

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO



**PROGRAMA DE POSGRADO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**

ARQUITECTURA ABIERTA PARA EL ROBOT MITSUBISHI MELFA RV-E2:

DRIVER DE POTENCIA PARA MOTORES

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

César Noel Díaz González

Ensenada, Baja California, México, enero 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

ARQUITECTURA ABIERTA PARA EL ROBOT MITSUBISHI MELFA RV-E2:
DRIVER DE POTENCIA PARA MOTORES

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Ing. César Noel Díaz González

Aprobada por:



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete

Director de tesis



Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco

Miembro del comité



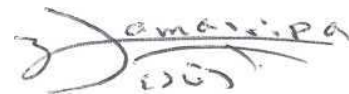
Dr. Juan de Dios Sánchez López

Miembro del comité

RESUMEN de la tesis de **César Noel Díaz González**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN INGENIERÍA** del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada, Baja California, México, enero 2013.

ARQUITECTURA ABIERTA PARA EL ROBOT MITSUBISHI MELFA RV-E2:
DRIVER DE POTENCIA PARA MOTORES

Resumen aprobado por:



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete

Director de tesis

En este trabajo de tesis, se hace una revisión a uno de los equipos del Laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño de la UABC, el robot manipulador Mitsubishi Melfa RV-E2, un equipo en desuso. Se realiza un análisis general del este equipo, así como el diseño y construcción de un driver de potencia con el cual puedan ser operados los motores superiores de dicho robot. Se describe además, las pruebas realizadas durante todo el proceso. La realización de este driver de potencia es para la operación de los motores del robot manipulador y de este modo el apoyo al Laboratorio de Mecatrónica con equipo operable para la realización de prácticas de laboratorio y trabajos de investigación.

Palabras Clave: Robot manipulador, Driver de potencia, Motor CA.

Dedicatoria

Es trabajo se lo dedico a mis padres, Marcos y Evangelina, por su apoyo en cada etapa de mi vida, por sus lecciones y consejos, por darme la oportunidad de estudiar y sobre todo por darme la vida.

A mis hermanos David, Joel, Iván y Marcos por estar siempre conmigo motivándome en cada una de mis metas, por brindarme su apoyo y afecto, por der además de hermanos mis mejores amigos.

Agradecimientos

Mis sinceros agradecimientos para:

Al Dr. José de Jesús Zamarripa Topete por su amistad, su tiempo, atención, consejos y enseñanzas durante mis estudios de maestría, además por su dedicación como mi director de tesis.

Al Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco por su amistad, enseñanzas y recomendaciones y por ser parte de mi comité.

Al Dr. Juan de Dios Sánchez López por su amistad, atención y enseñanzas y por formar parte de mi comité.

A todos los maestros presentes durante mi formación profesional por sus enseñanzas y dedicación.

A mis compañeros de generación Diego Bustillos, Francisco Villalpando, Javier Villagrana, Jesús Ayala, Daniel Miranda y José Álvarez por su amistad y compañerismo.

Contenido

	Página
Resumen	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimientos	5
Contenido	6
Lista de Figuras	12
Lista de Tablas.....	15

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	16
1.1. Antecedentes	16
1.1.1. Ubicación geográfica del proyecto	16
1.1.2. Antecedentes históricos	16
1.1.3. Estado actual del proyecto	18
1.2. Planteamiento del problema	18
1.2.1. Descripción del problema	18
1.3. Pregunta de investigación	18
1.4. Hipótesis	19
1.5. Objetivos	19
1.5.1. Objetivo general del trabajo	19
1.5.2. Objetivos específicos del trabajo	19
1.6. Importancia del estudio	20

	Página
1.6.1. Justificación del estudio	20
1.7. Limitaciones del estudio	21
1.7.1. Delimitación geográfica	21
1.7.2. Delimitación tecnológica	21
1.7.3. Delimitación de usuarios	21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA	22
2.1. Introducción	22
2.2. Robots	22
2.2.1. Brazos manipuladores	22
2.2.1.1. Generación	23
2.2.1.2. Área de aplicación	24
2.2.1.3. Tipo de actuadores	24
2.2.1.4. Grados de libertad	25
2.2.1.5. Configuración	25
2.2.1.6. Tipo de control	25
2.3. Tipos de arquitecturas	26
2.3.1. Arquitectura cerrada	27
2.3.2. Arquitectura abierta	27
2.3.2.1. Arquitectura abierta ámbito académico	28
2.3.2.2. Arquitectura abierta ámbito comercial	28
2.4. Sensores y transductores	28

