de la etapa de potencia del módulo PEC16DSM01.

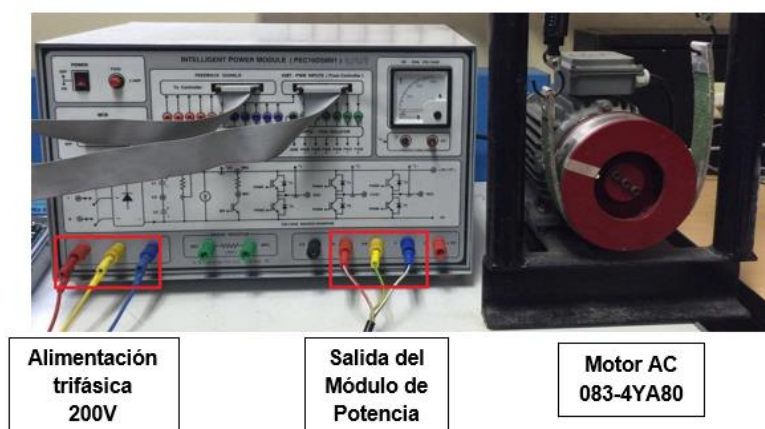


Figura 3.74 Conexiones de entrada y salida de la etapa de potencia del módulo PEC16DSM01

Después de realizar todas las conexiones descritas anteriormente, se puede controlar el motor AC en lazo abierto, como es el caso del control voltaje frecuencia (V/F), ya que para dicho control no es necesario obtener la posición del motor.

3.3.2. Control de campo orientado (FOC) en lazo abierto y cerrado para un motor AC

Para el control de campo orientado (FOC) tanto en lazo abierto como en lazo cerrado se necesita adquirir la posición del motor, para lo cual se utiliza un encoder.

El motor AC 083-4YA80 utilizado en las tres practicas tiene incorporado en su eje el encoder HEDS-5645, el cual se observa en la figura 3.75.

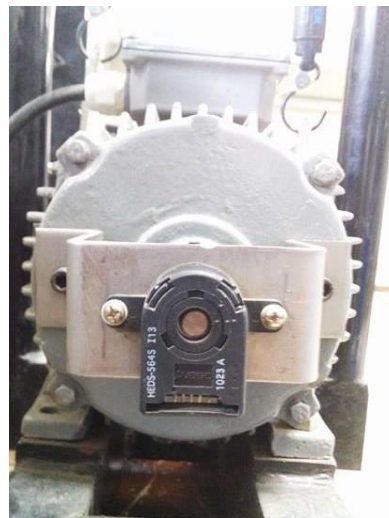


Figura 3.75 Encoder HEDS-5645 ubicado en el eje del motor AC

Dicho encoder entrega cinco señales, las cuales son Canal A (Ch. A), Canal B (Ch. B), Índice, +5V y tierra (GND) [14]. La distribución de los pines se muestra en la figura 3.76.

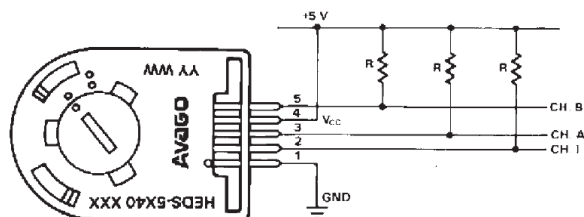


Figura 3.76 Distribución de pines del encoder HEDS-5645

Las señales del encoder se conectan al controlador MICRO 2812 a través del adaptador PEC-01-ESC, el cual sirve como aislador entre los dos equipos. El funcionamiento del adaptador PEC-01-ESC se detalla en la sección de Anexos.

Cabe recalcar que para realizar la conexión entre el encoder y el adaptador PEC-01-ESC se utilizó un cable DB9, mientras que para conectar el adaptador con el controlador MICRO 2812 se utilizaron cables puentes. Además dado que no se tiene acceso al puerto P6 del controlador MICRO 2812, puesto que en el mismo está conectado un bus de datos, la conexión de los cables puentes se realiza en una entrada secundaria del mismo bus de datos que está conectado al puerto P6 del controlador.

En la figura 3.77 se muestra la conexión completa entre el encoder HEDS-5645 y el controlador MICRO 2812.

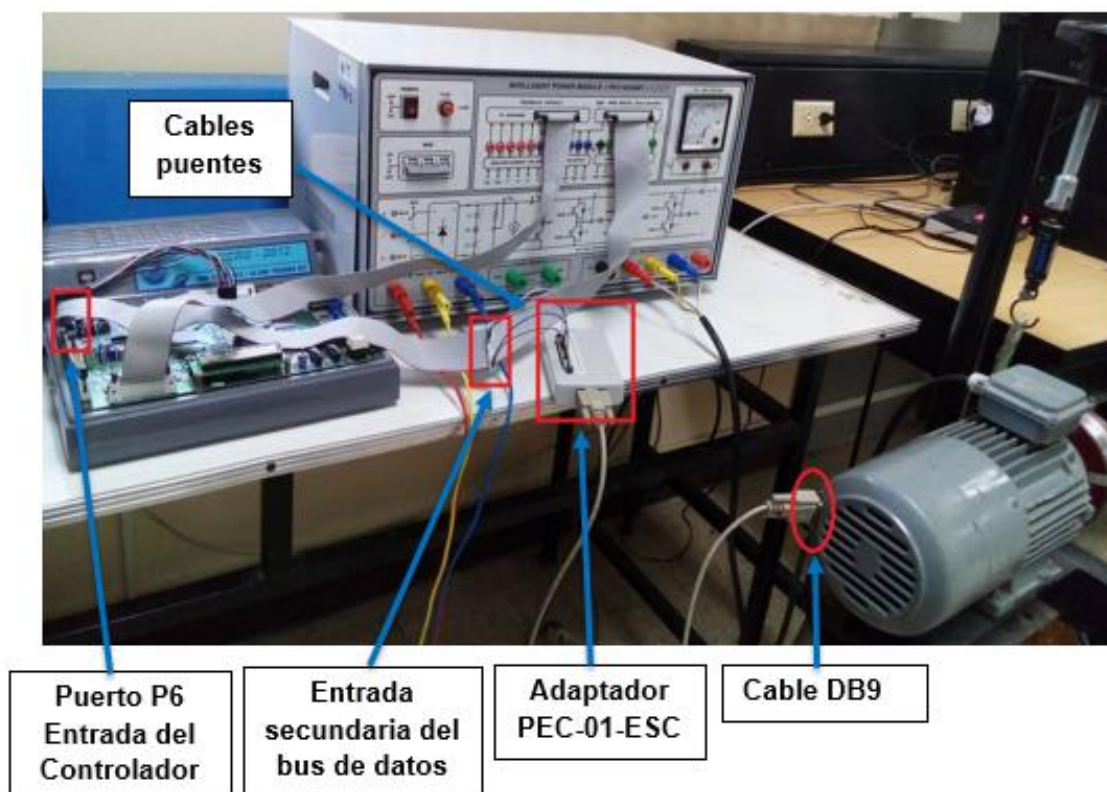


Figura 3.77 Conexión entre encoder HEDS-5645 y el controlador

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos al poner en marcha el módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, como gráficas de señales de voltaje, reemplazo de elementos dañados y limpieza de las tarjetas electrónicas.

4.1. Repotenciación del módulo de potencia PEC16DSM01

4.1.1. Tarjeta electrónica de fuentes DC

Dado que en la tarjeta electrónica de fuentes (+5,+15 y -15V) y en la fuente que se encuentra en la tarjeta electrónica de indicación de velocidad no se encontró ningún daño, solo se realizó limpieza de las mismas.

En la figura 4.1 se muestra la tarjeta de indicación de velocidad luego de que se realizó la limpieza y resoldado de los pines.

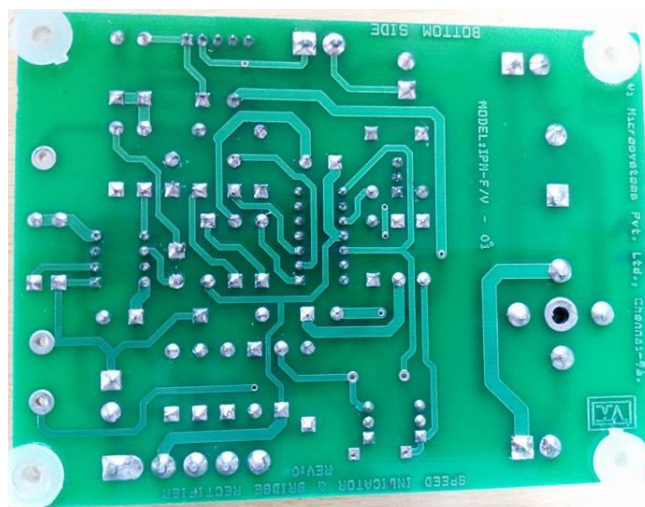


Figura 4.1 Tarjeta de indicación de velocidad limpia

4.1.2. Tarjeta electrónica de control

Reemplazo de Potenciómetro

Una vez que se reemplazó el potenciómetro Iset que tenía los pines rotos y se reconstruyó los anillos dañados, se pudo ajustar correctamente los valores de resistencia, con lo cual el módulo dejó de detectar cortocircuitos falsos en la barra DC.

En las figuras 4.2 y 4.3 se muestra el nuevo potenciómetro Iset soldado correctamente y los anillos de la tarjeta reconstruidos respectivamente.

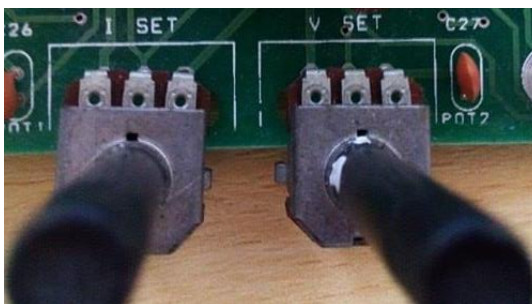


Figura 4.2 Potenciómetros Iset y Vset soldados correctamente

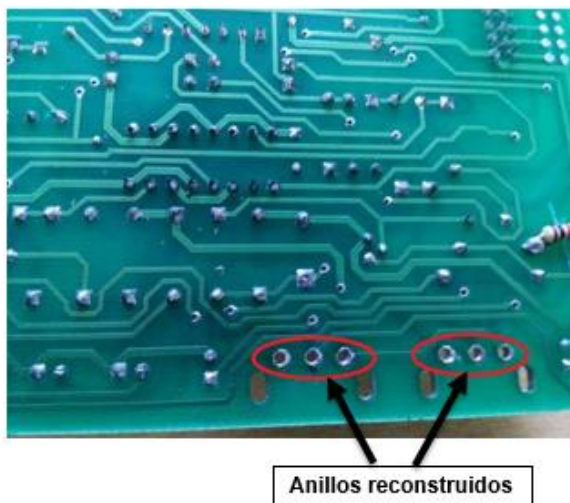


Figura 4.3 Anillos reconstruidos para los potenciómetros Iset y Vset

Reemplazo de Integrado TL084

Dado que en el laboratorio no se dispone de repuestos, se extrajo el operacional TL084 de la tarjeta de acondicionamiento de señales del segundo módulo de potencia (El laboratorio de Electrónica de Potencia cuenta con dos tarjetas de acondicionamiento de señales) y se reemplazó por el dañado, con lo cual se eliminó el calentamiento excesivo del integrado.



Figura 4.4 Amplificador Operacional TL084 nuevo

Reemplazo de Optocopladores A4506

Antes de colocar los nuevos optocopladores en la tarjeta de acondicionamiento de señales se probaron con el trazador de curvas y el resultado se observa en la figura 4.5.

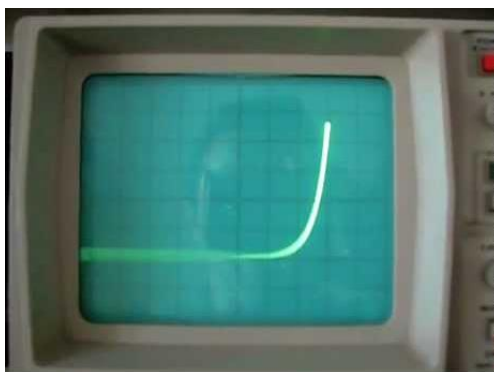


Figura 4.5 Salida de los nuevos optocopladores visualizadas con trazador de curvas

Además, con ayuda de un osciloscopio se verificó que las señales PWM en la salida de los nuevos optocopladores eran correctas, figura 4.6.

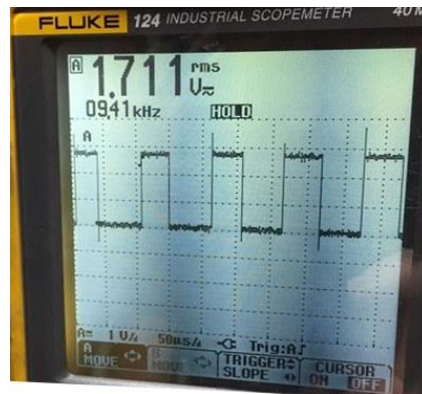


Figura 4.6 Señal de salida de los nuevos optocopladores

4.1.3. Tarjeta electrónica de la etapa de potencia

Limpieza y Soldadura de la tarjeta electrónica

Se realizó la limpieza de la tarjeta de potencia, así como también se volvió a soldar los elementos que tenían soldadura fría y el resultado se muestra en las figuras 4.7 y figura 4.8.

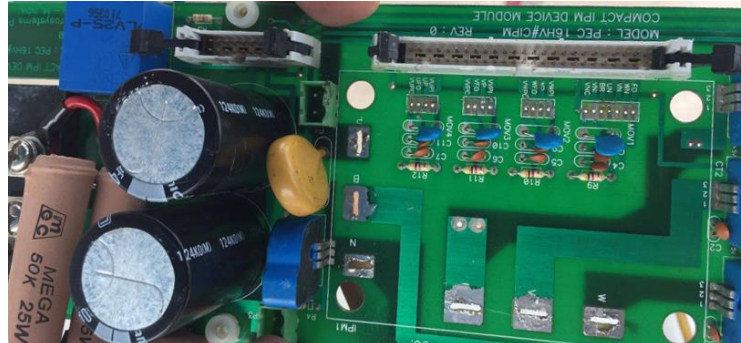


Figura 4.7 Limpieza de la parte superior de la Tarjeta electrónica de potencia

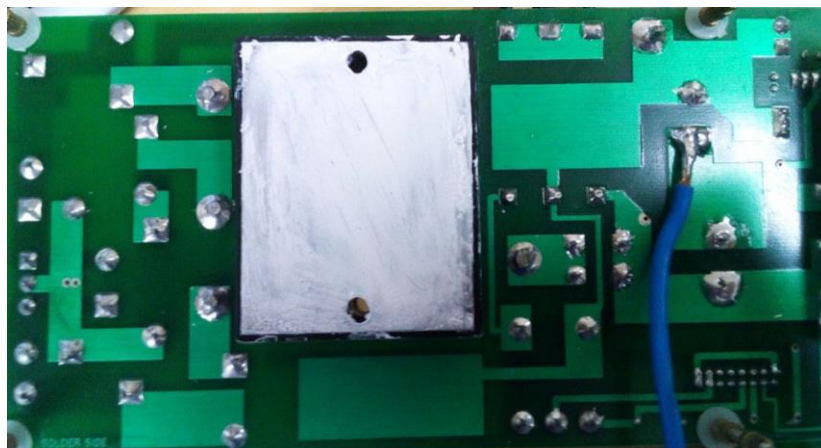


Figura 4.8 Resoldado y limpieza de la parte posterior de la Tarjeta electrónica de potencia

Además, se reconstruyó las pistas en la entrada a los disparos del módulo de potencia como se observa en la figura 4.9.

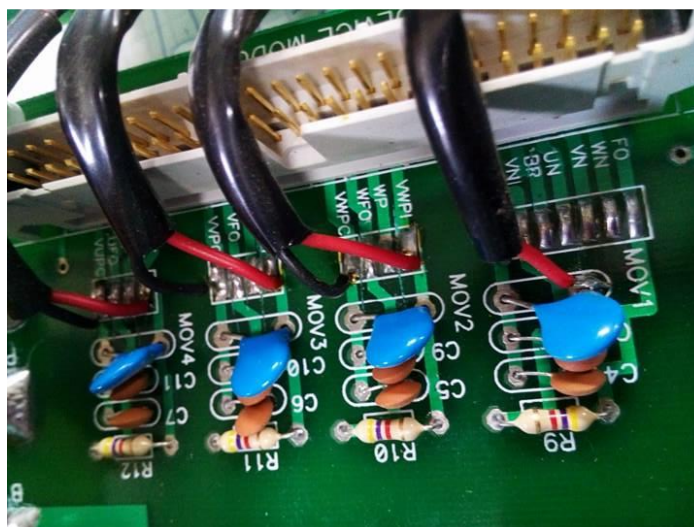


Figura 4.9 Resoldado y reconstrucción en los disparos de la Tarjeta electrónica de potencia

Fuente para los disparos de los IGBTs

En la figura 4.10 se observan los nuevos cables usados para los disparos de los IGBTs, soldados tanto en la tarjeta electrónica de fuente como de potencia, así como también las resistencias y capacitores resoldados.

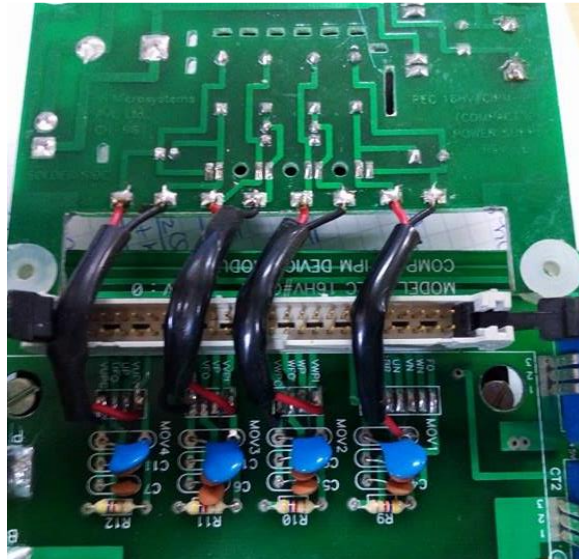


Figura 4.10 Resoldado de cables en la fuente y en la tarjeta de potencia

Gráficas de salida del módulo de potencia

Una vez que se terminó las reparaciones en las tarjetas electrónicas, se realizó las mediciones de los voltajes de salida del inversor y las formas de onda se presentan en las 4.11, 4.12 y 4.13.

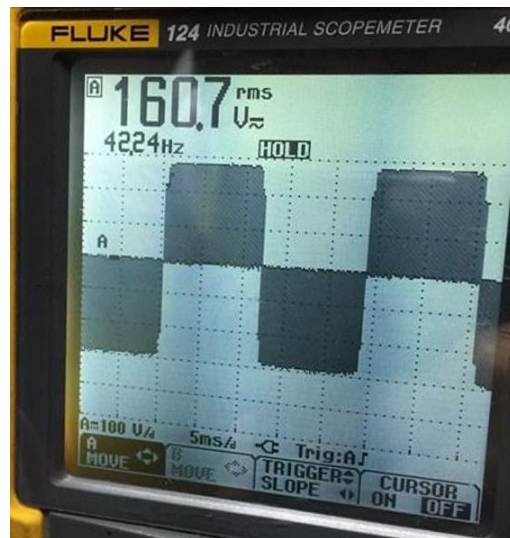


Figura 4.11 Voltaje de salida de las Líneas U-V

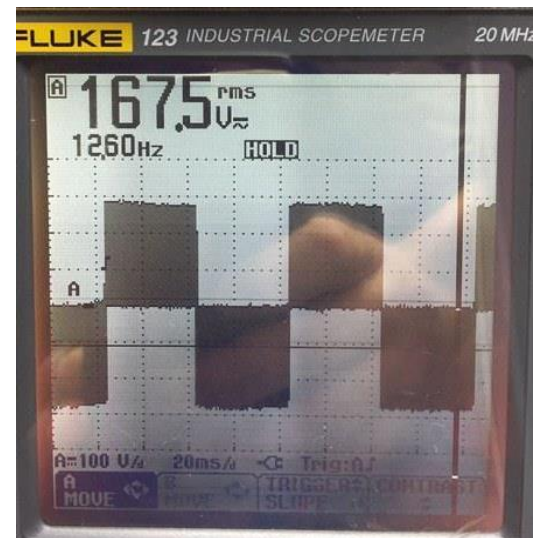


Figura 4.12 Voltaje de salida de las Líneas V-W

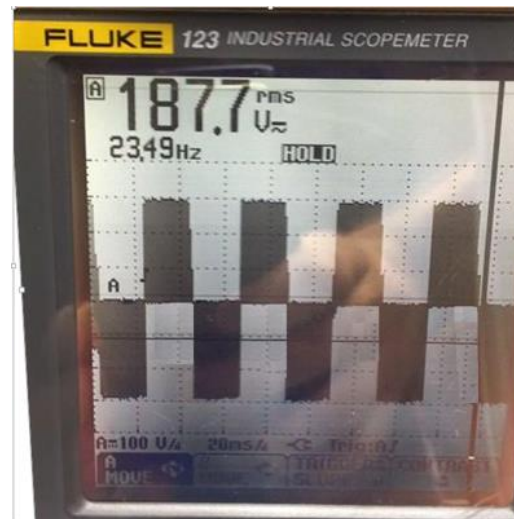


Figura 4.13 Voltaje de salida de las Líneas U-W

Se observa que las salidas de voltaje alcanzan tanto el valor positivo como negativo de la barra DC (+300 y -300Vdc), y que las tres señales tienen el mismo patrón bipolar, además la frecuencia configurada en el controlador

DSP, es la misma que se ve en la salida del inversor. Con estos valores de voltaje de salida, el movimiento del motor se produce de manera correcta y sin calentar

Una vez resuelto el problema en la salida del equipo, se pudo implementar tanto el control escalar como vectorial para el motor AC, los cuales se describen en detalle en la sección de anexos.

4.2. Prácticas con el módulo de potencia PEC16DSM01

Se realizaron tres prácticas de control de un motor AC con el módulo de potencia PEC16DSM01, y en esta sección se presentan los resultados obtenidos tanto con el software de programación VisSim, como con los instrumentos de medición disponibles en el laboratorio de Electrónica de Potencia.

4.2.1. Primera práctica: Control V/F en lazo abierto de un motor AC

En la primera práctica se controló la frecuencia del motor AC, a través de un slider, y en la figura 4.14 se muestra la frecuencia de comando.

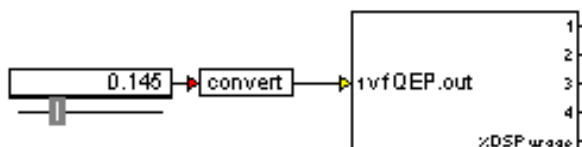


Figura 4.14 Frecuencia configurada en el software VisSim

Al colocar el valor de frecuencia de 0.145 Hz, el motor gira en el sentido de las manecillas del reloj, y con ayuda de un multímetro se grafica la señal de salida del módulo de potencia, la cual se observa en la figura 4.15. Cabe recalcar que el valor de la frecuencia de comando está escalado a 10, por ejemplo 0.1 corresponde a 10Hz.

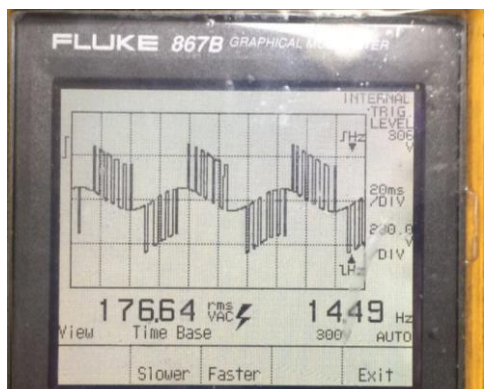


Figura 4.15 Frecuencia aplicada al motor



Figura 4.16 Motor girando en el sentido de las manecillas del reloj

Se puede observar que la frecuencia de salida del módulo de potencia es exactamente la misma que configuramos en el software VisSim, además de esto se puede visualizar en VisSim la velocidad de giro del motor como se observa en la figura 4.17

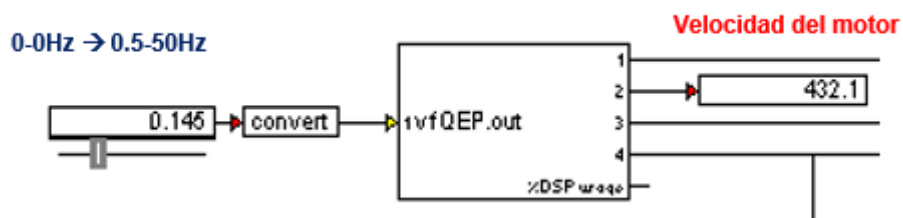


Figura 4.17 Velocidad de giro del motor visualizada en VisSim

La velocidad obtenida por el encoder es 432.1 RPM, y para comprobar que dicha velocidad es correcta se utilizó un tacómetro para medirla, figura 4.18.



Figura 4.18 Velocidad de giro del motor obtenida con un tacómetro

Dado que ambas velocidades son aproximadamente iguales, se concluye el encoder del motor AC funciona correctamente, y que la programación realizada en VisSim es correcta también.

Se aumentó la frecuencia de comando a 0.32Hz como se muestra en la figura 4.19, y los resultados de la frecuencia de salida y la velocidad se observan en las figuras 4.20 y 4.21.



Figura 4.19 Frecuencia de comando de 0.32 y Velocidad del motor en 945.4 RPM visualizada en VisSim

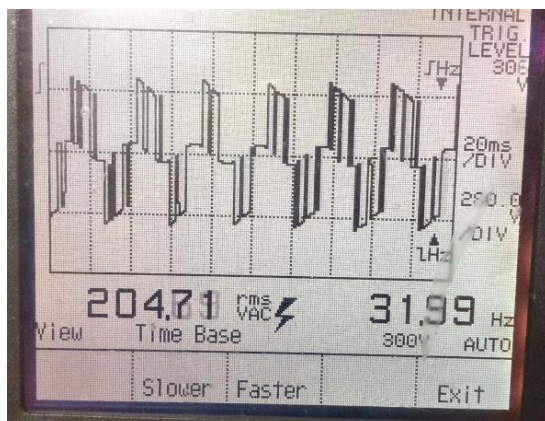


Figura 4. 20 Frecuencia de 31.99 Hz aplicada al motor



Figura 4. 21 Velocidad de 946.7 RPM obtenida con tacómetro

Adicionalmente se adquirió las corrientes de las líneas U y V del motor a través del convertidor analógico digital del controlador MICRO 2812, y las formas de onda se muestran en las figuras 4.22 y 4.23.

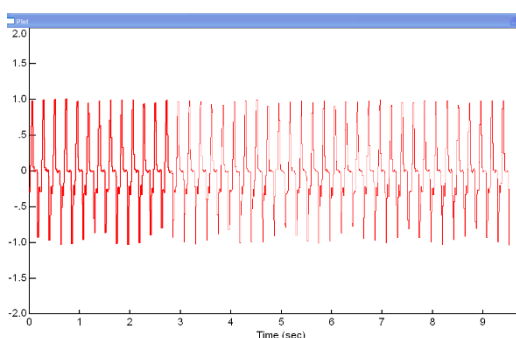


Figura 4.22 Corriente de la Línea U del motor AC

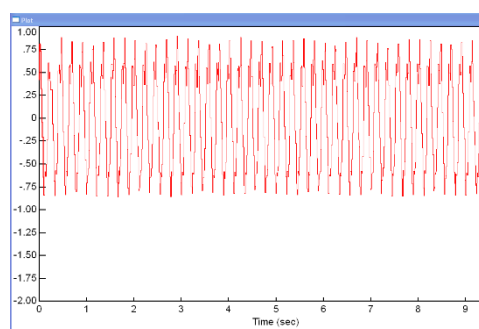


Figura 4.23 Corriente de la Línea V del motor AC

Se puede observar que ambas corrientes son aproximadamente iguales, y tienen un valor de 1A.

4.2.2. Segunda práctica: Control de campo orientado (FOC) en lazo abierto de un motor AC

En la segunda práctica se controló la velocidad del motor AC, para lo cual se utilizó una señal de comando ubicada entre 0 y 1, la cual representa la velocidad deseada.

En la figura 4.24 se observa que el setpoint de velocidad se colocó en 400.4 RPM, y la velocidad adquirida por el encoder fue de 397.3 RPM, ya que ambos valores son casi iguales se concluye que el control es óptimo.

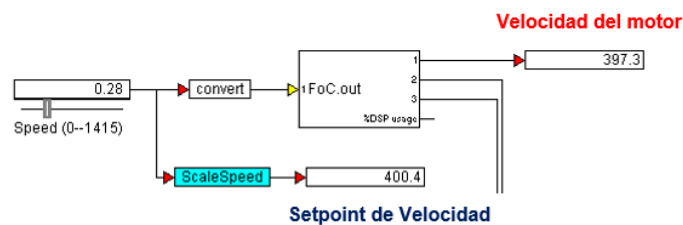


Figura 4.24 Setpoint colocado en 400.4 RPM y respuesta del motor 397.3 RPM

Adicionalmente, se tomó la medición con el tacómetro y el resultado se observa en la figura 4.25.



Figura 4.25 Medición de 397.9 RPM utilizando un tacómetro

Se incrementó el setpoint de velocidad hasta un valor de 815.1 RPM y tal como se puede ver en la figuras 4.26 y 4.27 la respuesta del motor no fue tan favorable.

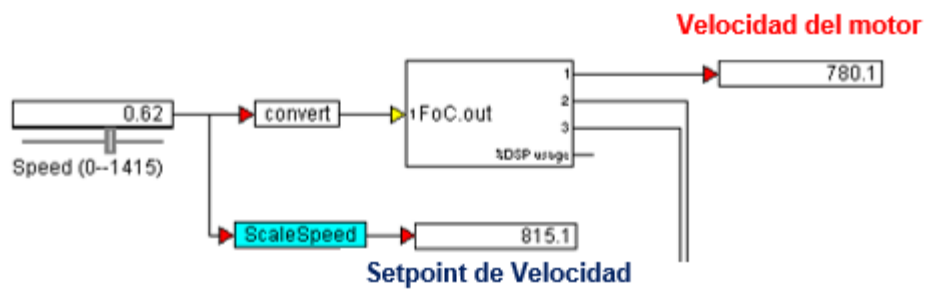


Figura 4.26 Setpoint colocado en 815.1 RPM y respuesta del motor 780.1 RPM



Figura 4.27 Medición de 797.0 RPM utilizando un tacómetro

En vista de los resultados se concluye que el control FOC en lazo abierto responde muy bien a bajas velocidades, pero al incrementar el setpoint de velocidad la respuesta del motor pierde exactitud. Dada esta complicación se implementó un control PID en el control FOC para mejorar la regulación de velocidad.

4.2.3. Tercera práctica: Control de campo orientado (FOC) en lazo cerrado de un motor AC

Se implementó un control PID para regular la velocidad del motor, y se utilizó tres diferentes señales de comando, en esta sección se muestran los resultados.

Entrada Sinusoidal

Se colocó como setpoint del sistema una señal sinusoidal (color azul), y la respuesta del motor ante esta señal se muestra en color rojo en la figura 4.28.

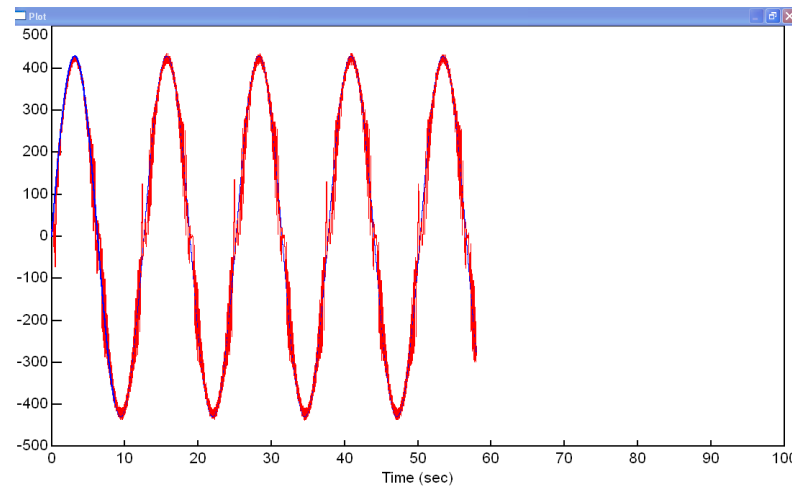


Figura 4.28 Respuesta del motor ante una entrada sinusoidal

Se observa claramente que a medida que la sinusoidal aumenta, el motor aumenta su velocidad para igualar el setpoint, y cuando la sinusoidal disminuye el motor disminuye su velocidad, se detiene y cambia de giro.

Entrada Triangular

Para este caso se utilizó el mismo controlador PID que para la señal sinusoidal, se colocó una señal triangular como setpoint y el resultado se observa en la figura 4.29.

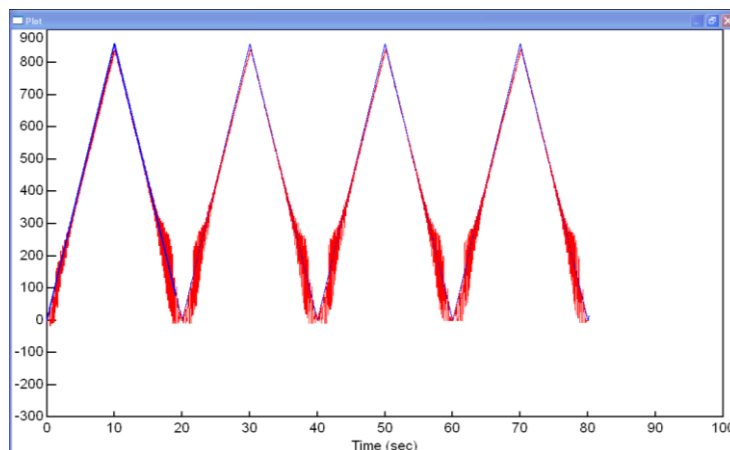


Figura 4.29 Respuesta del motor ante una entrada triangular

En este caso el motor no realizó inversión de giro, ya que la triangular solo abarca valores positivos de velocidad. El motor aumento su velocidad progresivamente hasta llegar al valor máximo y luego también progresivamente descendió hasta llegar a cero.

Entrada tipo Escalón

Finalmente se utilizó como referencia de velocidad una entrada tipo escalón, la cual toma valores negativos, pasa por cero y luego toma valores positivos. Dado que los cambios de negativo a positivo son bruscos, la función escalón es ideal para comprobar que el control de velocidad funciona correctamente.

En la figura 4.30 se observa en color azul las funciones escalones tanto positivos como negativos, y en color rojo se muestra la respuesta del motor ante los cambios bruscos de la referencia.

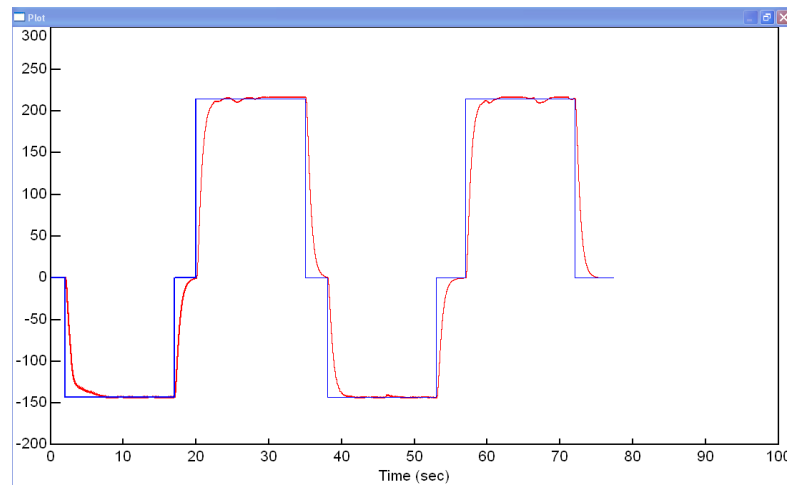


Figura 4.30 Respuesta del motor ante una entrada escalón

Se observa que la respuesta del motor es muy buena en función de los cambios de referencia, ya que se ajusta rápidamente tanto a los valores positivos como negativos de velocidad. Cabe recalcar que el control PID para la función escalón no es el mismo que para las funciones triangular y sinusoidal.

El detalle de la realización de las prácticas se muestra en la sección de anexos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El módulo de potencia inteligente PEC16DSM01 es muy versátil y permite manejar diferentes tipos de cargas tanto AC como DC. En el grupo de cargas AC que se pueden conectar al equipo se tienen motores jaula de ardilla, de rotor devanado y servomotores utilizando los tres ramales del puente inversor, además puede controlar motores y servomotores DC utilizando un ramal o dos ramales del puente inversor, para esto se deben realizar nuevos programas, ya que la programación realizada en este proyecto es únicamente para motores AC. El equipo PEC16DSM01 tiene la limitante de que el módulo de potencia PM25RSB120 maneja un máximo de 25A, pero dado que en el Laboratorio de Electrónica de Potencia de ESPOL no se dispone de ningún motor que exceda esa corriente, el modulo se puede usar perfectamente para realizar prácticas de control con cualquiera de los motores disponibles en el laboratorio.

El control escalar (Voltaje/frecuencia) realizado en el motor AC es el control más sencillo de los tres controles implementados, ya que, dado que es un control en lazo abierto y no es necesario aplicar ninguna acción de corrección sobre el motor, no se necesita adquirir la velocidad o posición del mismo, por cual no es necesaria la conexión de un encoder u otro sensor, en comparación con los controles de campo orientado (FOC) tanto en lazo abierto como lazo cerrado, dado que en dichos controles la posición y velocidad del motor deben ser conocidas, así como las corrientes I_d e I_q del motor, para compararlas con las señales de comando, las cuales se colocan por software (VisSim), y aplicar las correcciones respectivas frente a diferentes tipos de entradas o perturbaciones tales como señales triangulares, sinusoidales y cuadradas.

Para realizar la repotenciación del módulo de potencia inteligente PEC16DSM01, es de importancia crítica la obtención de los diagramas electrónicos de las tarjetas que posee el equipo, ya que en el momento que se producen errores en el funcionamiento del módulo o en elementos del mismo, se puede encontrar dichos errores y solucionarlos ya sea reparando los elementos dañados o en algunos casos reemplazándolos por elementos nuevos. Si no se dispone de los diagramas

electrónicos entonces se desconoce el funcionamiento del equipo, y en el caso de que se produzca algún error en el módulo, no se podrá identificarlo, lo que hará imposible corregirlo, y dado que no se dispone de ningún manual o información del equipo, no se puede consultar en fuentes externas para conocer el funcionamiento del módulo de potencia.

Para poder realizar las prácticas de manera correcta se recomienda reemplazar el encoder situado en el eje del motor AC, o en su defecto cambiar el conector DB9 y los cables de comunicación del encoder.

Utilizar cables puentes ("Jumpers") para conectar el adaptador PEC-01-ESC con el controlador MICRO 2812.

Revisar que los capacitores conectados a los pines de captura de la DSP TMS320F2812 estén correctamente soldados, y no haya contacto entre ellos, lo cual producirá errores en el funcionamiento del encoder.

Asegurarse que el dispositivo que contiene la licencia del software VisSim esté conectado todo el tiempo en el computador, ya que, de no ser así ningún programa funcionará.

La conexión entre el computador y el controlador MICRO 2812 debe realizarse con cuidado, como se muestra en el capítulo 3 de este proyecto, ya que una conexión diferente ocasiona cortocircuitos en el controlador, lo cual puede dañar la DSP.

En el caso de utilizar los puertos CAP del panel frontal del módulo de potencia para conectar el encoder, no olvidar polarizar el sensor con +5Vdc.

Antes de utilizar el módulo de potencia, revisar los diagramas electrónicos y el manual de operación del equipo, para operarlo de manera correcta y con conocimiento de causa.

Tener cuidado al operar el módulo de potencia, ya que funciona con tensiones altas, las cuales pueden causar daños a las personas, e incluso muerte.

Para instalar los softwares necesarios para realizar las prácticas tales como VisSim y Code Composer Studio utilizar Windows XP, debido a que, versiones superiores de Windows causan problemas en la simulación y funcionamiento de los programas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] VI Microsystems, Micro-2812 Technical Reference, Perungudi, CHENNAI, 600096, 2005.
- [2] Texas Instruments, SM320F2812 Data Manual, Dallas, Texas, SGUS051B, 2010.
- [3] Visual Solutions, VisSim User's Guide, Westford, MA 01886, 2010.
- [4] Tanvir Jamadar and Vedashree Rajderkar, V/f Control Technique for three phase induction motor drive using DSP TMS320F2812, Nagpur, India, 2016.
- [5] Spectrum Digital, TMS320F2812 Digital Signal Processor, USA, 506265-0001, 2002.
- [6] Spectrum Digital, C2000 XDS510LC JTAG Emulator Installation Guide, Stafford, Texas, 77477, 2008.
- [7] VI Microsystems, Micro-2812 User Manual, Perungudi, CHENNAI, 600096, 2005.
- [8] LEM, Voltage Transducer LV25-P, Version 19, 12 de Agosto 2014.
- [9] LEM, Current Transducer LTS 25-NP, Version 22, 11 de febrero 2009.
- [10] Powerex, PM25RSB120 Intellimod Module, Perungudi, Hillis Street, Youngwood, Pennsylvania.
- [11] Isahaya Electronics, Hybrid IC VLA400-204, Tsukuba, Isahaya, Nagasaki, 854-0065, Japón, 2004.
- [12] Isahaya Electronics, Hybrid ICs M57140-01, Tsukuba, Isahaya, Nagasaki, 854-0065, Japón, 2002.
- [13] Nexperia, HEF4027B flip-flops Dual JK flip-flop, U.S.A., Rev. 10, 21 Marzo 2016.
- [14] Avago Technologies, HEDM-55xx Quick Assembly Two and Three Channel Optical Encoders, U.S.A., 20 de noviembre 2004.
- [15] D. Larco, "Diseño y construcción de una plataforma experimental de desarrollo y pruebas de sistemas de control vectorial de motores eléctricos mediante procesamiento digital de señales y programación asistida por computador", Tesis de maestría Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2013.

[16]Zhang Yuan, Sensorless Vector Control and Field Weakening Operation of PMSM, Ph.D Thesis, Ohio State University, 2010.

[17] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, "Analysis of Electrical Machines and Drive Systems", IEEE Press Power Engineering Series, 2002.

[18] S. Sánchez, "Diseño de Técnicas de Control No Lineal Clásica, Inteligentes y Lineal Sobre el Motor de Inducción", tesis de maestría Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.

ANEXOS

ANEXO1

Manual de usuario del equipo PEC16DSM01

El equipo PEC16DSM01 es un módulo de potencia inteligente que permite el control y manejo de una serie de motores tales como: AC, DC y servomotores tanto AC como DC. En este capítulo se describen las partes tanto internas como externas del equipo y la manera correcta de operarlo.

1. Descripción del panel frontal

El panel frontal del módulo de potencia mostrado en la figura 3.1 consta de las siguientes partes:

- Sección de encendido
- Entradas y Salidas
- Diagrama del Circuito de Potencia
- Entra trifásica
- Breaker Principal
- Protección de Barra DC
- Indicador de Voltaje de barra DC
- Alimentación Sección de Potencia
- Conexión resistencia de freno
- Salida de Sección de Potencia.

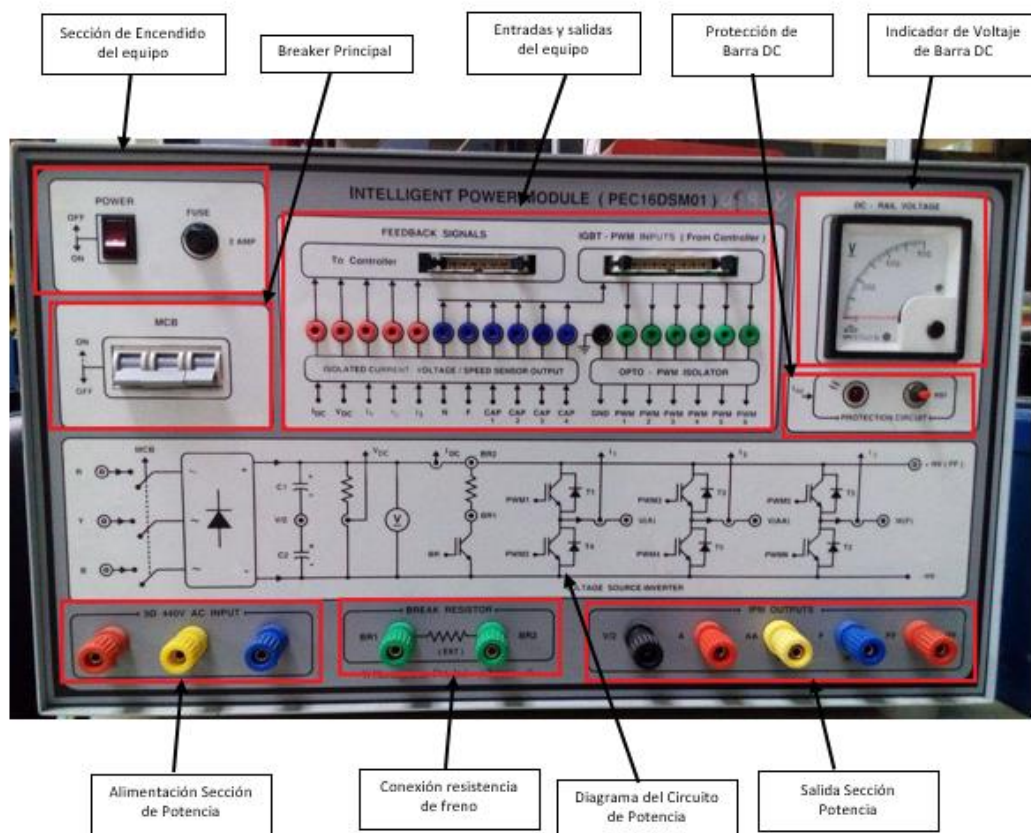


Figura 1 Panel frontal del módulo de potencia

1.1. Sección de encendido

La sección de encendido del equipo consta de dos elementos, los cuales son el botón (POWER) y un fusible de protección de 2A. Más adelante se detallará el procedimiento para encender el módulo.

1.2. Entradas y Salidas

Como se observa en la figura 2, el módulo de potencia dispone de dos conectores, un conector para recibir las señales provenientes del controlador (IGBT-PWM INPUTS) y otro conector para enviar señales desde el equipo al controlador (FEEDBACK SIGNALS).

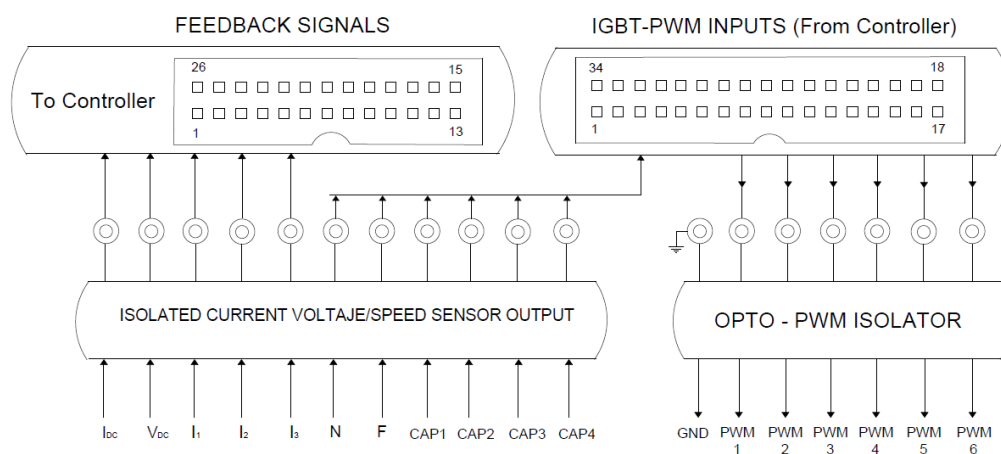


Figura 2 Entradas y salidas del panel frontal

Entradas del Equipo

La sección de entrada del módulo de potencia inteligente tiene la etiqueta de IGBT – PWMs INPUTS. Consiste en un conector de 34 pines, donde se conectan las señales provenientes del controlador.

Las entradas más importantes del módulo de potencia son las señales PWM, las cuales permiten la activación de los IGBTs para realizar las técnicas de control en los motores.