	Página
2.4.1. Sensores de desplazamiento	29
2.4.1.1. Potenciómetro	29
2.4.1.2. Codificadores ópticos	29
2.4.1.3. Resolvedores	30
2.4.2. Sensores de proximidad	31
2.4.2.1. Interruptores	31
2.4.2.2. Sensores inductivos	32
2.4.2.3. Sensores capacitivos	32
2.4.2.4. Sensor de Efecto Hall	33
2.4.2.5. Sensores Ópticos	34
2.4.2.6. Sensores Ultrasónicos	35
2.4.3. Sensores de tacto	36
2.4.4. Sensores de fuerza	36
2.5. Actuadores y servomecanismos de brazos manipuladores	37
2.5.1. Actuadores hidráulicos	37
2.5.2. Actuadores neumáticos	38
2.5.3. Actuadores eléctricos	39
2.5.3.1. Motores de corriente continua	40
2.5.3.2. Motores de corriente alterna	41
2.5.3.3. Motores a pasos	42
2.5.3.4. Control de motores de inducción	42
2.5.4. Servomecanismos	45
2.6. Interfaces de brazos articulados manipuladores a la PC	46
2.7. Interfaz al usuario en la PC	47

Página

2.7.1. RT Toolbox2 y MELFA WORKS	47
2.7.2. USA, 2010, "KCF: Una toolbox de MATLAB para control de movimiento de robots manipuladores KUKA"	48
2.8. Sumario	48

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA	49
3.1. Introducción	49
3.2. Equipos	49
3.2.1. Robot manipulador Mitsubishi Melfa RV-E2	49
3.2.2. Controlador Mitsubishi Melfa CR-E116	50
3.3. Elementos	51
3.3.1. FNB41560	51
3.3.2. M5229demokit	52
3.3.3. CodeWarrior Development Studio	53
3.4. Procedimientos	54
3.4.1. Análisis del sistema	54
3.4.1.1. Robot manipulador	54
3.4.1.2. Unidad de control	56
3.4.2. Pruebas de laboratorio	59
3.4.2.1. Módulo de potencia	59
3.4.2.2. Tarjeta de alimentación	65
3.4.2.3. Motores	66

Página

3.4.2.4. Diseño Nuevo Módulo de potencia	68
3.4.2.5. Programación Microcontrolador	71
3.4.2.6. Tarjeta de comunicación	73
3.4.2.7. Prueba de driver de potencia	74
3.4.2.8. Fuente de alimentación y análisis de potencia	77
3.4.2.9. Respuesta de motor a comandos del microcontrolador	88
3.4.2.10. Esquemático final del diseño	89

CAPÍTULO IV

RESULTADOS	93
4.1. Introducción	93
4.2. Resultados microcontrolador	93
4.3. Resultados driver de potencia	94
4.4. Resultados frecuencias de operación en el motor	95

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES	99
5.1. Introducción	99
5.2. Conclusiones	99
5.3. Trabajos futuros	101

APÉNDICES

	Página
APÉNDICE A	102
APÉNDICE B	106
APÉNDICE C	114
BIBLIOGRAFÍA	116

Lista de Figuras

	Página
Figura 1. Robot manipulador fijo.	23
Figura 2. Potenciómetro.	29
Figura 3. Codificador óptico incremental.	30
Figura 4. Resolvedor.	31
Figura 5. Switch límite.	31
Figura 6. Sensor inductivo.	32
Figura 7. Sensor capacitivo.	33
Figura 8. Sensor de efecto Hall.	34
Figura 9. Diodo infrarrojo y fototransistor.	35
Figura 10. Sensor ultrasónico.	35
Figura 11. Sensor de tacto.	36
Figura 12. Galga extensiométrica.	37
Figura 13. Actuadores hidráulico.	38
Figura 14. Actuador neumático.	39
Figura 15. Auto de juguete con motor de corriente continua.	40
Figura 16. Motor de corriente alterna.	41
Figura 17. Motor a pasos.	42
Figura 18. Configuración Estrella-Delta.	43
Figura 19. Servomotor.	46
Figura 20. Robot manipulador Mitsubishi RV-E2.	50
Figura 21. Controlador CR-E116 de Mitsubishi.	51
Figura 22. Circuito integrado FNB41560.	52
Figura 23. Tarjetas M52259DEMOKIT.	53