En la figura 3 se muestra la asignación de pines del conector de entrada, ubicando el pin 1 en la parte inferior izquierda y el pin 34 en la parte superior izquierda.

IGBT-PWM INPUTS (From Controller)

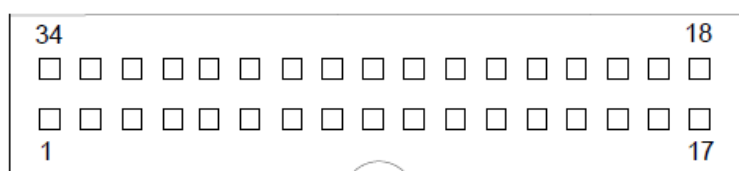


Figura 3 Pines del conector de entrada del módulo

La descripción de los 34 pines del conector de entrada se realizara en la tabla A1.

Pin	Detalle	Pin	Detalle
1	PWM1H	13	CAP1
2	PWM2H	14	CAP2
3	PWM3H	15	CAP3
4	PWM4H	16	CAP4
5	PWM5H	17	F
6	PWM6H	18, 19, 20, 21	GND
7	NC	22, 23, 24, 25	GND
8	NC	26, 27, 28, 29	GND
9	NC	30, 31, 32	GND
10	NC	33	NC
11	T2 PWMCMP	34	NC
12	T3 PWMCMP		

Tabla A1: Descripción de los 34 pines del conector de entrada

Los pines desde el 1 hasta el 6 son las señales PWM necesarias para manejar los IGBTs, dichas señales se conectan a una tarjeta de acondicionamiento de señales, en la cual por medio de optocopladores se enlazan las señales PWM y el módulo de IGBTs. Más adelante en este

capítulo se mostrará el circuito electrónico y el funcionamiento de la tarjeta de acondicionamiento de señales.

Los pines 11 y 12 son Timers o señales de reloj, T2 PWMCOMP sirve para la activación del troceador o chopper, mientras que T3 PWMCOMP trabaja con las fuentes que producen los disparos para los IGBTs. Cabe recalcar que ambos pulsos, tanto para el troceador como para la fuente, se conectan en la tarjeta de acondicionamiento de señales ya mencionada.

Los pines del 13 al 16 son unidades de captura. Como su nombre lo indica, sirven para capturar señales de entrada, en este caso se utiliza para adquirir las señales provenientes del encoder, a través de las cuales se obtendrá la posición del motor. Cabe recalcar que en el módulo de potencia solo está conectada la unidad de captura 2 (CAP2), por lo que se trabajara únicamente con esta entrada.

El pin 17 (F), es una señal de activación para los disparos de los IGBTs. Mientras esta señal este en un estado de bajo lógico (0V), los IGBTs no funcionarán aunque las señales PWM estén conectadas. En el momento que cambie a un nivel lógico alto (3.7V), las señales PWM activarán el módulo de IGBTs. El diagrama electrónico de esta sección se mostrara en el capítulo 3.

Desde el pin 18 hasta el pin 32 se tiene referencia, y los pines marcados con NC se encuentran flotantes, es decir no están conectados a ninguna parte del equipo.

Salidas del Equipo

El módulo de potencia dispone de seis salidas, las cuales se conectan al controlador del sistema. Dichas salidas provienen de la sección de potencia del equipo, y son datos que se obtienen a través del sensado tanto de voltaje como de corriente.

Para la conexión con el controlador, se dispone de un conector de salida de 26 pines que tiene la etiqueta FEEDBACK SIGNALS. La asignación de pines del conector de salida se muestra en la figura 4, ubicando el pin 1 en la parte inferior izquierda y el pin 26 en la parte superior izquierda.

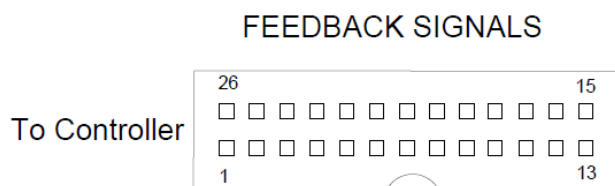


Figura 4 Conector de salida de 26 pines

En la tabla A2 se muestra la descripción de los 26 pines del conector de salida.

Pin	Detalle	Pin	Detalle
1	NC	10	NC
2	NC	11	I_{DC}
3	N	12	I_w
4	I_U	13	NC
5	I_V	14, 15, 16, 17, 18	GND
6	NC	19, 20, 21, 22, 23	GND
7	V_{DC}	24	NC
8	NC	25	NC
9	NC	26	NC

Tabla A2: Descripción de los 26 pines del conector de salida

El pin 3 (N) proviene del circuito electrónico “indicador de velocidad”, y junto con la señal CAP2 sirven para adquirir los datos de velocidad y posición del

motor eléctrico. El diagrama electrónico del circuito indicador de velocidad y su funcionamiento se describe en detalle en la sección 2.1 del capítulo 3.

Los pines 4, 5 y 12 corresponden a las corrientes de línea de salida del inversor I_U , I_V e I_w respectivamente. Dichas corrientes de línea son sensadas a través de sensores de efecto Hall, los cuales las convierten a valores de voltaje (0 a 5V). Esto permitirá adquirir las señales a través del controlador DSP para poder observarlas en tiempo real. Más adelante se verá en detalle el funcionamiento de los sensores de efecto Hall, así como su ubicación dentro del equipo.

Los pines 7 y 11 corresponden a los valores obtenidos de la barra DC. El valor V_{DC} corresponde al voltaje de la barra DC, e I_{DC} a la corriente de la misma. Para sensar la corriente de la barra DC se utiliza los mismos sensores de efecto Hall que se usaron en la salida del inversor para las corrientes de fase, mientras que para el voltaje de barra se utiliza un método similar, se sensa la corriente de barra, y a través de una resistencia por medio de la relación $V=IR$ se obtiene el voltaje de barra.

El conector de salida tiene 10 pines de tierra o GND, y 10 pines marcados con NC que significa que no se encuentran conectados.

Además de los conectores tanto de entrada como de salida, esta sección también posee 18 puntos de conexión. De estos puntos de conexión, 12 están cableados internamente hacia el conector de entrada y 6 al conector de salida. Cabe recalcar que la finalidad de estos puntos es poder medir las señales en el panel frontal, sin la necesidad de abrir el equipo.

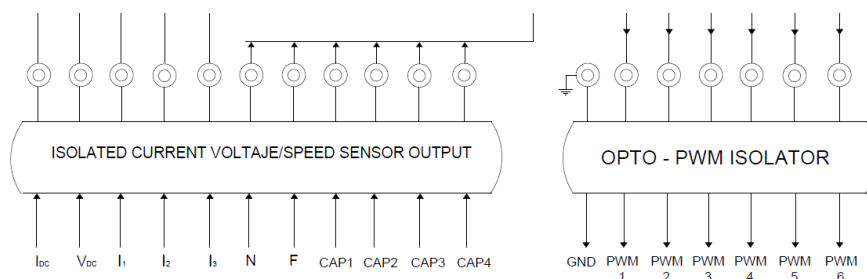


Figura 5 Borneras de entrada y salida del panel frontal

Desde la señal PWM6 hasta la señal F, se encuentran conectadas en el conector de entrada y, desde N hasta I_DC corresponden al conector de salida. El punto GND, es común para ambos conectores.

1.3. Diagrama del Circuito de Potencia

El diagrama del circuito de potencia que se encuentra en el panel frontal del módulo de potencia es una representación básica del circuito de potencia del equipo como se muestra en la figura 6. Las principales partes del circuito de potencia son las siguientes:

- Entrada Trifásica
- Breaker Principal
- Puente Rectificador Trifásico
- Barra DC
- Troceador o Chopper clase A
- Inversor Trifásico
- Salidas del inversor

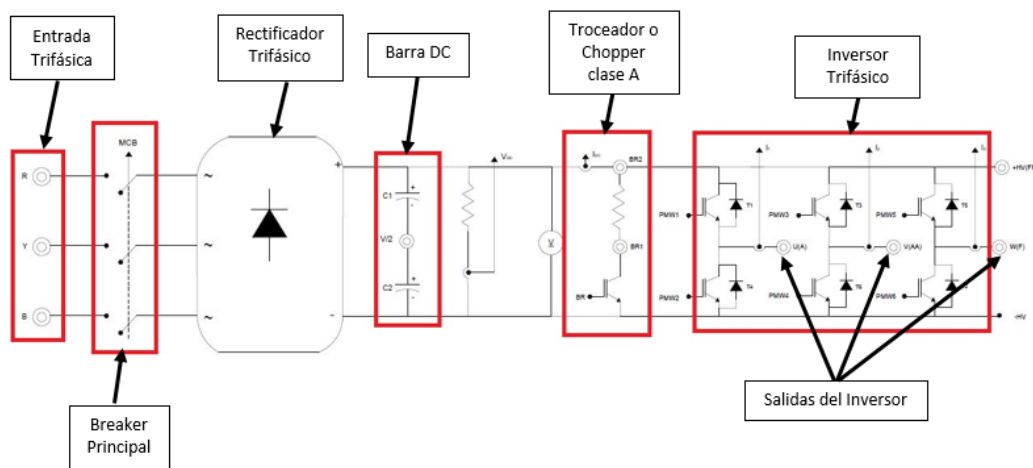


Figura 6 Diagrama del circuito de potencia en el panel frontal

1.4. Breaker principal

El breaker NC310 es de 10A y fabricado por la empresa Hager. En el panel se tiene la etiqueta MCB por sus siglas en inglés Miniature Circuit Breaker y su función es energizar la sección de potencia del módulo.



Figura 7 Breaker principal

1.5. Entrada trifásica

La sección de potencia se alimenta con un voltaje trifásico nominal de 440Vac, pero el módulo también funciona con voltajes menores como 208Vac y 380Vac. Las letras R, Y, y B son la representación india para las fases de alimentación trifásicas. R, Y, y B corresponden a U, V y W respectivamente.

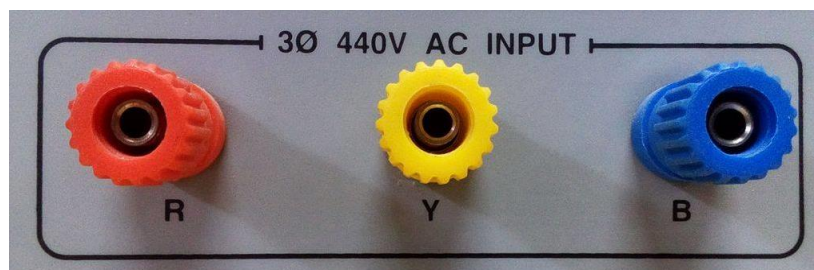


Figura 8 Borneras para alimentación trifásica

1.6. Protección de barra DC

El circuito de protección de la barra DC está compuesto por un pulsador RST y un led indicador como se muestra en la figura 9.



Figura 9 Indicador de protección de barra DC

El led se encenderá en el momento que el circuito de protección detecte un cortocircuito o sobre corriente en la barra DC, es decir hace las veces de una alarma. El pulsador RST sirve para resetear el circuito de protección. Una vez que se ha eliminado el cortocircuito o sobrecorriente en la barra DC se presiona el pulsador RST para salir del estado de alarma y poder operar el equipo de manera normal. Si no se eliminan los problemas o causantes de la alarma, al presionar el botón RST no pasara nada, el módulo seguirá alarmado, con el fin de proteger tanto al equipo como al usuario ya que un cortocircuito en la barra DC puede causar una explosión. El circuito de protección, así como su análisis se presenta en la sección 2.3.3 del capítulo 3.

1.7. Indicador de voltaje de barra DC

Este indicador analógico cumple la función de un voltímetro, es decir nos permite visualizar el voltaje de la barra DC. Posee una escala de 0 a 900Vdc.

La barra DC se ubica en la salida del puente rectificador, y la conexión del indicador con la barra DC se presenta en la figura 10:

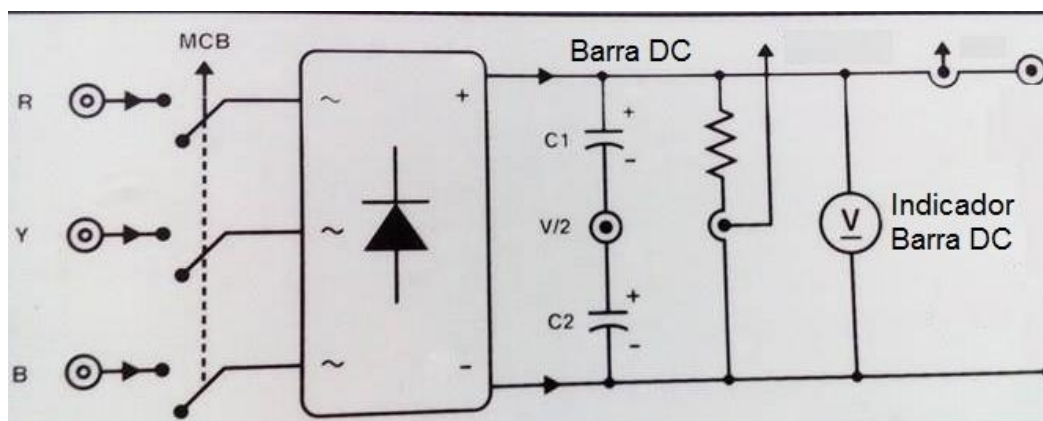


Figura 10 Conexión del indicador de voltaje de barra DC

La conexión es igual a la de un voltímetro, el indicador tiene dos cables, uno se conecta al terminal positivo de la barra, y el otro se conecta al terminal negativo. La identificación de la polaridad de los cables se realiza por medio del color de los mismos, ya que el cable positivo es de color rojo mientras que el cable negativo es de color negro.

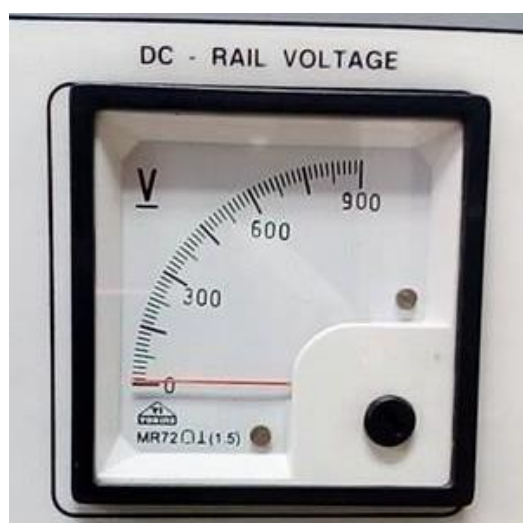


Figura 11 Indicador del voltaje de la barra DC

Cabe recalcar que mientras no se accione el breaker principal no se observara ningún voltaje en el indicador aunque ya esté conectada la alimentación trifásica.

1.8. Conexión resistencia de freno

Las borneras BR1 y BR2 son terminales para la conexión de una resistencia de frenado, figura 13. Esta resistencia se conecta entre el IGBT del troceador clase A y la barra DC como se muestra en la figura 12. Su función es limitar la tensión de la barra, es decir cuando el voltaje de la barra DC supere su valor nominal, el troceador se activa y disipa el exceso de voltaje a través de la resistencia.

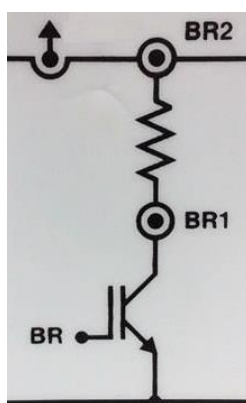


Figura 12 Troceador clase A

Cabe recalcar que dado que las resistencias no tienen polaridad se pueden conectar indistintamente a BR1 o BR2.

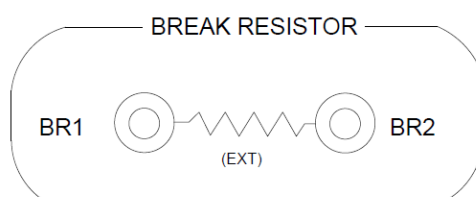


Figura 13 Borneras para la resistencia de frenado

1.9. Salida sección de potencia

La salida de la sección de potencia o salida del inversor figura 14 consiste en 5 terminales de conexión, los cuales se describen a continuación:

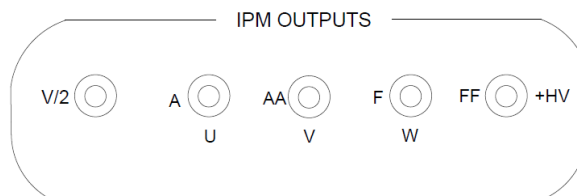


Figura 14 Borneras de salida del inversor

El terminal V/2 está conectado entre los capacitores de la barra DC, por lo tanto la lectura de voltaje en este punto será la mitad de la tensión total de la barra.

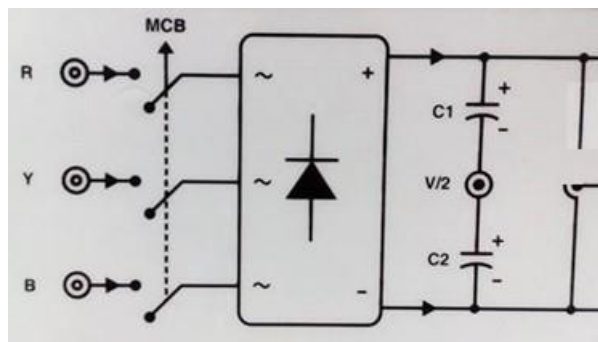


Figura 15 Terminal V/2

Los terminales U, V, y W son las salidas del puente inversor y se conectan a las fases del motor trifásico. Las letras A, AA, y F corresponden a la nomenclatura india, de donde proviene el equipo.

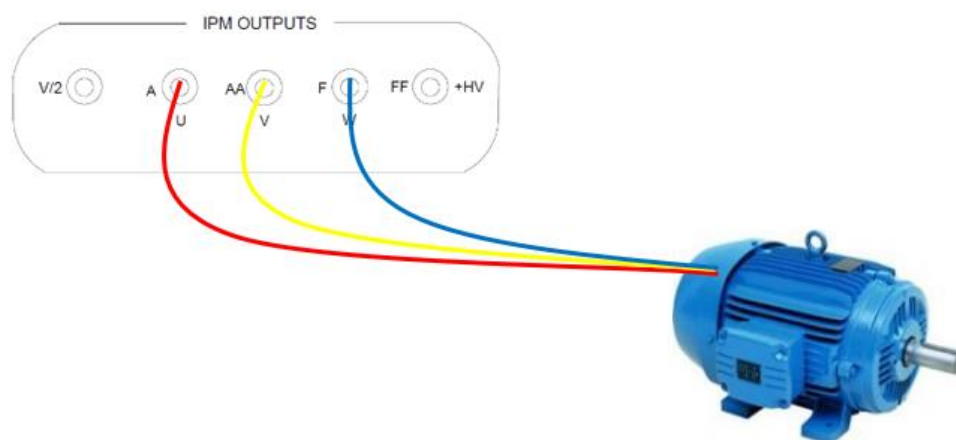


Figura 16 Conexión entre salidas del inversor y motor AC

El conector FF o +HV es el terminal positivo de la barra DC. Este punto se tiene en la salida del rectificador trifásico, al igual que -HV, que es el terminal negativo de la barra DC como se muestra en la figura 17. Cabe recalcar que el equipo no dispone de un conector o punto de medición para el terminal -HV, por lo cual no se puede medir el voltaje de barra en el panel frontal directamente.

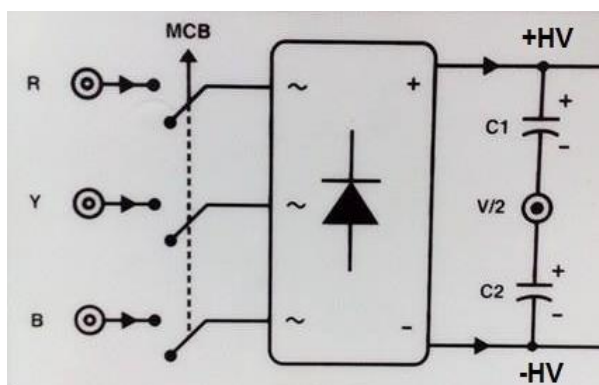


Figura 17 Conector +HV y -HV

2. Procedimiento para energizar el Módulo de Potencia Inteligente

El módulo de potencia está formado por dos secciones, la sección de control y la sección de potencia. A continuación se detalla el procedimiento para energizar ambas secciones.

2.1. Encendido Sección de Control.

La sección de control del módulo de potencia PEC16DSM01 funciona con 220Vac. El conector de alimentación se ubica en la parte posterior del equipo.



Figura 18 Conector de alimentación 220Vac

Una vez que se ha conectado el equipo a 220V, se presiona el botón POWER con lo que encendemos el modulo. Un led se enciende confirmando que el equipo se ha energizado como se muestra en la figura 19. El fusible de 2A es para protección del equipo.



Figura 19 Indicador de encendido del equipo PEC16DSM01

Adicionalmente, si al momento de energizar el módulo, este no se encuentra conectado al controlador se encenderá el led del circuito de protección de la barra DC. Para apagarlo se debe conectar el controlador o encenderlo en caso de que este apagado y presionar el botón RST, con lo cual el led de protección se apagará.

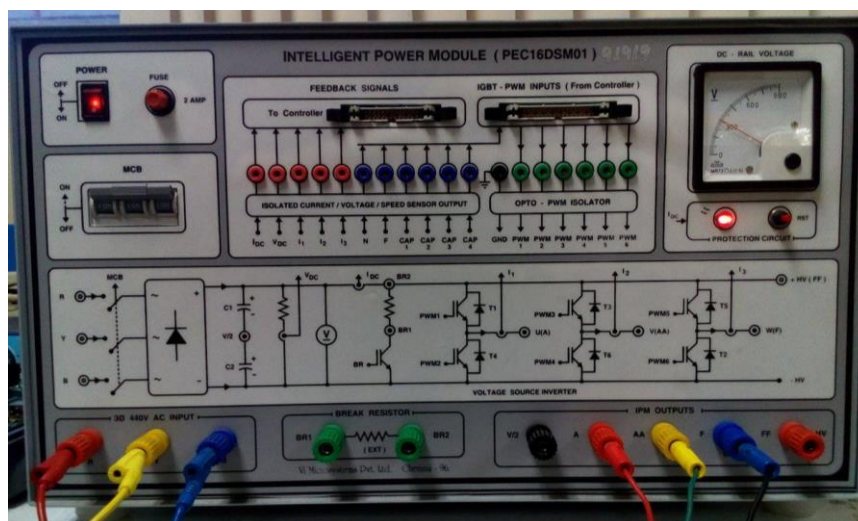


Figura 20 Módulo de potencia PEC16DSM01

2.2. Encendido sección de Potencia.

El voltaje nominal de alimentación de la sección de la potencia es de 440Vac. Se debe conectar la alimentación trifásica en las borneras de entrada tal como se muestra en la figura 21.

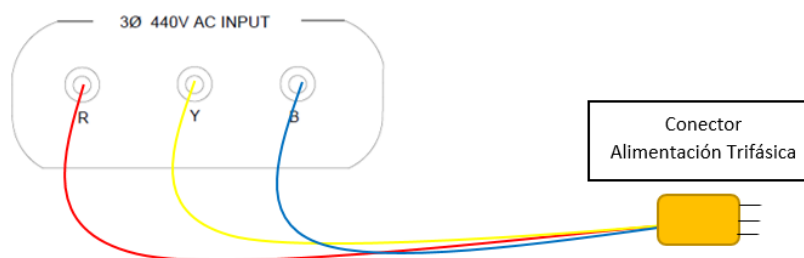


Figura 21 Conexión entre alimentación trifásica y el equipo PEC16DSM01

Una vez que se conecta el voltaje trifásico, es necesario accionar el breaker principal con lo que se permite el paso del voltaje de alimentación hacia el puente rectificador trifásico. Dicho breaker se encuentra abajo de la sección de encendido.



Figura 22 Breaker principal de encendido del equipo PEC16DSM01

En la figura 22 se observa el breaker en la posición de apagado (OFF), por lo que se tiene que mover hacia arriba para energizar la sección de potencia.