Página

Figura 24. Ventana del CodeWarrior Development Studio.	54
Figura 25. Robot manipulador, vista interna.	55
Figura 26. Motor de CA con codificador absoluto integrado.	56
Figura 27. Leds de error en unidad de control.	57
Figura 28. Panel frontal de unidad de control.	58
Figura 29. Módulo de potencia.	59
Figura 30. Circuito divisor de frecuencia.	61
Figura 31. Señales de salida circuito divisor de frecuencia.	62
Figura 32. Bosquejo unidad de control, circuito de prueba.	63
Figura 33. Tarjeta de alimentación en unidad de control.	66
Figura 34. Embobinado del estator de motor de AC trifásico.	67
Figura 35. Rotor de motor AC trifásico.	67
Figura 36. Arreglo estrella-estrella de transformadores para reducción de voltaje.	68
Figura 37. Circuito implementado para como módulo de potencia.	69
Figura 38. Operación de módulo de potencia con microcontrolador.	71
Figura 39. Diagrama de flujo del programa.	72
Figura 40. Tarjeta de comunicación.	74
Figura 41. Módulos conectados a resistencia de carga.	75
Figura 42. Señales de salida en driver de potencia.	76
Figura 43. Motor operado por el sistema.	77
Figura 44. Señales de voltaje y corriente, fuente de alimentación.	78
Figura 45. Señales de voltaje y corriente, en motor.	79
Figura 46. Señal de voltaje en el motor.	80

Página

Figura 47. Señal de corriente en el motor.	82
Figura 48. Voltaje (azul) y corriente (amarillo) fuente de con la resistencia..84	
Figura 49. corriente y voltaje en motor (transformador con resistencia).	85
Figura 50. Señal de voltaje en el motor (transformador con resistencia). ..	86
Figura 51. Señal de corriente en el motor (transformador con resistencia). 87	
Figura 52. Tacómetro.	89
Figura 53. Esquemático final del diseño.	91
Figura 54. Señales generadas por el microcontrolador.	93
Figura 55. Barrido de frecuencias.	94
Figura 56. Inconsistencia en el giro del motor, señal tacómetro.	96
Figura 57 Señal constante en tacómetro.	97
Figura 58. Respuesta Frecuencia contra revoluciones del motor.	98
Figura 59. fuente de poder BK precisión 1651A.	102
Figura 60. Osciloscopio Tektronix TDS2014.	104
Figura 61. Generador de funciones BK precisión 4010A.	105
Figura 62. PCB Módulo de potencia.	114
Figura 63. PCB comunicación microcontrolador-módulo de potencia.	115

Lista de tablas

	Página
Tabla 1. Clasificación de robots por generación.	24
Tabla 2. Tipos de control.	26
Tabla 3. Características Mitsubishi RV-E2.	49
Tabla 4. Características motores.	55
Tabla 5. Lista de materiales driver de potencia.	70
Tabla 6. Lista de materiales circuito completo.	92
Tabla 7 Resultados fuente de alimentación.	95
Tabla 8. Tacómetro en el motor.	97
Tabla 9. Características fuente de poder BK precisión 1651A.	102
Tabla 10. Características Osciloscopio TDS2014 de Tektronix.	103
Tabla 11. Generador de funciones BK precisión 4010A.	104

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Ubicación geográfica del proyecto

El trabajo que se realizará surge con la necesidad que rehabilitar equipo del laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño (FIAD), de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado en el Km. 103 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México. Dado que actualmente parte del equipo está inhabilitado para trabajar lo que impide el desarrollo de prácticas mejor elaboradas para los alumnos de las diferentes asignaturas de control y de dispositivos electrónicos de potencia.

1.1.2. Antecedentes históricos

Desde el principio de los tiempos, el ser humano se ha empeñado en buscar maneras de hacer de la vida algo más cómoda, con gran atracción a mecanismos capaces de imitar o facilitar trabajos hechos por el hombre. Este tipo de mecanismos inicialmente fue denominado como *automatos* por los griegos, de la cual deriva la palabra autómata.

Con el paso de los años este nombre de autómata permaneció, pero no fue hasta 1921 cuando la palabra *robot* fue utilizada por el escritor checo Karel Capek en su obra *Rossum's Universal Robot*, esto logró popularidad entre los escritores de ciencia ficción. Uno de los mayores impulsores del uso de la palabra robot fue el escritor americano de origen ruso Isaac Asimov, a quien

también se le atribuye la generación y difusión del término robótica en sus novelas [1].

El termino robot se puede definir como un mecanismo que combina elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos de mando así como de control, capaz de realizar diferentes tareas generalmente repetitivas [1].

Actualmente existe una gran cantidad de tipos de robots, clasificados de acuerdo a sus características según su generación, área de aplicación, actuadores, grados de libertad, configuración, tipo de control, entre otras [2].

Desde la integración de los robots en la industria la demanda de estos ha ido en incremento, presentado en 2011 un incremento de las ventas de robots industriales del 38%, el incremento más grande en la historia, según datos proporcionados por la International Federation of Robotics [22].