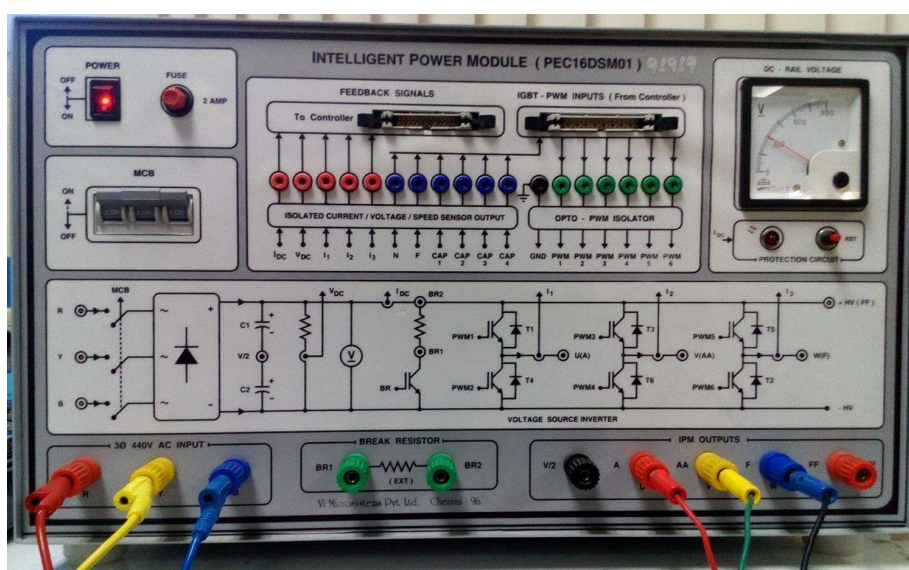


Figura 23 Equipo PEC16DSM01 energizado

Si los pasos se han seguido correctamente, el equipo se verá como en la figura 23. Se puede observar que el breaker está en su posición de encendido, el indicador marca el voltaje de barra y que el led de protección de barra DC no está encendido. Adicionalmente se observan en la parte

inferior izquierda los cables de alimentación de sección de potencia y en la parte inferior derecha los cables del motor.

3. Interior del equipo

El módulo de potencia PEC16DSM01 consta de 4 tarjetas electrónicas para su funcionamiento.

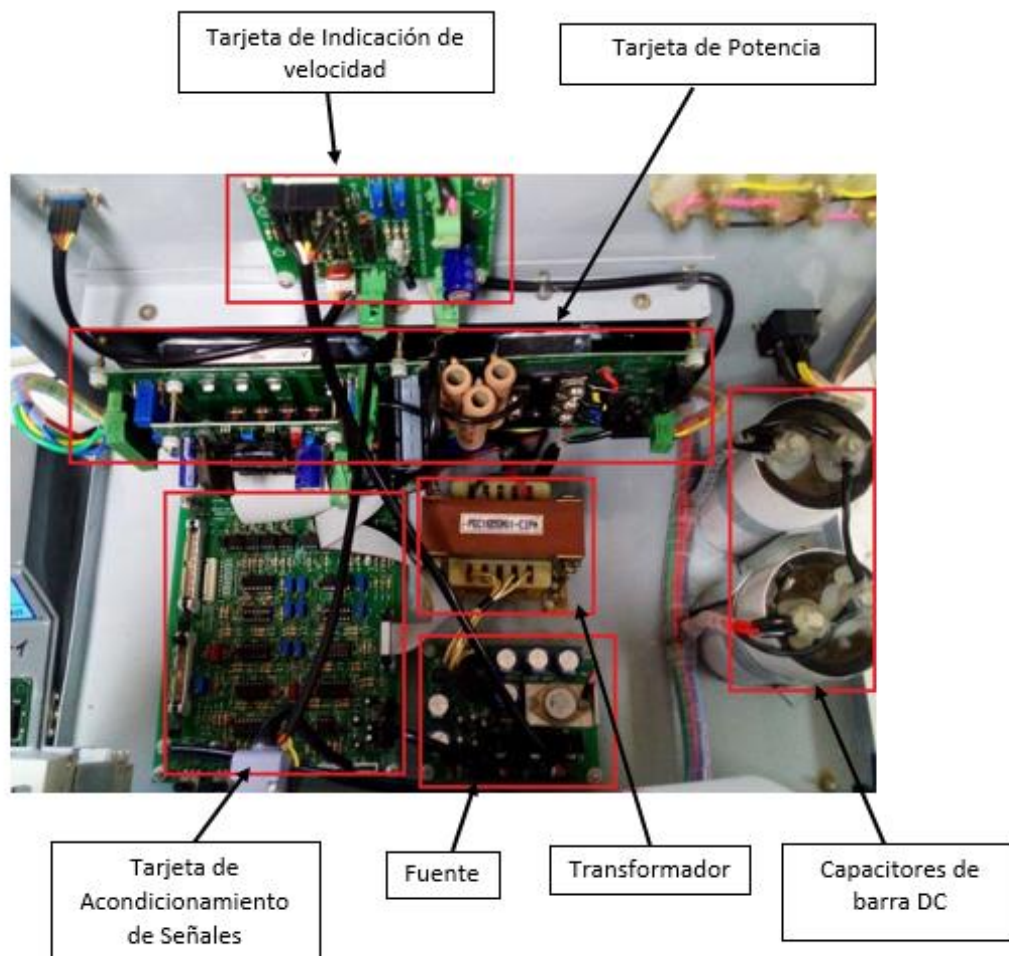


Figura 24 Interior del equipo PEC16DSM01

3.1. Tarjeta de Indicación de velocidad

La tarjeta de Indicación de velocidad recibe las señales del encoder, y las procesa para enviarlas hacia el controlador. El detalle del funcionamiento de esta tarjeta, así como su diagrama electrónico se muestra en la sección 3.2.1.

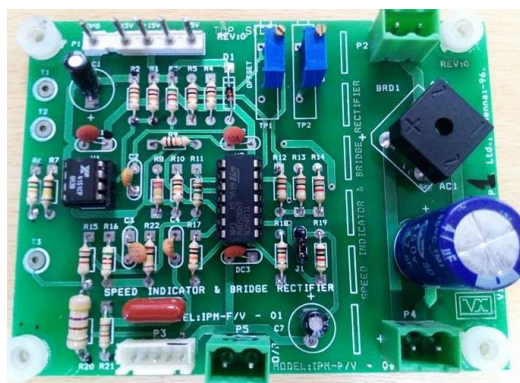


Figura 25 Tarjeta de indicación de velocidad

3.2. Tarjeta de potencia

La tarjeta de potencia tiene embebidos todos los elementos de potencia necesarios para el control y movimiento de motores eléctricos tanto AC como DC. Entre sus principales elementos tenemos el puente rectificador trifásico no controlado, sensores de efecto Hall, resistencias de potencia, y el módulo de IGBTs con su respectiva fuente para los disparos. El diagrama electrónico y el funcionamiento de la tarjeta se presentan en la sección 3.2.2.

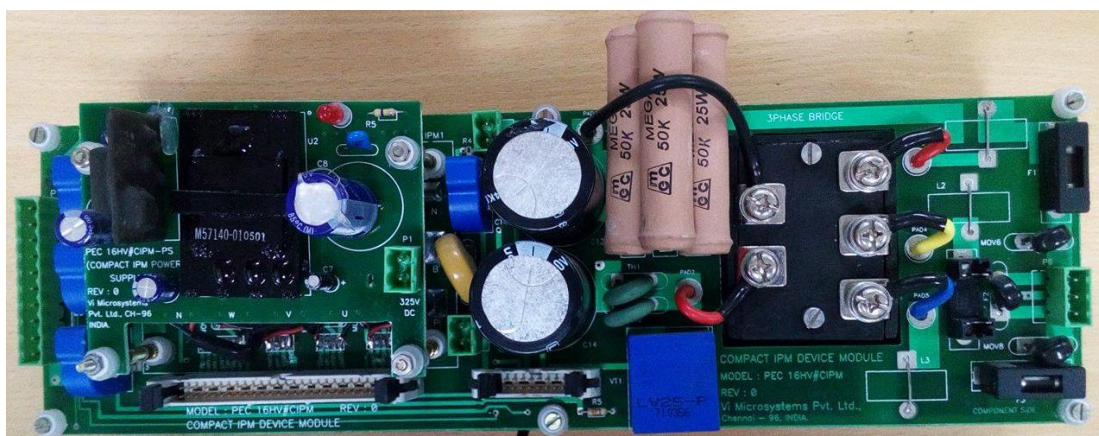


Figura 26 Tarjeta de potencia

3.3. Tarjeta de acondicionamiento de señales

En esta tarjeta se reciben las señales provenientes de los sensores de efecto de Hall, tales como corrientes de línea, barra DC y corriente DC y se procesan para ser enviadas al controlador. Además, también se procesan las señales PWM enviadas por el controlador, las cuales se conectan a los IGBTs que se encuentran en la tarjeta de potencia.

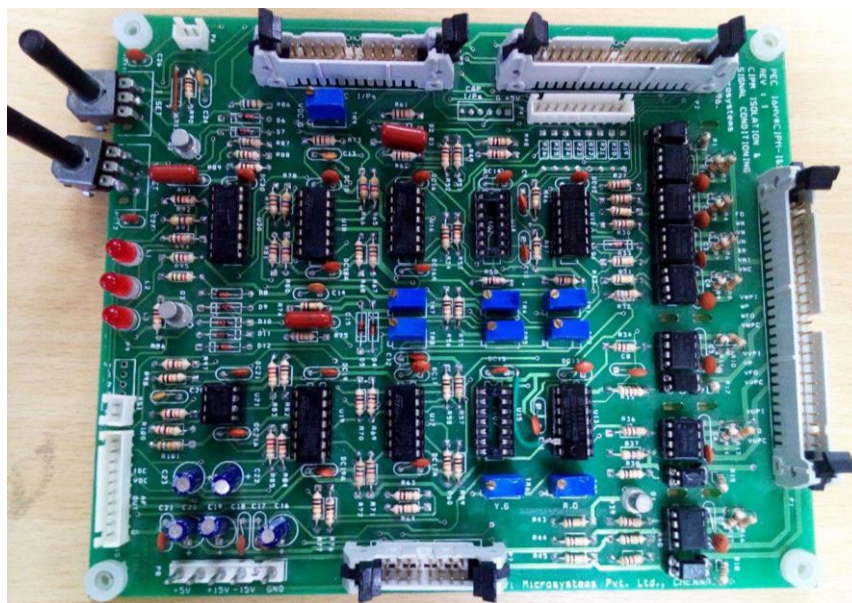


Figura 27 Tarjeta de acondicionamiento de señales

3.4. Fuente de alimentación

La fuente de la figura 28 proporciona tres voltajes diferentes (+5V, +12V, -12V) necesarios para el funcionamiento de los elementos en las tarjetas electrónicas, como la alimentación de sensores de efecto Hall, amplificadores operacionales, puertas lógicas, etc.

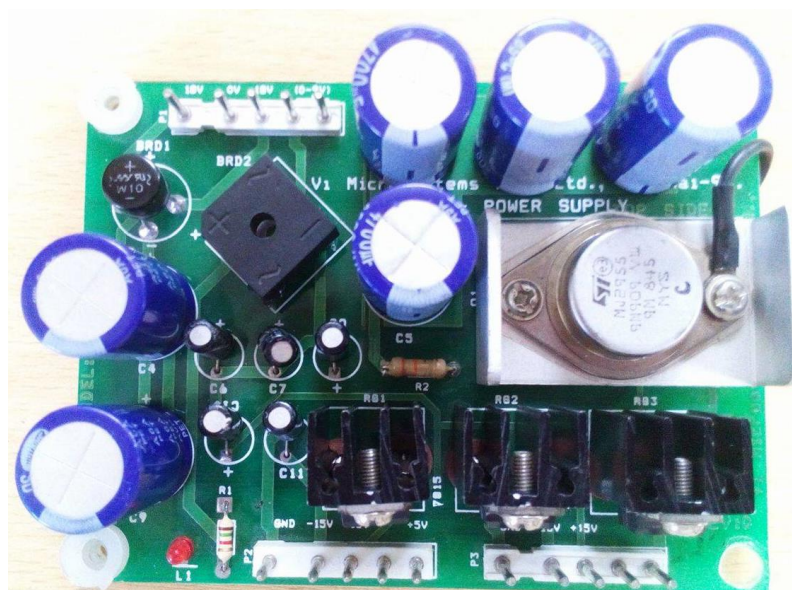


Figura 28 Fuente de alimentación

4. Conexión del encoder

Para conectar el sensor de posición o encoder, se utiliza un módulo adaptador PEC-01-ESC como se muestra en la figura 29, el cual adquiere las señales del encoder y las procesa para enviarlas al controlador.



Figura 29 Módulo adaptador PEC-01-ESC

El cable que se usa para conectar el encoder del motor AC con el adaptador PEC-01-ESC tiene 9 pines figura 30, los cuales se describen en la tabla A31.

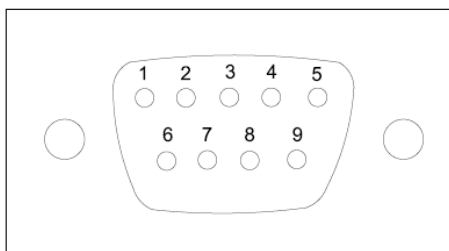


Figura 30 Pines del adaptador PEC-01-ESC

De los 9 pines que dispone el conector del encoder solo se utilizan los primeros 5, mientras que los 4 restantes están desconectados, es por ello que se marcan con NC.

Pin	Detalle	Pin	Detalle
1	GND	6	NC
2	Índex	7	NC
3	Channel A	8	NC
4	+5V	9	NC
5	Channel B		

Tabla A3: Descripción de pines del adaptador PEC-01-ESC

4.1. Conexión entre el encoder y el adaptador PEC-01-ESC

Al igual que el cable del encoder, el adaptador PEC-01-ESC también dispone de un puerto de 9 pines, donde se conecta el cable, como se muestra en la figura 31.



Figura 31 Conexión entre el encoder y el adaptador PEC-01-ESC

El adaptador PEC-01-ESC internamente está compuesto por puertas AND como se observa en la figura 32, con la finalidad de eliminar el ruido en las señales enviadas hacia el controlador.

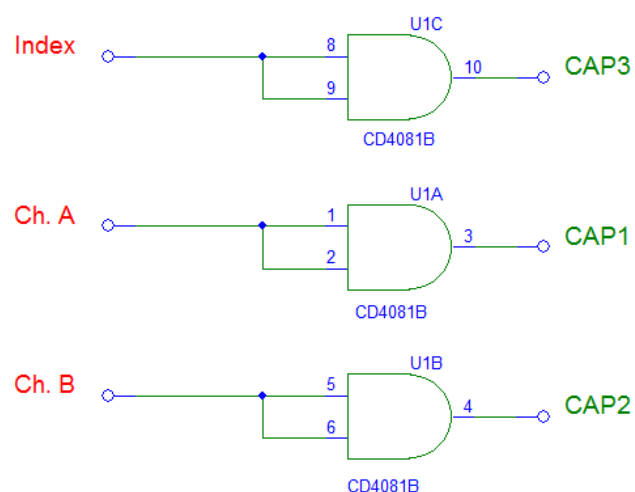


Figura 32 Circuito de puertas AND del adaptador PEC-01-ESC

Para capturar la posición del motor se utilizan tres señales, las cuales son Ch. A (Channel A), Ch. B (Channel B) y la señal Índice, las cuales se encuentran en los pines CAP1, CAP2 y CAP3 respectivamente. Además se tiene que polarizar el encoder, por lo que se necesita dos señales adicionales, que son +5V y GND. Dichos pines se encuentran en el adaptador PEC-01-ESC.

4.2. Conexión entre el adaptador PEC-01-ESC y la DSP

La conexión entre el adaptador y la DSP se puede realizar de dos maneras. Para el primer método se utiliza el conector de la figura 33 que se encuentra en la cara de arriba del adaptador.

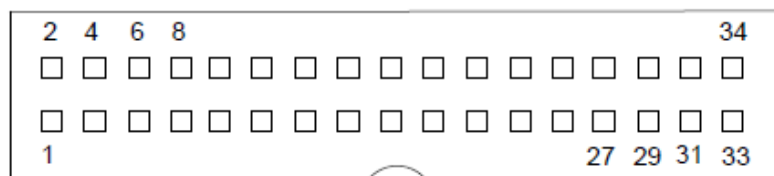


Figura 33 Pines del conector para la conexión entra el adaptador

Las señales utilizadas Channel A, Channel B e Índice,+5V y GND, se encuentran en los pines 31, 27, 29, 2 y 6 respectivamente como se muestra en la tabla A4. La función de los pines restantes no se menciona debido a que no se los requiere en el proceso de conexión del encoder. Cabe recalcar que existe continuidad entre los pines 2 y 4, y 6 y 8, por lo que las señales de +5V y GND también pueden conectarse en dichos pines.

Pin	Detalle
31	CAP1 (Ch. A)
29	CAP3 (Índex)
27	CAP2 (Ch. B)
2, 4	+5V
6, 8	GND

Tabla A4: Descripción de las señales utilizadas por el adaptador PEC-01-ESC

Los pines mostrados en la tabla A4 tienen que conectarse con los pines de captura de la DSP, los cuales se encuentran en el conector P6 del kit MICRO 2812 figura 2.7, y la forma de conexión se muestra en la tabla A5.

Conector Adaptador PEC-01-ESC	Conector P6 Kit MICRO-2812
31	C1
29	C3
27	C2
2, 4	Vcc
6, 8	Ground

Tabla A5: Descripción de los pines del conector del adaptador PEC-01-ESC y el conector P6 Kit MICRO-2812

El segundo método de conexión es utilizar los terminales CAP que se encuentran en la parte frontal del adaptador, los cuales se muestran en la figura 34.



Figura 34 Terminales CAP del adaptador PEC-01-ESC

Este método es más sencillo, ya que se conecta los terminales CAP1, CAP2 Y CAP3 con los terminales del mismo nombre que se encuentran en el panel frontal del módulo de potencia PEC16DSM01 como se observa en la figura 35.

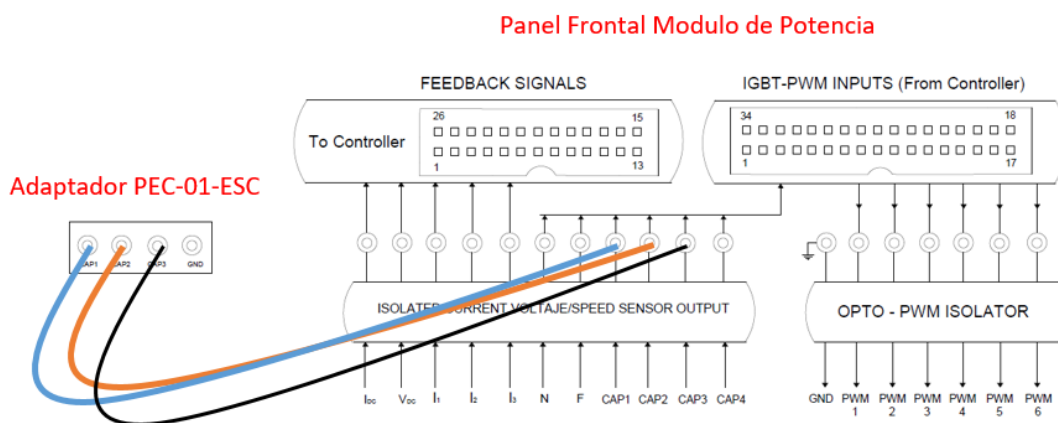


Figura 35 Conexión entre el adaptador PEC-01-ESC y el panel frontal del módulo de potencia

Adicionalmente, el encoder debe ser energizado con +5V, por lo que se debe conectar los pines Vcc y GND como se muestra en la tabla A1.

PRÁCTICA #1

TEMA

Control escalar (V/F) en lazo abierto para motores AC mediante el software VisSim.

OBJETIVOS

Al concluir la práctica el estudiante estará en capacidad de:

- Comprender de forma práctica, la teoría de control escalar (V/F)
- Crear y compilar un proyecto en VisSim.
- Aprender a configurar el DSP TMS320F2812.
- Conectar el Trainer Kit MICRO 2812 con el software VisSim.
- Reconocer y parametrizar los bloques de programación para el control escalar (V/F).
- Desarrollar la técnica de control escalar (V/F) sobre un motor AC mediante el software VisSim.

TEORÍA

La figura A1 muestra el diagrama de bloques del algoritmo de control en lazo abierto más simple, que es el conocido control escalar o control Voltaje-Frecuencia (V/F). Este método es aplicable a otros tipos de máquina eléctrica tales como los motores de inducción y máquinas sincrónicas de rotor devanado.

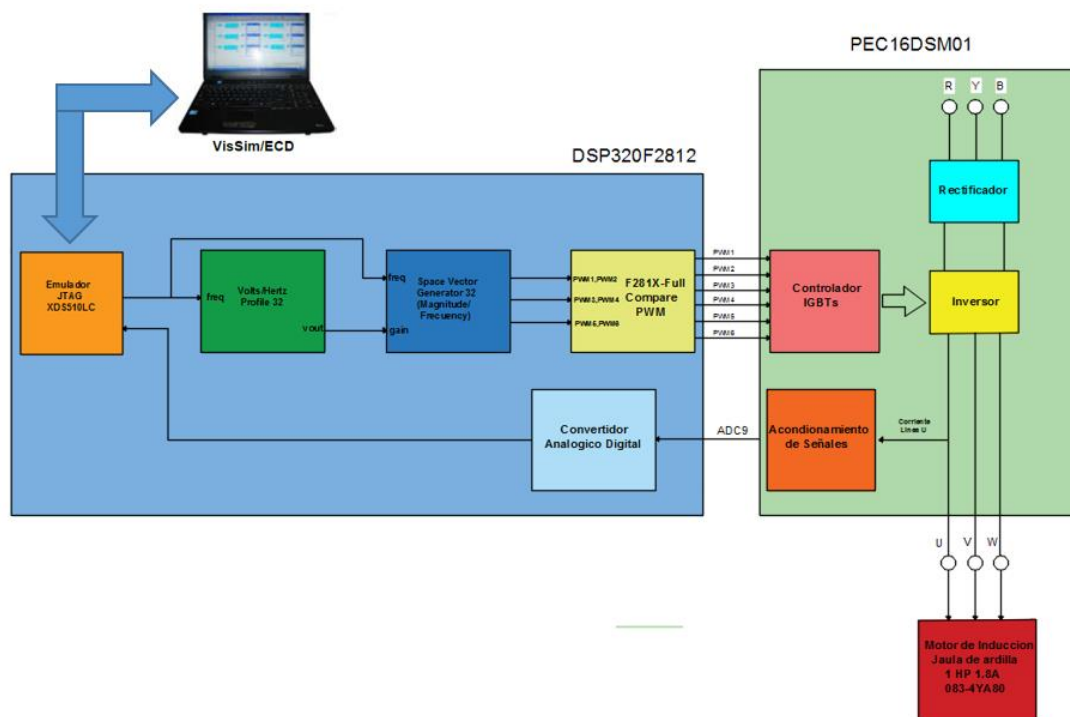


Figura A1 Diagrama de bloque del algoritmo de control V/F

El bloque (V,f), aplica una matriz de transformación de un marco de referencia rotativo a un marco de referencia trifásico estacionario. La entrada es un vector de magnitud $|V|$ que rota a una frecuencia angular $(\omega = \frac{1}{f})$ y la salida es un patrón sinusoidal definido en un marco de referencia fijo (a, b, c). Cuando se utiliza el algoritmo de modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM), las salidas del bloque (V,f) están definidas por;

$$v_a = V \cos(\theta)$$

$$v_b = V \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_c = V \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Ec. 1

La fase de las señales modulantes (v_a, v_b, v_c), no tiene relación con la posición del rotor. El voltaje trifásico que se desea generar (ecuación 1) es alimentado al bloque

donde se implementa el algoritmo PWM, que se encarga de generar el patrón de conmutación de los elementos de potencia del inversor trifásico (PWM1 a PWM6). El patrón de señales conmutadas con modulación de ancho de pulso que se aplica al motor tiene una componente fundamental determinada por las señales modulantes [15].

En este punto se resalta que en el bloque de generación de las señales modulantes y el bloque que contiene el algoritmo PWM, normalmente se utiliza la técnica de modulación de ancho de pulso sinusoidal (SVPWM), inyección de tercera armónica a las señales modulantes sinusoidales, etc.

El ángulo entre el vector de voltajes que se aplica al motor y el vector de los enlaces de flujo del rotor, se ajusta automáticamente según las condiciones de carga del motor.