En la industria existen diferentes clases de robots manipuladores, en su mayoría con arquitectura cerrada, esto es uno de los principales problemas para la implementación de nuevos algoritmos de control. La mayoría de estos robots son diseñados para satisfacer las demandas generales del mercado, limitados en cuanto a la flexibilidad de desarrollo.

Una de las principales ventajas de los robots de arquitectura abierta contra los robots industriales de arquitectura cerrada, es la flexibilidad y capacidad de adaptación, ya que al tener acceso a la arquitectura interna del robot, permite la capacidad de desarrollar una gama más grande de tareas [3] [4].

Este trabajo presentará el desarrollo de un driver de potencia, para el robot Mitsubishi Melfa RV-E2 de 6 grados de libertad. Este robot podrá utilizarse para el desarrollo y prueba, de algoritmos de control de robots manipuladores.

1.1.3. Estado actual del proyecto

El robot Mitsubishi Melfa RV-E2 tiene 9 años de antigüedad en la Facultad durante los cuales su vida útil fue de 5 años en los cuales los alumnos de la asignatura de control realizaron prácticas totalmente demostrativas, en las que el profesor asignaba una rutina al robot.

Actualmente el robot Mitsubishi Melfa RV-E2 se encuentra inhabilitado para trabajar ya que este no logra inicializar debido a que un banco de memoria se encuentra dañado por la falta de mantenimiento.

Los costos de reparación son muy elevados ya que el robot Mitsubishi Melfa RV-E2 se encuentra fuera del mercado.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción del problema

El Robot Melfa RV-E2 se encuentra dañado, dicho modelo ha sido discontinuado por Mitsubishi, lo que dificulta su reparación por dicha empresa. Al ser de arquitectura cerrada, no se tiene acceso a diagramas de diseño, lo que imposibilita su reparación por otros medios, por lo que se requiere una modificación en su arquitectura para su reparación.

1.3. Pregunta de investigación

La pregunta de investigación para este trabajo es:

¿Se podrá realizar un driver de potencia para los motores del robot Mitsubishi Melfa RV-E2?

1.4. Hipótesis

La hipótesis de esta investigación es:

Sí se podrá realizar un driver de potencia para los motores del robot Mitsubishi Melfa RV-E2.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general del trabajo

El objetivo general de este trabajo es:

Realizar un driver de potencia para los motores del robot Mitsubishi Melfa RV-E2.

1.5.2. Objetivos específicos del trabajo

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Identificación de los elementos de la arquitectura cerrada del robot.
- Identificación y caracterización, de los elementos del robot útiles para la arquitectura abierta del robot.

- Diseño e implementación, del driver de potencia para la arquitectura abierta del robot, basado en la información adquirida para garantizar su funcionamiento.
- Acondicionamiento de la señales para el driver de potencia.
- Implementar interfaz en microcontrolador para la prueba y validación del driver de potencia.

1.6. Importancia del estudio

1.6.1. Justificación del estudio

La investigación durante el proyecto ayudará a la rehabilitación del robot Mitsubishi Melfa RV-E2 con arquitectura abierta, esto dará accesos a todas las variables de control lo que permitirá la experimentación y análisis del mismo.

Los principales beneficiarios serán a alumnos y maestros, usuarios del laboratorio de mecatrónica, al tener a disposición un sistema electromecánico completo, lo que reforzará la teoría con algo más práctico, sin ser limitados a simulaciones. Dicho robot les permitirá experimentar con las variables de control del mecanismo, además de permitir observar cómo influyen estas en el comportamiento de éste en la realidad.

Esto permitirá probar y desarrollar, de algoritmos de control, para la solución de problemas de otros sistemas similares, por lo que el presente proyecto incluye fines académicos y de investigación.

1.7. Limitaciones del estudio

1.7.1. Delimitación geográfica

El proyecto se realizará en las instalaciones del laboratorio de Mecatrónica de la FIAD y concluirá en el mismo.

1.7.2. Delimitación tecnológica

El proyecto se limitara a la estructura del robot Mitsubishi Melfa RV-E2, en el que se realizarán las modificaciones a arquitectura abierta.

1.7.3. Delimitación de usuarios

El proyecto será dirigido a los alumnos y profesores, usuarios del Laboratorio de Mecatrónica de la FIAD.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Introducción

En este capítulo presentará una revisión y análisis de documentos relacionados con el proyecto, así como de trabajos desarrollados en el ámbito comercial y académico.