La selección de la curva V/F, juega un papel importante durante los procesos de arranque y aceleración suaves del motor. En la figura A2 se muestra la curva típica del voltaje del estator en función de la frecuencia del voltaje aplicado al motor de inducción. La línea punteada representa el voltaje teórico para operar la máquina en el modo V/F; en la práctica siempre se necesita reforzar el voltaje para arrancar la máquina desde la posición de reposo (líneas sólidas). Una vez que se establece la sincronización de los enlaces de flujo generados en el estator y los enlaces de flujo generado por el rotor, el voltaje aplicado al estator debe ser proporcional a la frecuencia del rotor [15].

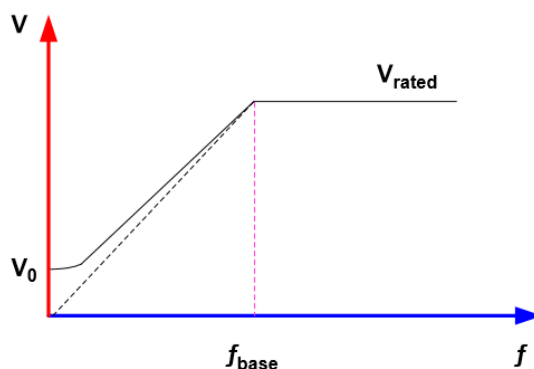


Figura A2 Relación voltaje-frecuencia

Cuando la frecuencia y por consiguiente la velocidad del rotor alcanza su valor nominal, el voltaje alcanza también su nivel nominal. El voltaje se mantiene en el valor nominal (V_{rated}) y el motor entra en la zona de operación de debilitamiento.

El control V/F es el método de control de más bajo costo, puesto que teóricamente no se necesitan: detectores de corriente, voltajes, ni determinación de la posición del rotor; y el control V/F ofrece un desempeño adecuado para operación en estado estable. Generalmente la curva de control V/F para diferentes tipos de carga en el eje del motor, se obtiene por métodos empíricos [15].

Para aplicaciones que requieren respuestas transitorias más rápidas, este método no proporciona un desempeño satisfactorio. En realidad, el método V/F falla bajo condiciones transitorias y condiciones de carga pesada, debido a la pérdida momentánea de sincronización entre los flujos del estator y rotor [16].

LISTADO DE EQUIPOS A EMPLEARSE

- Módulo de potencia PEC16DSM01
- MICRO 2812 TRAINER KIT
- Emulador JTAG XDS510LC C2000 SERIES
- Buses de datos
- Computador
- Software VisSim 7.0

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. Conectar el bus del puerto JTAG del convertidor XDS510LC C2000 SERIES al puerto P2 de la tarjeta del Trainer Kit MICRO-2812 como se indica en la figura A3.

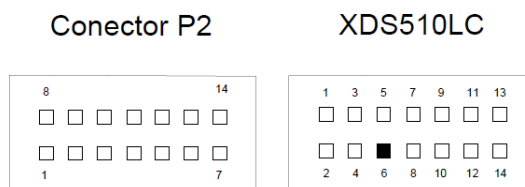


Figura A3 Conexión JTAG del convertidor XDS510LC al puerto P2 de la tarjeta MICRO 2812

Conector P2	JTAG XDS510LC	Conector P2	JTAG XDS510LC
1	1	8	2
2	3	9	4
3	5	10	6
4	7	11	8
5	9	12	10
6	11	13	12
7	13	14	14

Tabla P1: Descripción de pines del convertidor XDS510LC y el puerto P2 de la tarjeta MICRO 2812

2. Realizar la conexión entre el puerto USB del convertidor XDS510LC C2000 SERIES y un puerto USB de la PC que tenga instalado el programa VisSim 7.0.
3. Abrir el programa VisSim 7.0, dándole doble clic en el icono igual al de la figura A4.

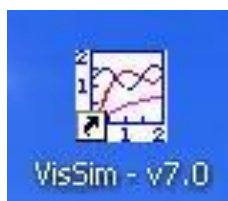


Figura A4 Icono del programa VisSim 7.0

4. Establecer la frecuencia de muestreo del DSP TMS320F2812 realizando los siguientes pasos:
 - a) Elegir la pestaña Simulate de la barra de menú de VisSim.

- b) Seleccionar Simulation Properties para que se presente la ventana de las propiedades de simulación.
- c) Seleccionar la pestaña Range
- d) Configurar los parámetros de la ventana Simulation Properties como se muestra en la figura A5. A continuación, se da clic en el botón Aplicar y luego en el botón Aceptar.

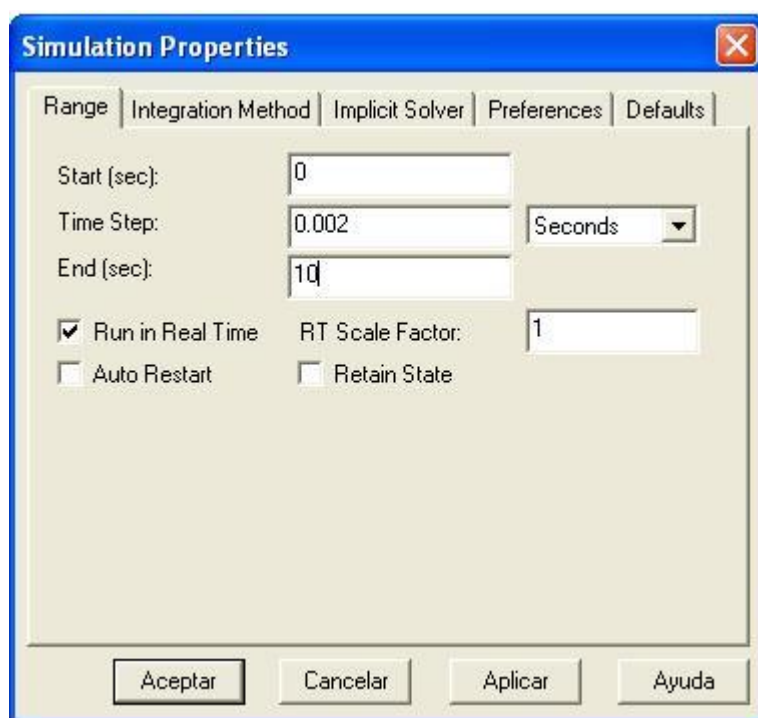


Figura A5 Ventana Simulation Properties

La selección realizada permite que el proceso visualización de gráficos en el área de trabajo de VisSim dure 10 segundos, además que la captación de datos se realice cada 200 microsegundos (0.0002 segundos).

Para monitorear el comportamiento de una señal del DSP es necesario seleccionar Run in Real Time (ejecución en tiempo real).

5. Crear del diagrama de bloques correspondientes al "VFcontrol" como se muestra en la figura A6.

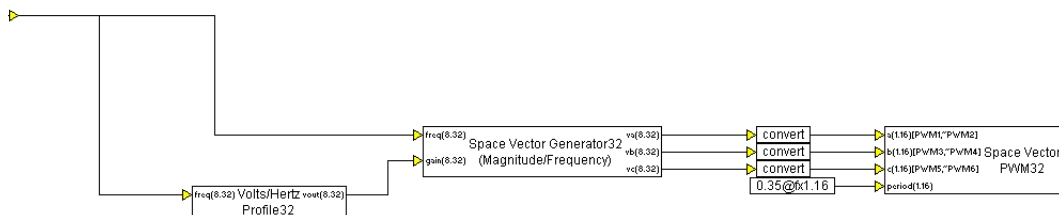


Figura A6 Bloques internos de “VFcontrol”

- Para agregar los bloques V/Hz Profiles32, Space Vector Generator32 y Space Vector PWM32, seleccionar VisSim/Dsp—TI 32bit Digital Motor Control Blocks.

En la ventana de propiedades del bloque V/Hz Profiles32 configurar los parámetros como se muestra en la figura A7.

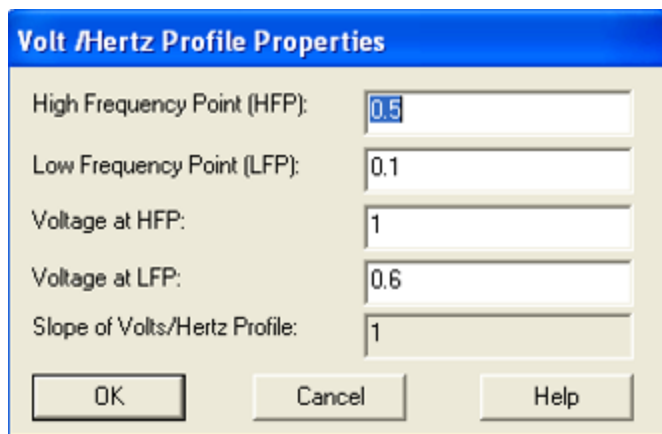


Figura A7 Configuración del bloque V/Hz Profiles32

El bloque Space Vector Generator32 (Magnitude/Frecuency), calcula las relaciones de ciclo que se necesitan para generar el voltaje de referencia a aplicarse al estator del motor, en base de la técnica SVPWM. El voltaje de referencia es descrito por su magnitud (mag) y su frecuencia (freq).

La entrada freq del bloque Space Vector Generator32 (Magnitude/Frecuency) controla la frecuencia de la componente fundamental del voltaje de salida del inversor y su valor está en el rango entre 0 a 1. La entrada freq está normalizada con relación a 100Hz. (Por ejemplo 0.60 Voltios – 60 Hz). De igual

manera la entrada mag controla la magnitud del voltaje de salida RMS de la componente fundamental del voltaje de salida del inversor. La entrada mag está normalizada con relación al voltaje de salida rms máximo para modulación lineal con SVPWM (ecuaciones 2 y 3).

$$|\vec{V}_{ref}|_{max} = \left[\frac{2}{3} V_{DC} \right] \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3} V_{DC}}{3} \quad \text{Ec. 2}$$

$$V_{LL}(rms)|_{n=1} = \left[\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \right] \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} m = m \times 0.707 \times V_{DC} \quad \text{Ec. 3}$$

Esto implica; que si alimentamos el equipo con 220 Voltios, entonces el voltaje de la barra DC será de 310 Voltios y el voltaje de la componente fundamental del voltaje de salida línea a línea en valor rms será de 220 voltios (índice de modulación $m=1$). Por consiguiente $mag=0.5$, implica una salida de 110 Voltios rms entre los terminales del inversor (voltaje línea-línea).

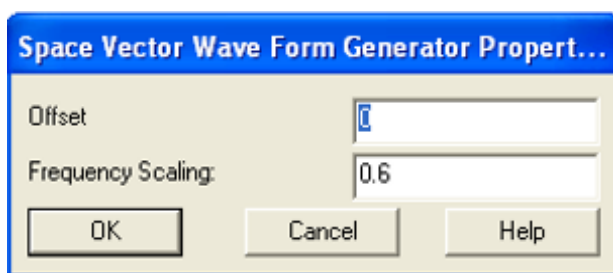


Figura A8 Ventana de propiedades del bloque Space Vector Generator32 (Magnitude/Frecuency)

En la ventana de propiedades del bloque Space Vector Generator32 (Magnitude/Frecuency), mostrado en la figura A8, Frequency Scaling impone la tasa de muestreo del bloque dentro del DSP y el Offset indica el nivel adicional utilizado en el cálculo de las señales.

El bloque Space Vector PWM32 permite configurar una unidad PWM. Los pines de entrada controlan el ciclo de trabajo de la forma de onda PWM. Están a escala 1.16. El valor de entrada se multiplica por el período PWM y se asigna al registro de comparación PWM para generar un ciclo de trabajo fraccionario. Así, una entrada de 0,5 ($fx1.16$) produce un ciclo de trabajo del 50%; Una

entrada de 0 produce un ciclo de trabajo de 0%; Y una entrada de 0,99997 (el valor positivo más grande posible en la notación 1,16) produce 100% de ciclo de trabajo.

Colocar el bloque Space Vector PWM32 con los parámetros mostrados en la siguiente figura A9.

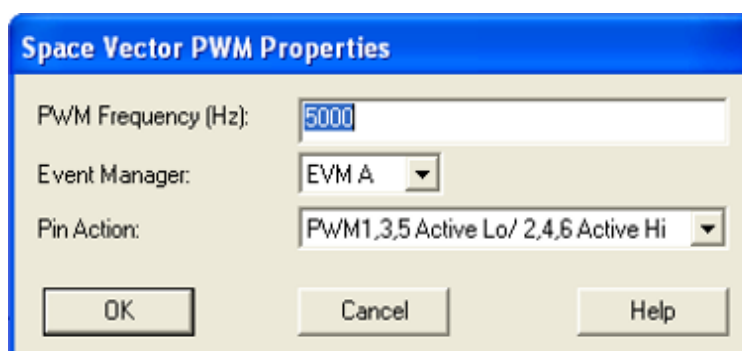


Figura A9 Bloque Space Vector PWM32

7. Crear un bloque compuesto
 - a) Seleccionar todos los bloques y dar clic derecho encima de los mismos para desplegar la ventana de propiedades.

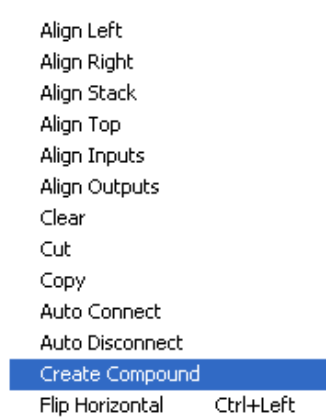


Figura A10 Ventana de propiedades de bloques

- b) Elegir la opción Create Compound para abrir la ventana Compound Properties como se muestra en la figura A11.

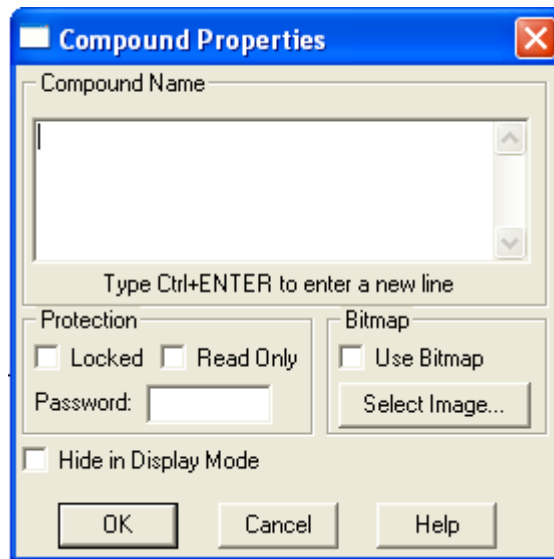


Figura A11 Ventana Compound Properties

- c) Añadir el nombre VFcontrol en el cuadro de texto Compound Name dentro de la ventana Compound Properties, luego dar clic en botón OK.



Figura A12 Bloque VFcontrol

8. Colocar los bloques correspondientes al “pulseCNT-velocidad” como se muestra en la figura A13.

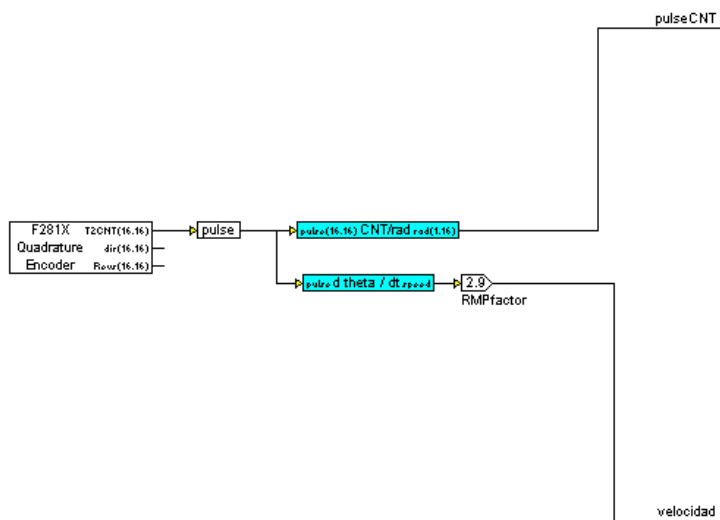


Figura A13 Bloques internos del bloque pulseCNT-velocidad

Los bloques compuesto CNT/rad y dtheta/dt son creados a partir de los siguientes bloques mostrados en las figuras A14 y A15 correspondientemente.

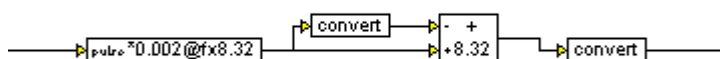


Figura A14 Bloques internos del bloque “CNT/rad”

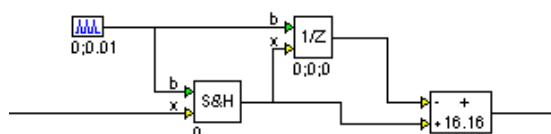


Figura A15 Bloques internos del bloque “dtheta/dt”

Para agregar el bloque F281X Quadrature Encoder, seleccionar VisSim/Dsp—TI 32bit Digital Motor Control Blocks y configurarlo de la siguiente manera como se muestra en la figura A16.

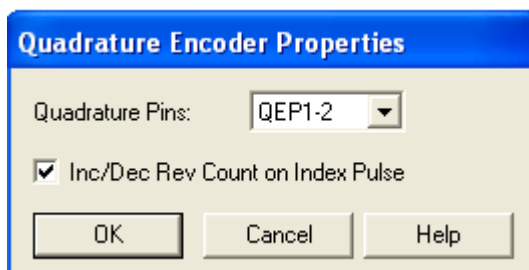


Figura A16 Parámetros del bloque F281X Quadrature Encoder

La salida T2CNT del bloque F281X Quadrature Encoder genera una onda diente de sierra producto del conteo de pulsos generados por el encoder, por lo cual se tiene la posición del rotor.

El bloque compuesto CNT/rad permite que la onda diente de sierra se encuentre entre valores de 0 a 1, es decir normalizado.

Dado que se tiene la posición del rotor, se utiliza el bloque compuesto dtheta/dt para derivar la posición y así obtener la velocidad del motor.

9. Realizar el bloque compuesto “corriente de línea” a partir de los bloques mostrados en la figura A18.

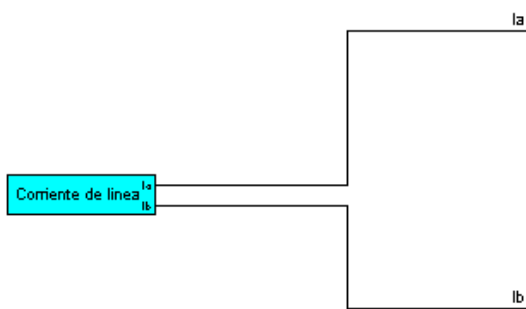


Figura A17 Bloque compuesto “corriente de línea”

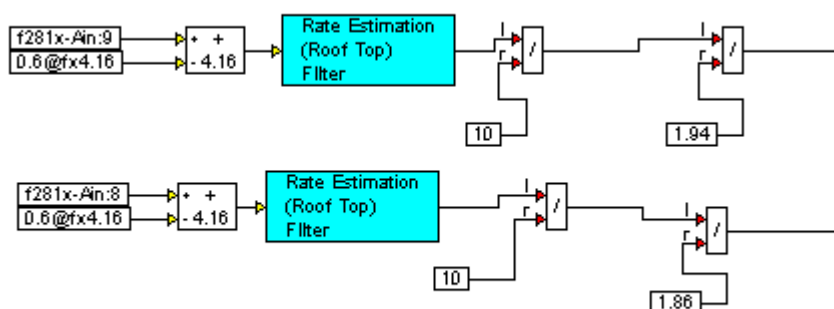


Figura A18 Bloques internos del bloque “corriente de línea”

El bloque “corriente de línea” permite obtener las corrientes de la línea A y B, mediante las entradas analógicas 8 y 9, las mismas que son filtradas por el bloque “Rate Estimation (Roof Top) filter” y procesadas por un conjunto de bloques aritméticos.

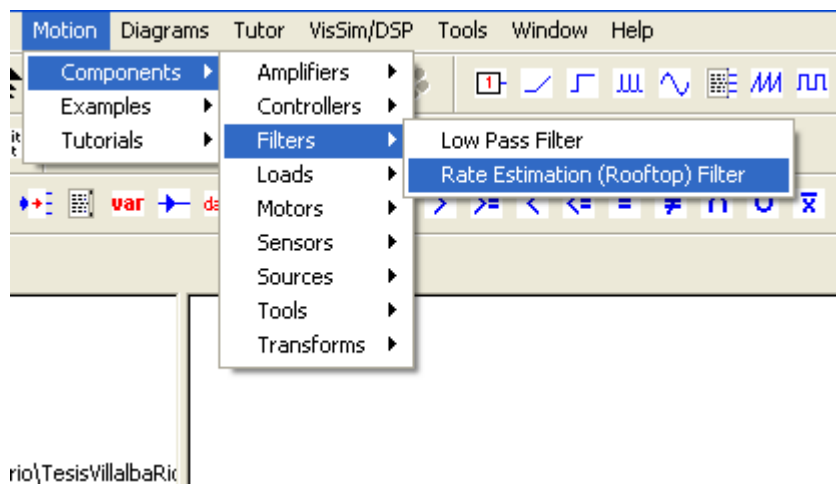


Figura A19 Ubicación del bloque “Rate Estimation (Roof Top) filter”

10. A partir de los bloques “VFcontrol”, “pulseCNT-velocidad” y “corriente de línea” mostrados anteriormente, crear un solo bloque compuesto y asignarle el nombre “vfQEP”.

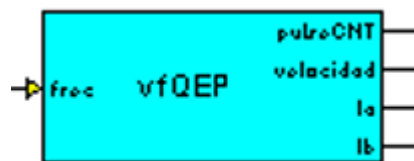


Figura A20 Bloque compuesto vfQEP

11. Colocar los siguientes elementos mostrados en la figura A22.

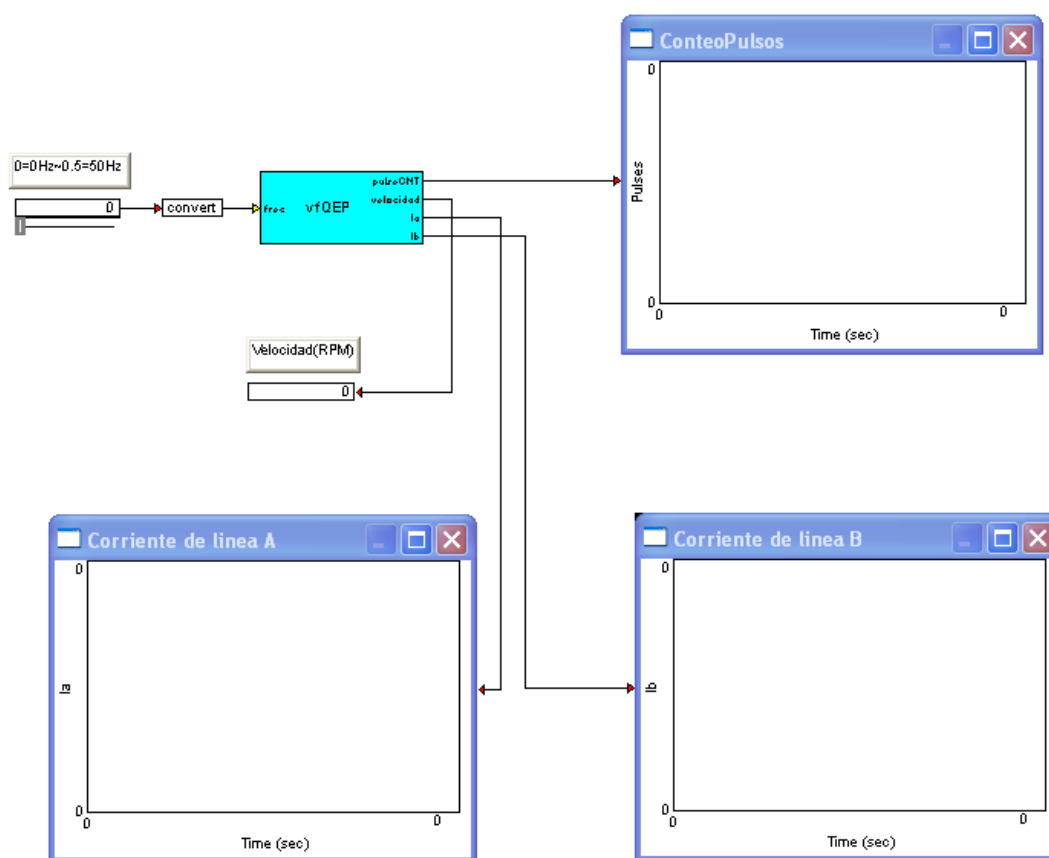


Figura A21 Elementos para la visualización de las variables del control V/F

12. Guardar el proyecto creado en VisSim con el nombre "vfQEP".

13. Para realizar el proceso de compilación se deber seleccionar el bloque "vfQEP" previamente creado y dirignos a la barra de herramientas.

14. Buscar la opción Tool—Code Gen para mostrar la ventana Code Generation Properties y configurar las propiedades de la ventana como se muestran en la siguiente figura A22.

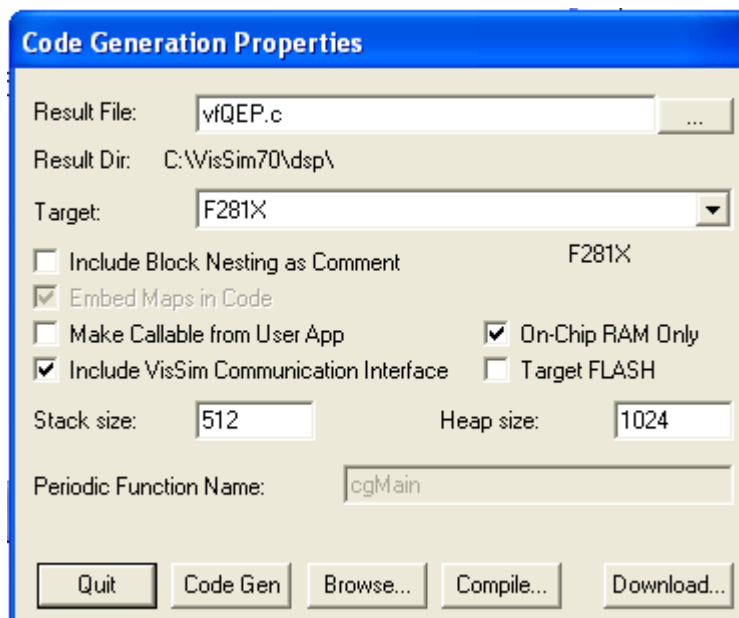


Figura A22 Ventana Code Generation Properties

15. Presionar el botón compile para mostrar el proceso de compilación de la figura A23.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\VisSim70\dsp>c12000 -pds=112 -pds=377 -pds=179 -pden -c -g -fs=tmp -k -ml -u
28 -02 -d_DSP -DUERSION_10X=70 -d_F28XX_ -d_f28xx_ -fsTMP -iC:\VisSim70\vsdk\inc
lude -i.\include acim_f2812.c
C:\VisSim70\dsp>set HEAP=0x400
C:\VisSim70\dsp>if not "512" == "" set HEAP=512
C:\VisSim70\dsp>set STACK=0x400
C:\VisSim70\dsp>if not "256" == "" set STACK=256
C:\VisSim70\dsp>if not "" == "" set TGT=F283x
C:\VisSim70\dsp>set TGTREGDEF=
C:\VisSim70\dsp>if "f28xx" == "f28xx" set TGTREGDEF=lib\DSP28_GlobalVariableDefs
.obj
C:\VisSim70\dsp>lnk2000 -c -x -g -macim_f2812.map acim_f2812.obj -l lib\ii_f28
xx.lib lib\DSP28_GlobalVariableDefs.obj -heap 512 -stack 256 -o acim_f2812.out
lib\F281X\lnk.cmd
C:\VisSim70\dsp>pause
Presione una tecla para continuar . . .

```

Figura A23 Ventana del proceso de compilación

16. Presionar cualquier tecla para cerrar la ventana y luego dar clic en Quit.
17. Para el proceso de simulación se necesita crear un nuevo proyecto con el mismo nombre y agregando "-d". Para el proyecto mostrado anteriormente, el nuevo proyecto será "vfQEP-d"
18. Una vez creado el nuevo proyecto, colocar los siguientes bloques mostrados en la figura A24.

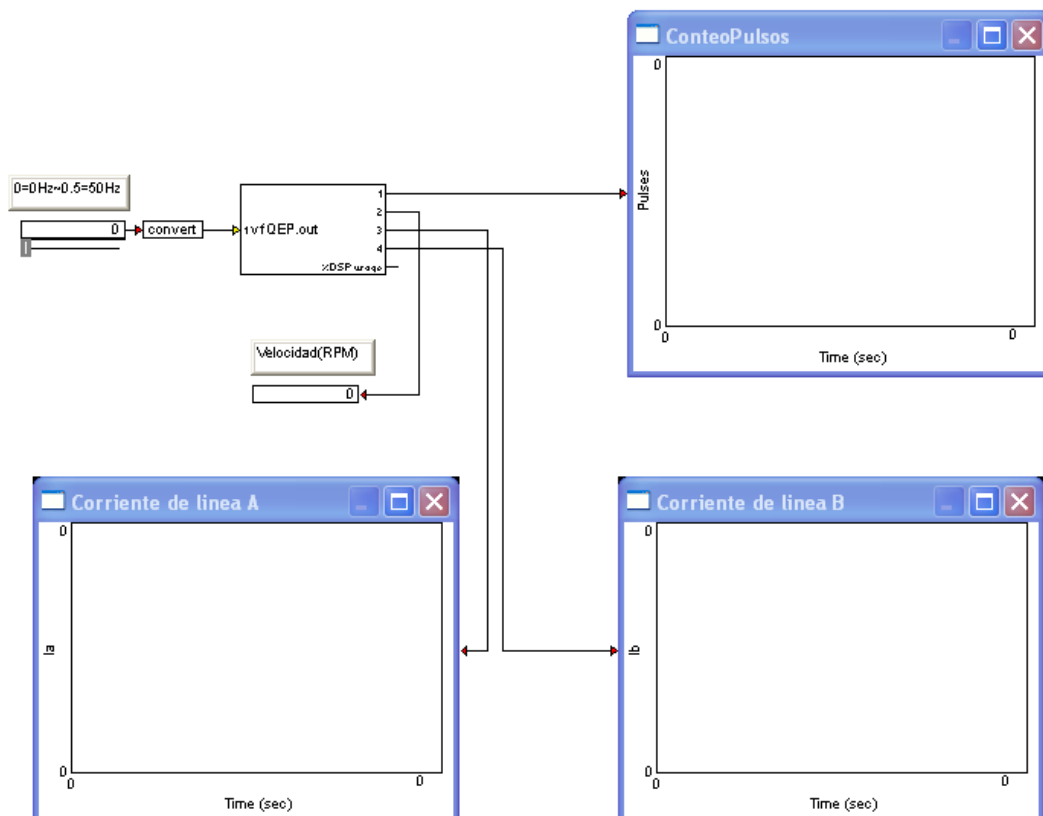


Figura A24 Diagrama de bloques para compilación

19. Configurar los límites del bloque Slider entre 0 y 0.5
20. Parametrizar el bloque convert



Figura A25 Parámetros del bloque convert

21. Para colocar el bloque llamado "vfQEP.out", dirigirse a la barra la herramienta y seleccionar la opción VisSim—F281X—DSPinterface. El bloque DSPinterface se configura con la última compilación realizada.
22. Presionar la tecla F5 para ejecutar la simulación.

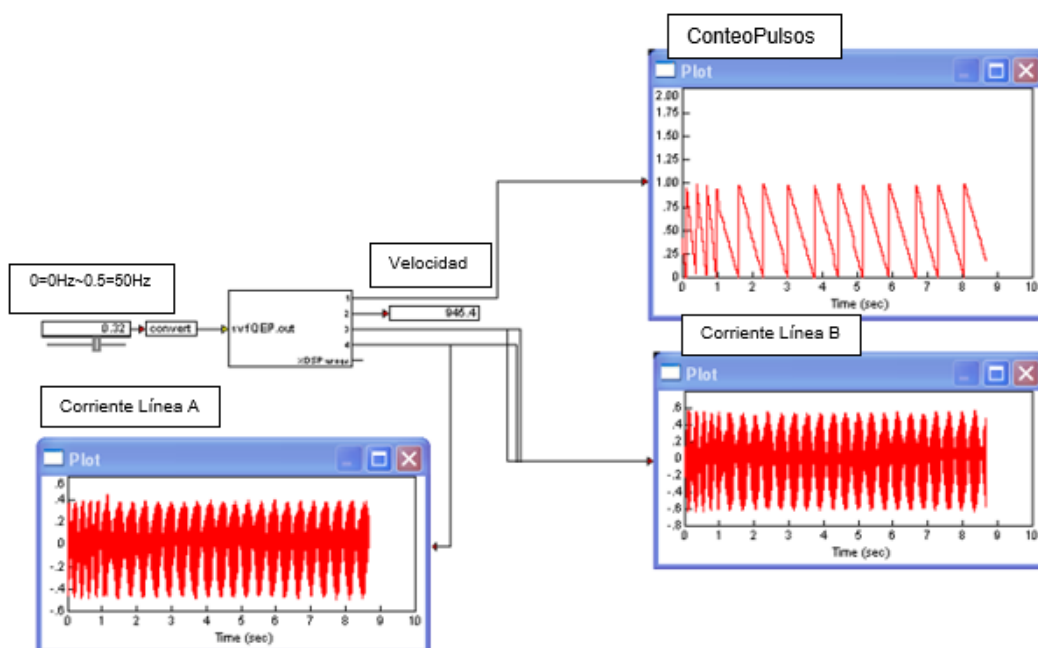


Figura A26 Simulación del control V/F

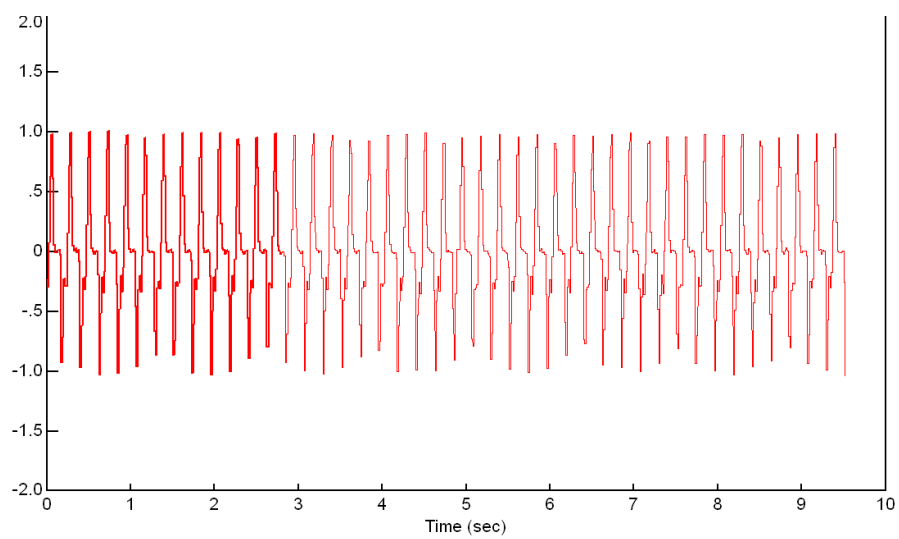


Figura A27 Corriente de la Línea A

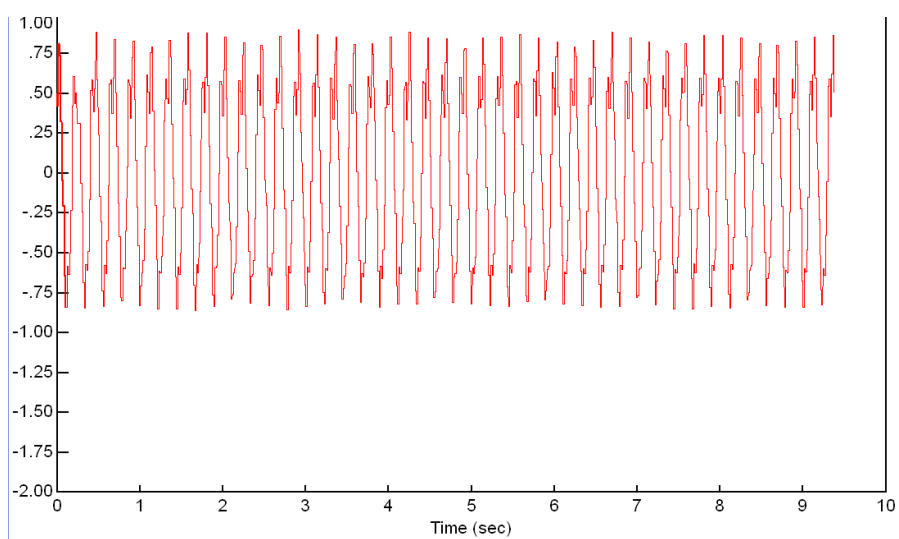


Figura A28 Corriente de la Línea B

PRÁCTICA #2

TEMA

Control de campo orientado (FOC) en lazo abierto para motores AC mediante el software VisSim.

OBJETIVOS

Al concluir la práctica el estudiante estará en capacidad de:

- Crear y compilar un proyecto en VisSim
- Conectar el Trainer Kit MICRO 2812 con el software VisSim.
- Comprender de forma práctica, la teoría de control de campo orientado (FOC).
- Aplicar los bloques Space Vector Generator (Quadratre control) y F281X-Full Compare PWM para realizar la variación de velocidad del motor.
- Usar el bloque Quadrature Encoder para leer el ángulo eléctrico del motor AC jaula de ardilla.
- Entender de forma práctica las transformadas de Clark y Park

TEORÍA

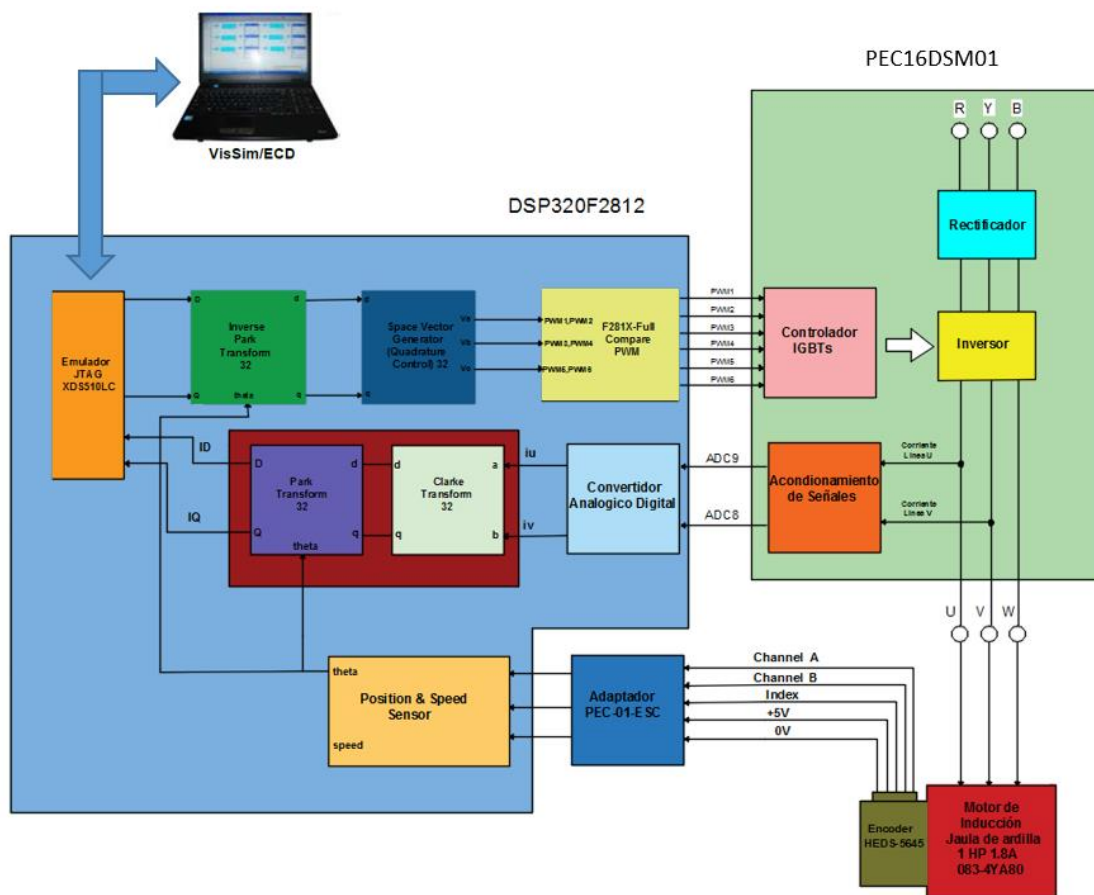


Figura B1 Diagrama de bloque del algoritmo de control FOC

El control de campo orientado (FOC), consiste en el control de las componentes de la corriente del estator, representadas vectorialmente. El FOC, está basado en las proyecciones que transforman un sistema trifásico dependiente de la velocidad y el tiempo en un sistema de dos coordenadas (coordenadas d y q) invariante en el tiempo. Estas proyecciones dan lugar a una estructura similar a la del control de un motor DC. Los motores controlados por la orientación de campo, necesitan dos constantes como entradas de referencia: la componente de torque (alineada con la coordenada q) y la componente de flujo (alineada con coordenada d).

Como el control de orientación de campo está basado simplemente en las proyecciones, entonces la estructura de control maneja entidades eléctricas instantáneas. Esto hace al sistema de control exacto, tanto para operación en estado estable como transitorio e independiente de la limitación de ancho de banda del modelo matemático en estado estable del motor [15].

El FOC resuelve de esta manera los problemas del esquema de control escalar (V/F) y tiene las siguientes características [16]:

- Elevado torque y bajas corrientes durante el proceso de arranque.
- Capacidad de pleno torque a bajas velocidades.
- Mejor conducta dinámica
- Alta eficiencia para cada punto de operación en un amplio rango de velocidades.
- Control independiente del torque y flujo (similar al motor DC).
- Operación en cuatro cuadrantes

Gracias a estos factores, el control de los motores AC adquiere todas las ventajas obtenidas en el control de los motores DC y además se eliminan las desventajas de la conmutación mecánica de este último [16].

La transformada de Clark y la transformada de Park son la base fundamental del control FOC, ya que la primera transformación permite referir el vector espacial de la corriente del estator y sus componente a otro marco de referencia con dos ejes ortogonales (α, β) variante en el tiempo; por otra parte la transformada de Park permite modificar el sistema ortogonal de dos fase (α, β) en un marco de referencia rotativo (d,q).

Para está práctica se recomienda un estudio previo de las transformadas de Clark y Park para su mejor entendimiento.

LISTADO DE EQUIPOS A EMPLEARSE

- Módulo de potencia PEC16DSM01

- MICRO 2812 TRAINER KIT
- Emulador JTAG XDS510LC C2000 SERIES
- Buses de datos
- Computador
- Software VisSim 7.0

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. Realizar los pasos del 1 al 4 de la primera práctica.
2. Colocar los bloques **Inverse Park Transform**, **Space Vector Generator (Quadrature Control)** y **Space Vector PWM32** y ubicarlos como se muestra en la figura B2.

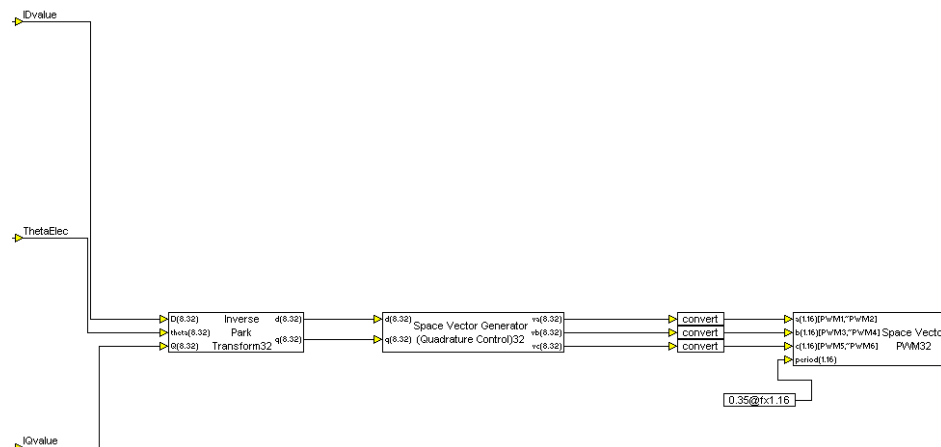


Figura B2 Bloques Inverse Park Transform, Space Vector Generator (Quadrature Control) y Space Vector PWM

3. Realizar un bloque compuesto (Véase el paso 7 de la práctica#1) de los bloques agregados anteriormente en el paso 2 con el nombre **FOC**.

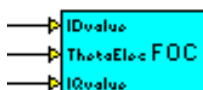


Figura B3 Bloque compuesto FOC

4. Colocar los bloques mostrados en la figura 5

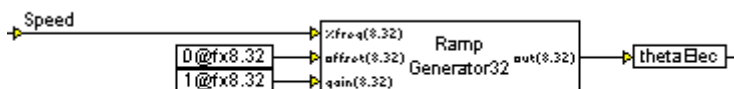


Figura B4 Generador de rampas

El bloque Ramp Generator se lo agrega seleccionando la pestaña VisSim/Dsp—TI 32bit Digital Motor Control Blocks. Con el uso de este bloque podemos generar rampas, las mismas que serán utilizadas por los bloques Inverse Park Transform32 y Park Transform32.

El bloque generador de rampa es controlado mediante la entrada freq(8,32), la cual recibe valores de 0 a 1, es decir si colocamos un valor de 0,5 se tendrá rampas con la mitad de frecuencia asignada (Ramp Frequency) y en cambio si se coloca un valor de 1, se tendrá el máximo valor de frecuencia asignado al bloque Ramp Generator (Figura B5).

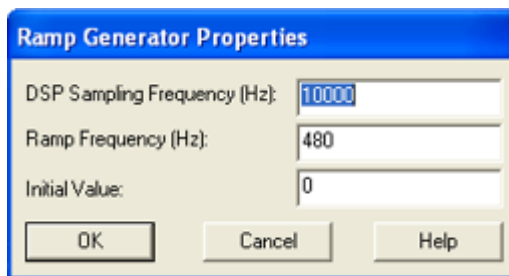


Figura B5 Ventana de propiedades del bloque Ramp Generator

Los bloques Inverse Park Transform32 y Park Transform32 utilizan la posición del rotor como parámetro de entrada theta(8,32) para funcionar, es por eso que usa el bloque generador de rampas para poder simular los pulsos contados por el encoder (ThetaElec) y así tener un control indirecto sobre estos bloques mediante el control de la frecuencia del generador de rampas.

5. Utilizar la configuración de los bloques mostrados en la figura B6 para obtener las señales de las corrientes la e lb.

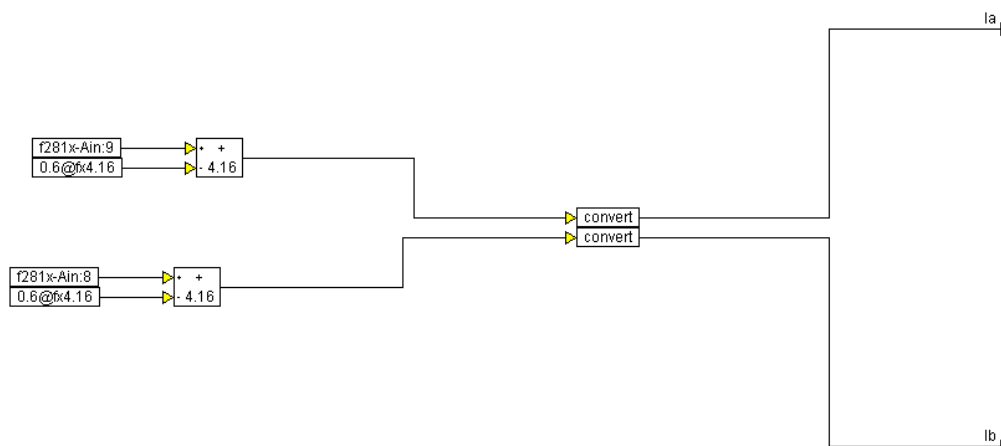


Figura B6 Bloques internos del bloque “corriente de línea”

6. Crear un bloque compuesto con el nombre **corriente de línea**.

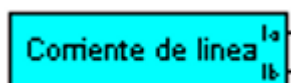


Figura B7 Bloque compuesto corriente de línea

7. Los bloques Clarke Transform32 y Park Transform32 se los agrega seleccionando la pestaña VisSim/Dsp—TI 32bit Digital Motor Control Blocks.

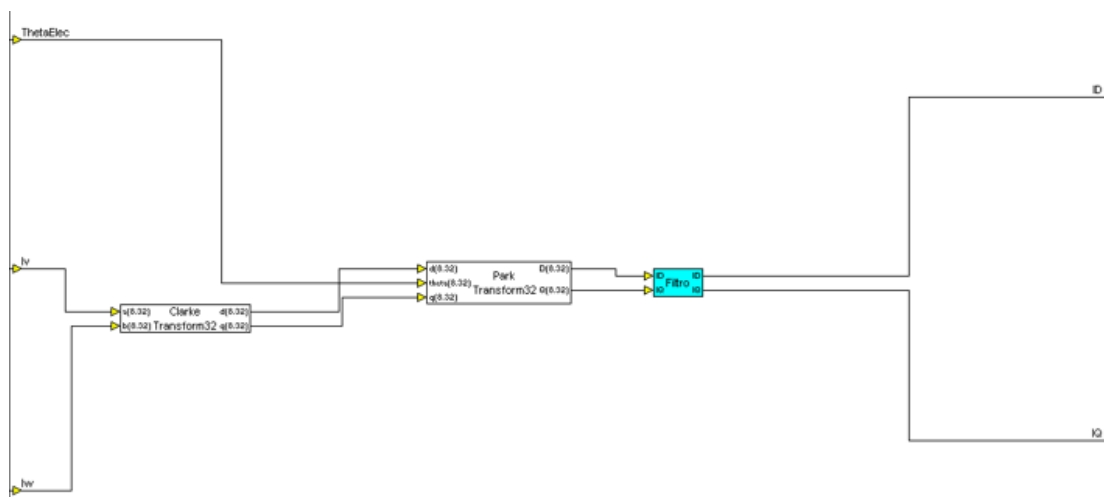


Figura B8 Bloque compuesto Filtro

El bloque compuesto Filtro está formado por los siguiente bloques en cascada de funciones de transferencias mostrados en la figura B9, la parametrización de la función de transferencia se muestra en la figura B10. Cabe recalcar que es la misma configuración para las 6 funciones de transferencia.

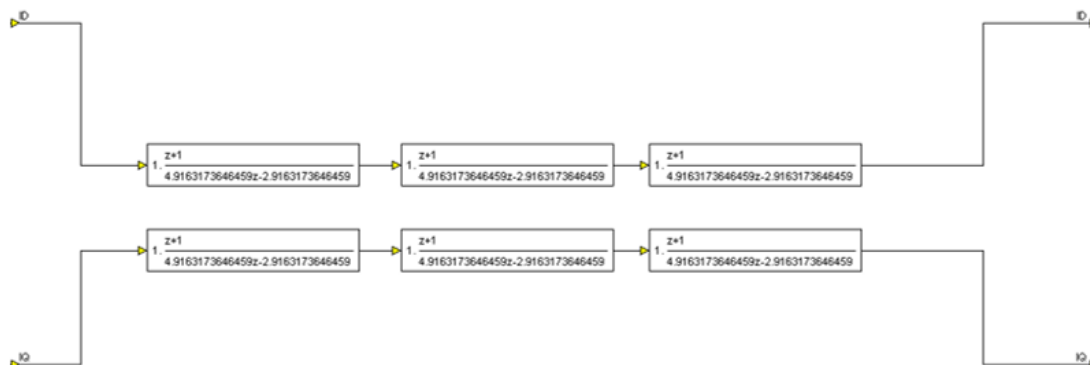


Figura B9 Bloques internos del bloque Filtro

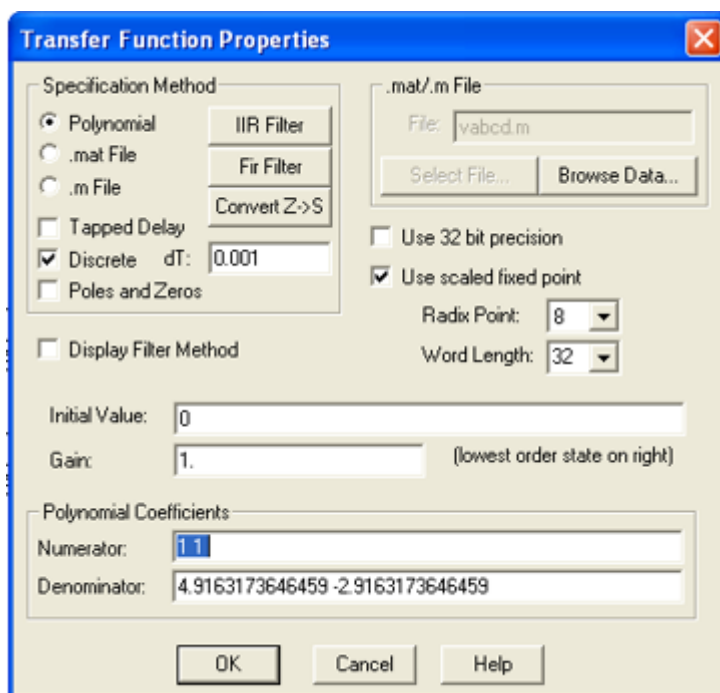


Figura B10 Ventana de propiedades de la función de transferencia

8. De los bloques anteriores realizar un bloque compuesto con el nombre **iv/iu DQvTransform**.

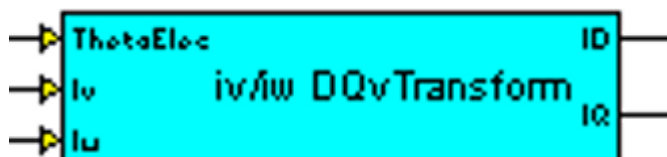


Figura B11 Bloque compuesto iv/iu DQ Transform

9. Colocar el bloque Position/Speed como se muestra en la figura B12.

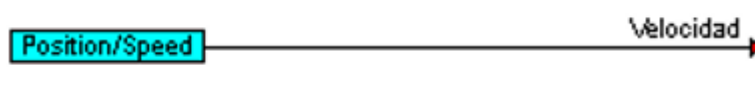


Figura B12 Bloque Position/Speed

El bloque position/speed es el mismo que se utiliza en la primera práctica (Véase primera práctica, paso 8) sino que con distinto nombre, ya que sólo se utiliza la variable velocidad.

Una vez terminado de realizar y configurar los bloques, conectarlos de la siguiente forma como se muestra en la figura B13.

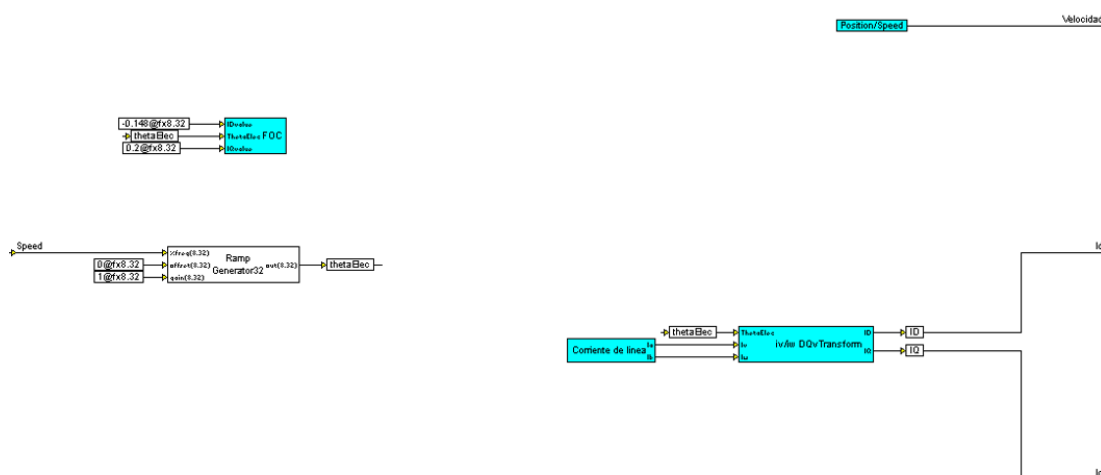


Figura B13 Conexión de los bloques del control FOC

10. Realizar un bloque compuesto de los bloques anteriores de la figura B13 con el nombre **FOCopenLoop**

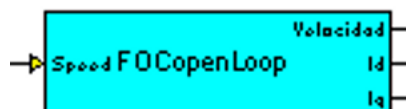


Figura B14 Bloque compuesto FOCopenLoop

11. Colocar los siguientes elementos para el monitoreo y control del bloque FOCopenLoop.

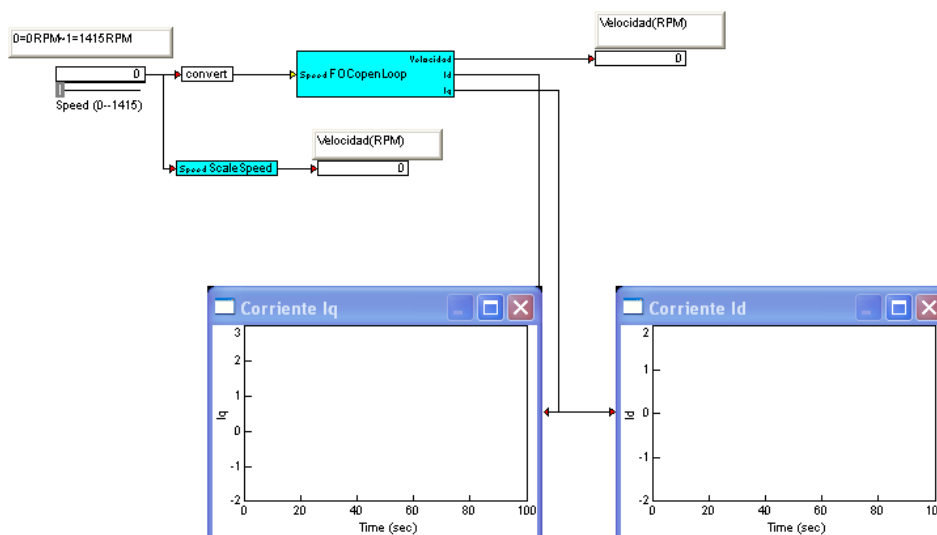


Figura B15 Elementos para visualización y control del bloque FOCopenLoop

El bloque compuesto ScaleSpeed está formado por los siguientes bloques mostrados en la figura B16

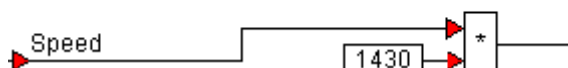


Figura B16 Escalamiento de la variable velocidad

12. Guardar el archivo con el nombre "FoC".
13. Realizar los pasos de compilación mostrados en la práctica#1 (Pasos 13 al 18).
14. Una vez terminado el proceso de compilación y creación de un nuevo archivo, se tendrá la siguiente configuración de bloques mostrados en la figura B17.

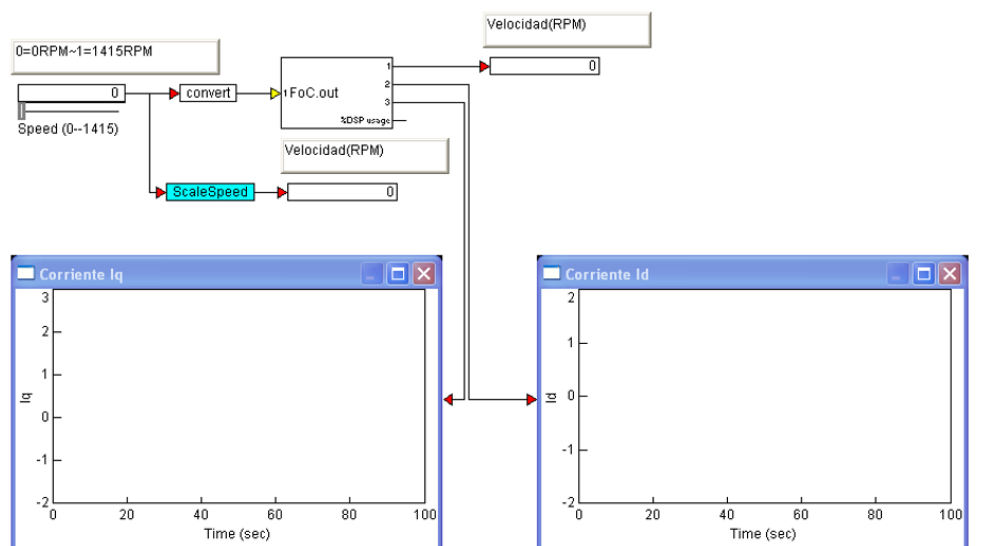


Figura B17 Diagramas de bloques del control FOC

15. Presionar F5 para realizar la simulación

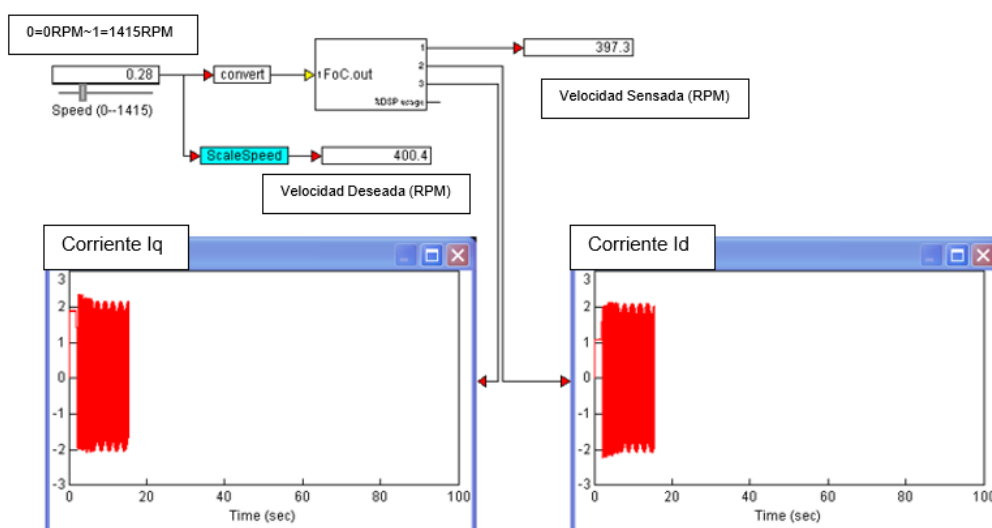


Figura B18 Simulación del control FOC a 400.4 RPM

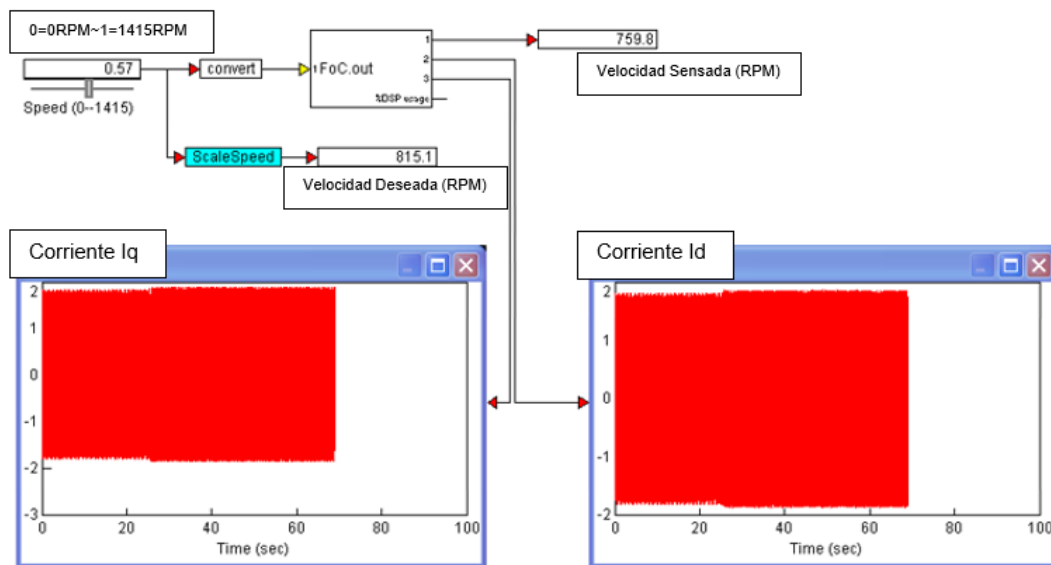


Figura B19 Simulación del control FOC a 815.1 RPM

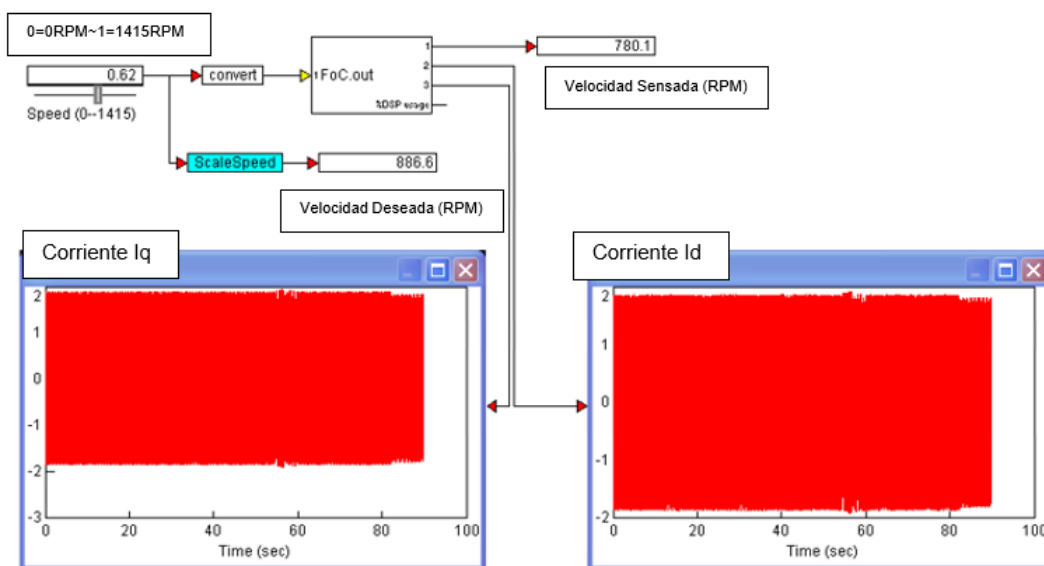


Figura B20 Simulación del control FOC a 886.1 RPM

PRÁCTICA #3

TEMA

Control de campo orientado (FOC) en lazo cerrado para motores AC mediante el software VisSim.

OBJETIVOS

Al concluir la práctica el estudiante estará en capacidad de:

- Crear y compilar un proyecto en VisSim
- Conectar el Trainer Kit MICRO 2812 con el software VisSim.
- Comprender de forma práctica, la teoría de control de campo orientado (FOC).
- Entender de forma práctica las transformadas de Clark y Park.
- Establecer de forma empírica los parámetros para un controlador PID.
- Realizar el control de velocidad de un motor AC en lazo cerrado.

TEORÍA

Esta técnica se basa en extrapolar la técnica de control de motores de corriente continua al ámbito de los motores de inducción. Para ello y debido a que una máquina de corriente alterna carece de dos bobinados desacoplados se recurre al expediente de referenciar el sistema trifásico alterno de corrientes estáticas a un sistema de coordenadas no estacionario que gira sincrónicamente con el campo magnético rotórico. En este nuevo sistema de referencia las corrientes estáticas pueden ser tratadas como vectores rotantes, de ahí el nombre de control vectorial o también control de campo orientado [17].

Existen básicamente dos técnicas diferentes de control vectorial; estas son: directa e indirecta. El control vectorial directo se implementa a partir de la medición directa del módulo y la posición del vector espacial de flujo que se seleccione como referencia, mientras que el método indirecto hace uso de un modelo de la máquina que depende de sus parámetros, los que a su vez dependen de parámetros tales como la

temperatura, la frecuencia y la saturación [17]. En este caso se usó la técnica de control directo.

Control vectorial directo

El control vectorial directo se basa en el modelo del motor en ejes de flujo de rotor, a través de un cambio de variable no lineal, las ecuaciones de estado de la máquina, que originalmente son no lineales y dependientes del tiempo, se transforman en lineales e independientes del tiempo. El sistema lineal resultante se controla utilizando técnicas de control lineal clásico. La técnica seleccionada busca que realice una linealización entrada-estado.

La diferencia entre estos controladores radica en que en el controlador vectorial directo sólo se incluyen en las ecuaciones de linealización los términos no lineales y dependientes del tiempo de las ecuaciones de estado de las variables eléctricas de la máquina, considerándose la velocidad mecánica como un parámetro. De hecho la ecuación del par es una relación no lineal entre el flujo y la corriente de par de la máquina, por lo que para realizar un control desacoplado del par y del flujo, es necesario mantener este último constante.

Por el contrario, la linealización exacta sistemática realiza una transformación no lineal del sistema completo reduciéndolo a un sistema lineal en forma normal, es decir, incluye tanto los términos lineales como los no lineales en las ecuaciones de transformación, resultando como sistema lineal equivalente una cadena de integradores.

Este hecho hace que las ecuaciones de la transformación no lineal para linealizar el sistema sean mucho más complejas que las utilizadas en el control vectorial directo. Esta complejidad hace que si en la implantación en tiempo discreto no se tienen en cuenta los efectos del muestreo en dichas ecuaciones no lineales, el error cometido al mantenerlas constantes durante todo el periodo de muestreo es mucho mayor en el caso de la linealización sistemática del controlador vectorial, dando lugar a un peor comportamiento del sistema [18].

LISTADO DE EQUIPOS A EMPLEARSE

- Módulo de potencia PEC16DSM01
- MICRO 2812 TRAINER KIT
- Emulador JTAG XDS510LC C2000 SERIES
- Buses de datos
- Computador
- Software VisSim 7.0

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. Mantener los pasos del 1 al 8 realizados anteriormente, figura 11 de la práctica #2.
2. Ingresar al menú VisSim/DSP → TI 32-bit Digital Motor Control y agregar dos bloques PID (PID Regulator).

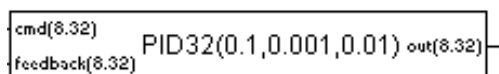


Figura C1 Bloque PID Regulator

Se utilizan dos bloques PID, uno para controlar la componente de torque (IQ) y otro para controlar la componente de flujo (ID) del motor AC.

3. Abrir la ventana de propiedades del primer Regulador PID que controla la componente de torque (IQ) y fijar los parámetros del mismo como se muestra en la figura C2.

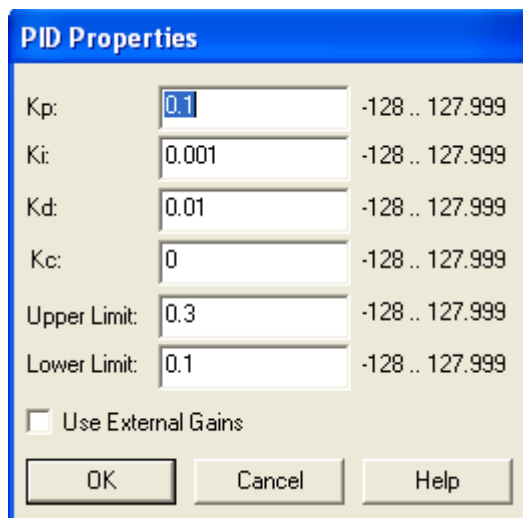


Figura C2 Configuración de parámetros del controlador PID para la variable IQ

4. Añadir al controlador PID los bloques que se muestran en la figura C3.

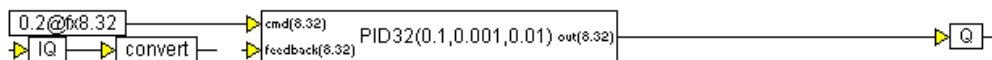


Figura C3 Conexión de bloques adicionales al controlador PID para la variable IQ

La variable IQ es una salida del bloque **iv/iu DQvTransform** que se mostró en la figura B11 de la práctica #2, y Q es una de las variables que ingresan al bloque FOC, figura B3 de la práctica #2. Además en la entrada **cmd (8,32)** del controlador PID se conecta una constante igual a 0.2.

5. Abrir la ventana de propiedades del segundo Regulador PID que controla la componente de flujo (ID) y fijar los parámetros del mismo como se muestra en la figura C4.

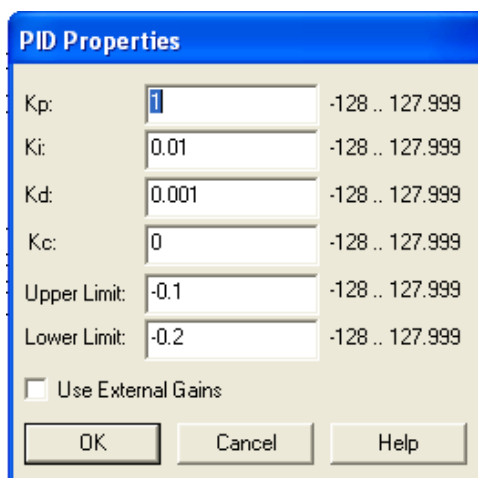


Figura C4 Configuración de parámetros del controlador PID para la variable ID

6. Añadir al segundo controlador PID los bloques que se muestran en la figura C5.

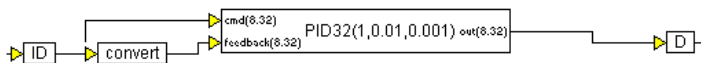


Figura C5 Conexión de bloques adicionales al controlador PID para la variable ID

Al igual que IQ, la variable ID también es una salida del bloque **iv/iu DQvTransform**. La señal de salida del controlador D ingresa al bloque FOC, y la entrada **cmd (8.32)** del controlador PID se conecta a la salida de un tercer controlador PID, el cual se describirá más adelante. Los dos controladores colocados se muestran en la figura C6.

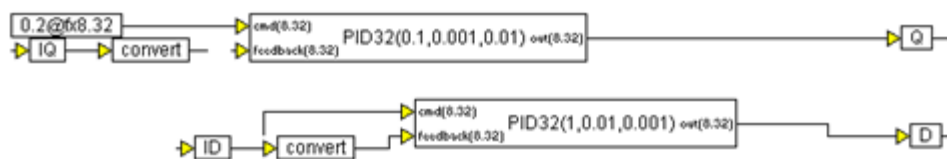


Figura C6 Bloques PID para controlar la variable ID e IQ

7. Añadir un tercer bloque PID Regulator, el cual se usará para controlar la velocidad de giro del motor AC.

8. Configurar el tercer Regulator PID como se muestra en la figura C7.

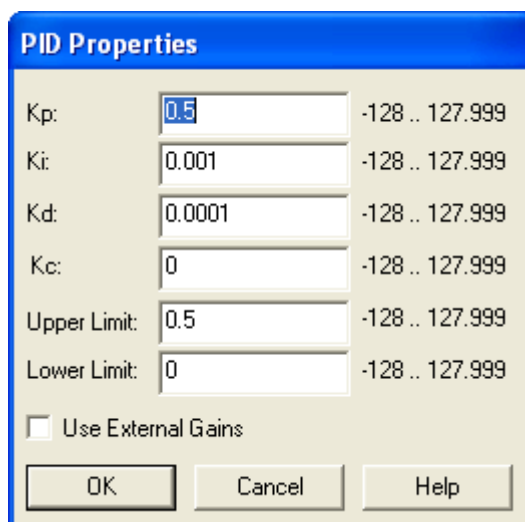


Figura C7 Configuración de parámetros del controlador PID para la velocidad

9. Conectar al controlador PID los bloques que se muestran en la figura C8.



Figura C8 Conexión del controlador PID para la velocidad con bloques adicionales

En la entrada cmd (8.32) del controlador PID se conecta el setpoint de velocidad (**SPspeed**), es decir la velocidad a la que se desea que gire el motor, y en la entrada feedback (8.32) se conecta el valor actual de velocidad sentido por el encoder (**PVspeed**). La salida del controlador PID de velocidad se conecta a la entrada cmd (8.32) del Controlador PID que regula la corriente de flujo. Cabe recalcar que antes de conectar la señal PVspeed con el controlador PID se utiliza el bloque **ScaleSpeed**, el cual se describe a continuación.

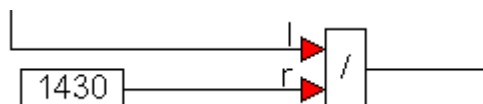


Figura C9 Circuito interno del bloque ScaleSpeed

Como se observa en la figura C9, el valor de velocidad sentido por el encoder (PVspeed) se divide para 1430, con el fin de escalar la velocidad entre 0 y 1. La conexión de los tres bloques PID se observa en la figura C10.

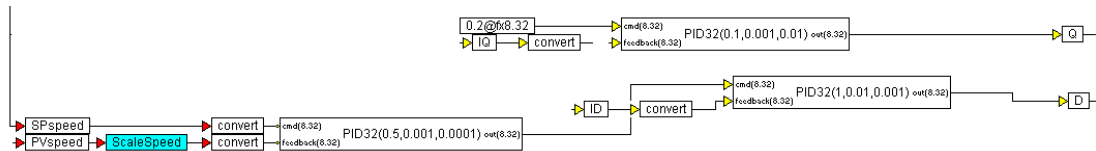


Figura C10 Conexión de los tres controladores PID

10. Colocar el bloque **ScaleSpeed** a la señal de setpoint de velocidad (SPspeed) y nombrar la salida **SpeedSP**, esta variable será la que se va a monitorear.

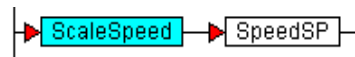


Figura C11 Conexión del bloque ScaleSpeed y salida SpeedSP

11. Revisar que todos los bloques mostrados en la siguiente figura se encuentren conectados de forma correcta

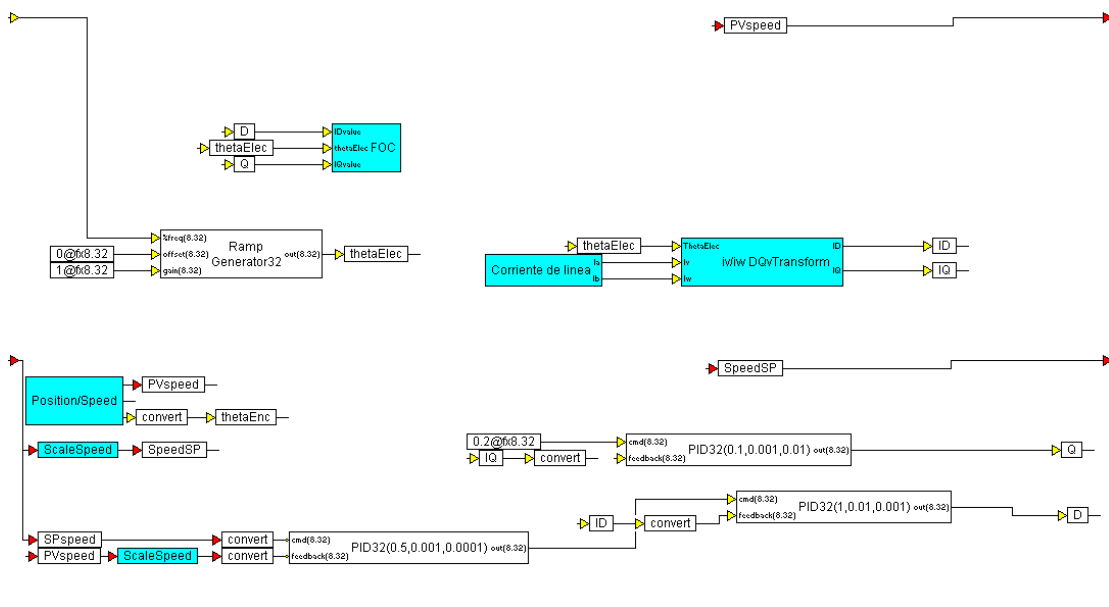


Figura C12 Bloques internos del control FOC lazo cerrado

12. Seleccionar todos bloques de la figura y crear un bloque compuesto con el nombre **FOCcloseLoop**.

13. Realizar los pasos de compilación mostrados en la práctica#1 (Pasos 13 al 18)
14. Colocar un bloque generador de señales sinusoidales para simular cambios en la referencia.

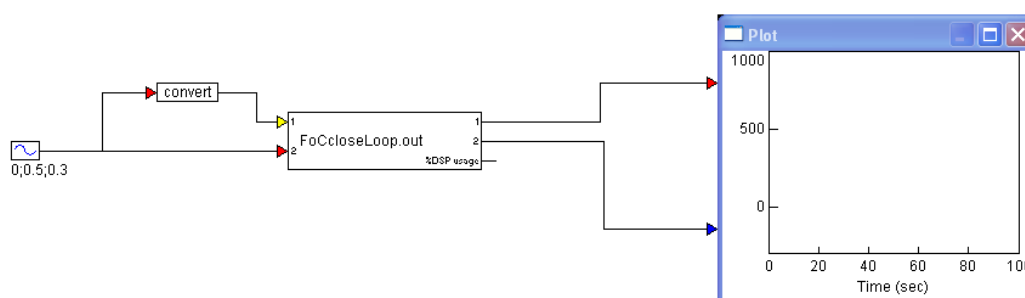


Figura C13 Setpoint sinusoidal

15. Presionar F5 para realizar la simulación

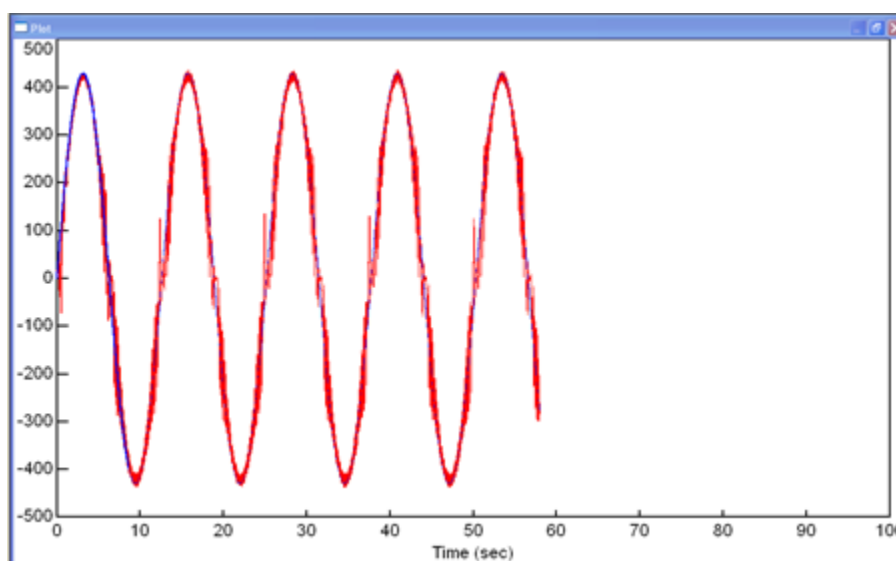


Figura C14 Simulación con entrada sinusoidal

Se puede observar como el motor (línea roja) sigue la referencia sinusoidal de entrada (línea azul).

Ahora para probar que el control no solamente sirve para una referencia sinusoidal, se decide cambiar el setpoint por un generador de ondas triangulares como se muestra en la figura C15.

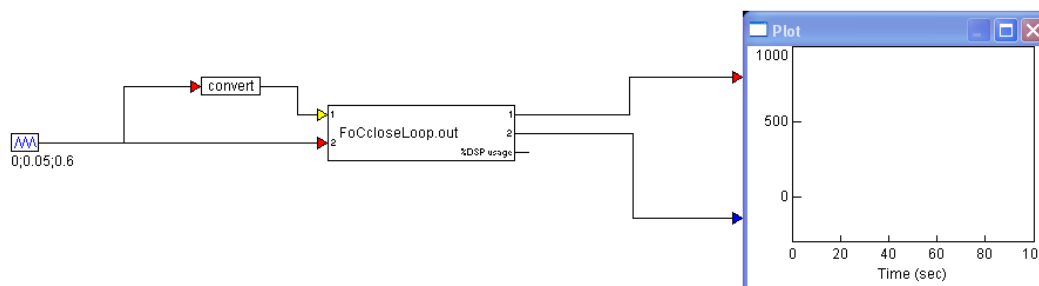


Figura C15 Setpoint triangular

16. Presionar nuevamente F5 para realizar la simulación

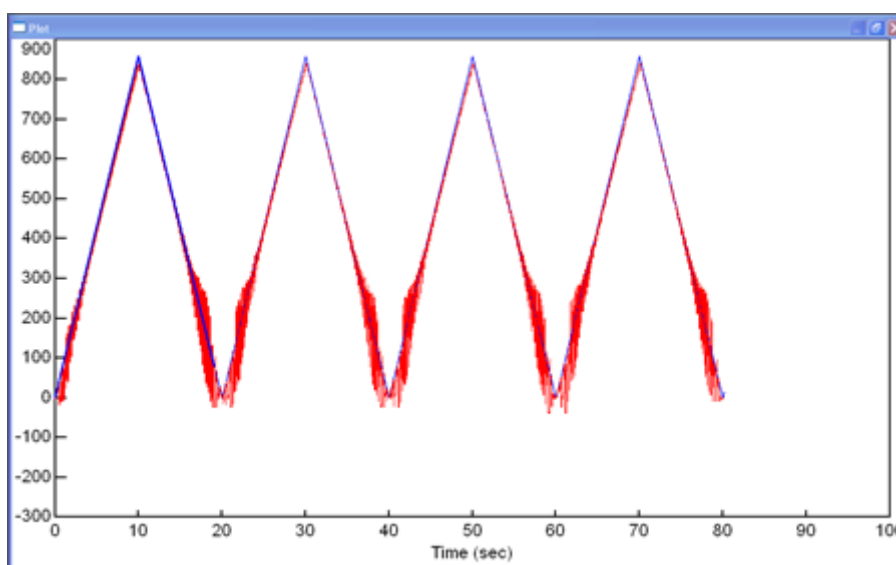
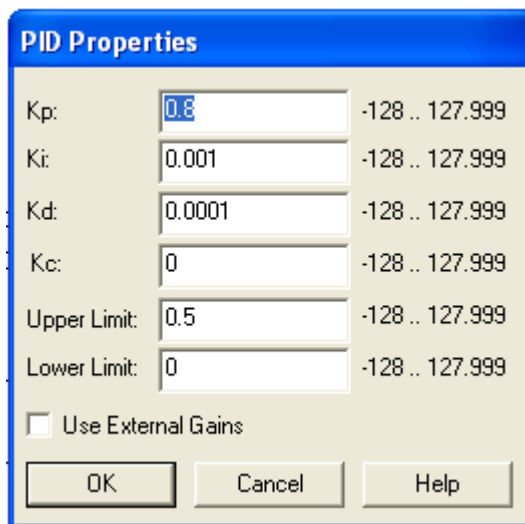


Figura C16 Simulación con entrada triangular

En la C16 figura se puede comprobar que el control del motor con cambios en la referencia es válido, ya que al colocar otro tipo de señal como entrada, el sistema responde de manera adecuada. Por ende se concluye que se tiene un control óptimo.

Para la última parte de esta práctica se decide hacer un control frente a cambios transitorios, para esto se tiene que realizar los siguiente cambios.

17. Cambiar los valores de los controladores PID para las variables velocidad, ID e IQ como se muestran en la siguiente figuras C17, C18 y C19 respectivamente.



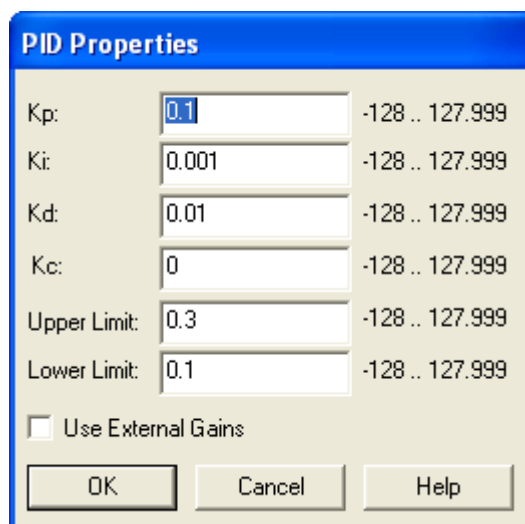
The screenshot shows the 'PID Properties' dialog box with the following parameters:

Parameter	Value	Range
Kp:	0.8	-128 .. 127.999
Ki:	0.001	-128 .. 127.999
Kd:	0.0001	-128 .. 127.999
Kc:	0	-128 .. 127.999
Upper Limit:	0.5	-128 .. 127.999
Lower Limit:	0	-128 .. 127.999

Use External Gains

Buttons: OK, Cancel, Help

Figura C17 Configuración de parámetros del controlador PID para la velocidad



The screenshot shows the 'PID Properties' dialog box with the following parameters:

Parameter	Value	Range
Kp:	0.1	-128 .. 127.999
Ki:	0.001	-128 .. 127.999
Kd:	0.01	-128 .. 127.999
Kc:	0	-128 .. 127.999
Upper Limit:	0.3	-128 .. 127.999
Lower Limit:	0.1	-128 .. 127.999

Use External Gains

Buttons: OK, Cancel, Help

Figura C18 Configuración de parámetros del controlador PID para la variable IQ

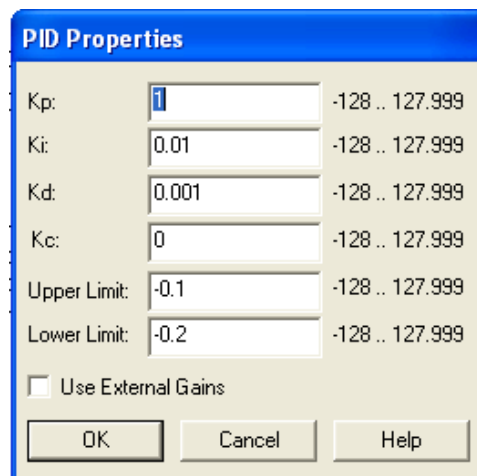


Figura C19 Configuración de parámetros del controlador PID para la variable ID

18. Cambiar la señal de entrada por señales de tipo escalón como se muestra en la figura C20.

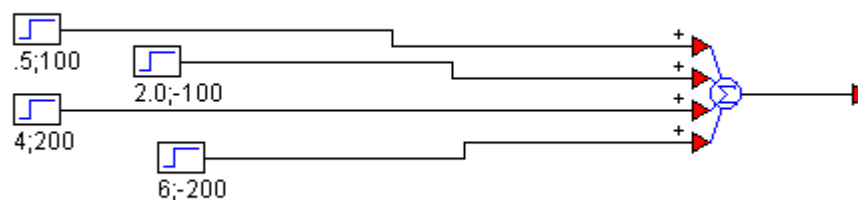


Figura C20 Entrada al sistema tipo escalón

19. Seleccionar todos los bloques de la figura C20 y crear un bloque compuesto llamado Speed Setting.
20. Colocar un filtro para la salida del valor presente sentido.

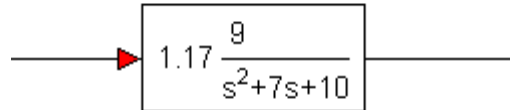


Figura C21 Función de transferencia como filtro

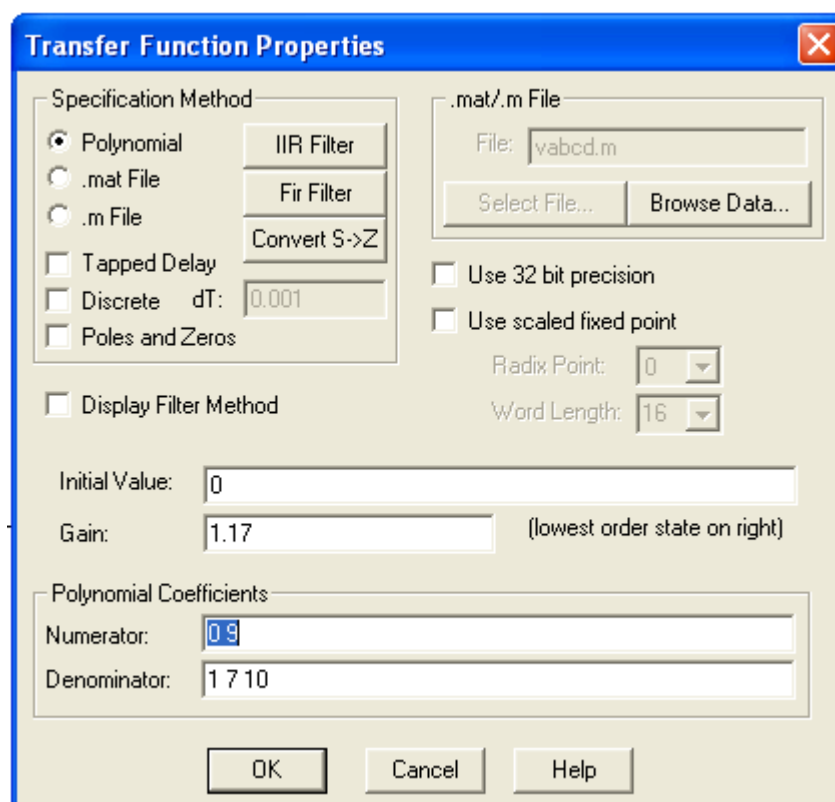


Figura C22 Configuración de la función de transferencia

21. Seleccionar el bloque de la función de transferencia y crear un bloque compuesto con el nombre PresentValue



Figura C23 Bloque compuesto PresentValue

22. Compilar el bloque compuesto FoCcloseLoop.
23. Colocar los bloques como se muestra en la figura

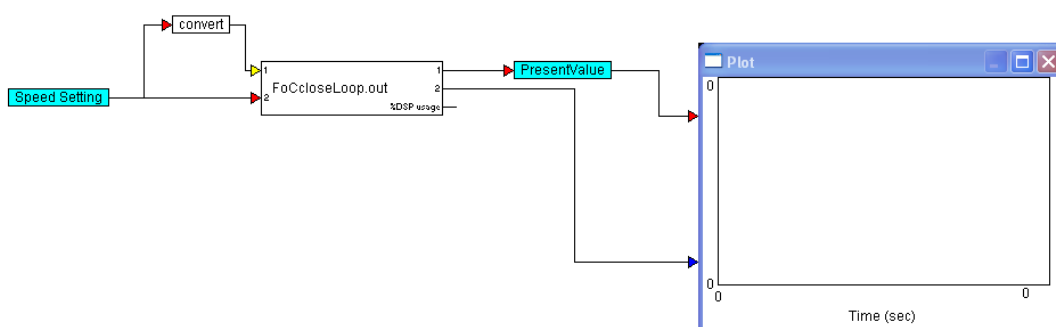


Figura C24 Control FOC lazo cerrado con cambios transitorios

24. Presionar F5 para realizar la simulación

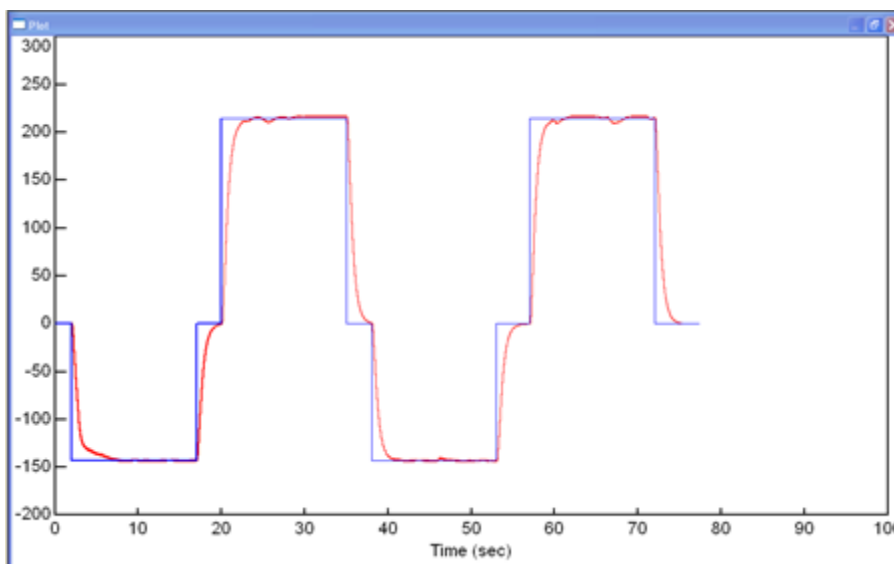


Figura C25 Simulación ante cambios transitorios