2.2. Robots

Un robot puede ser definir como un mecanismo autónomo constituido de elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos de control, diseñado para realizar tareas específicas. Estos se pueden dividir en robots manipuladores y robots móviles, que a su vez se clasifican según sus características. En los siguientes apartados se abundará únicamente acerca de los robots manipuladores al ser este el tema de interés [2] [5].

2.2.1. Brazos manipuladores

Un brazo manipulador es máquina autónoma de varios grados de libertad, reprogramable y de múltiples usos, generalmente empleada para la manipulación de objetos, según trayectorias variables; este puede ser colocado en un lugar fijo o móvil como lo muestra la figura 1 [5] [6].



Figura 1. Robot manipulador fijo.

Un robot manipulador puede ser clasificado según diferentes criterios, como generación, área de aplicación, tipo de actuadores, grados de libertad, configuración, tipo de control [5] [6].

2.2.1.1. Generación

Esta clasificación permite saber cuan avanzado es un robot, ya que hace referencia al momento tecnológico en que el robot apareció. El paso de una generación a otra, queda marcado al lograr un avance significativo en las capacidades del robot. Esto resulta ser un tanto subjetivo ya que según el autor se puede situar un robot en una u otra generación. Una de las posibles clasificaciones se presenta a continuación en la tabla 1 [6].

Tabla 1. Clasificación de robots por generación.

Generación:	Características:	Época:
1 ^a	Movimientos monótonos con tareas secuenciales, no consideran el entorno.	Comienzo de la robótica hasta los años 80's.
2 ^a	Adquiere información limitada del entorno, adapta sus movimientos en consecuencia.	De los 80's hasta los primeros años del siglo XIX.
3 ^a	Tienen la capacidad de planificar automáticamente sus tareas, su programación emplea un lenguaje natural.	Se encuentra en desarrollo en la actualidad.

2.2.1.2. Área de aplicación

Al considerar uso del robot, este puede ser clasificado de varias maneras en base al sector económico donde labora, por el tipo de aplicación o tarea que desempeña. En el caso de los robots de servicio la manera de clasificación resulta ser más precisa al considerar un primer criterio según el servicio al que es dirigido que puede ser a los humanos, a equipos o a otras actividades [6].

2.2.1.3. Tipo de actuadores

Esta clasificación atiende al tipo de energía empleada para impulsar el movimiento de los ejes principales de robot [6], que pueden ser:

- Neumático.
- Hidráulico.
- Eléctrico.

Las características de cada uno de estos actuadores pueden verse con detalles en la sección 2.5.

2.2.1.4. Grados de libertad

Se entiende como grados de libertad, al número de movimiento independientes que posea el robot manipulador. De acuerdo a ISO un robot manipulador industrial no puede tener menos de tres grados de libertad, por lo que un robot manipulador podrá ser clasificado en esta categoría si posee un número de articulaciones igual o mayor a tres [6].

2.2.1.5. Configuración

Esta clasificación queda definida por el tipo de movimientos permitidos entre dos articulaciones consecutivas, que pueden ser cartesiano, cilíndrico, polar, articular, SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm) o paralelo [6].

2.2.1.6. Tipo de control

Según la norma ISO 8373, la clasificación por tipo de control se ajusta a las siguientes categorías como se muestra en la tabla 2 [6].

Tabla 2. Tipos de control.

Tipo de control:	Características:
Robot secuencial.	Realiza un conjunto de movimientos eje por eje, en un orden determinado, de modo que al finalizar un movimiento inicia el siguiente.
Robot controlado por trayectoria.	Ejecuta un proceso controlado por el cual el movimiento de tres o más ejes se desarrolla, según instrucciones que especifican el tiempo de trayectoria necesario para lograr una posición.
Robot adaptativo.	Tiene funciones de control con sensores, control adaptativo, o funciones por aprendizaje.
Robot teleoperado.	Puedes ser dirigido a distancia por un operador humano.

2.3. Tipos de arquitecturas

Existe un gran número de características en lo que se refiere a la arquitectura de un robot manipulador como lo son accesibilidad, capacidad de carga rapidez de respuesta entre otras, estas pueden ser consideradas para su clasificación por arquitectura. En los temas siguientes se describirá específicamente acerca de arquitecturas cerradas o abiertas al ser el tema de interés en este trabajo [6].

2.3.1. Arquitectura cerrada

Se considerara como robot de arquitectura cerrada aquel en el que sus características de diseño de hardware y software, no pueden ser modificadas, como son el caso de la mayoría de los robots industriales [7] [9].

Una de sus principales ventajas en este tipo de robots es su robustez, garantizada por numerosas pruebas de diseño, sin embargo su arquitectura cerrada no permite que realicen tareas para las cuales no fueron diseñados [7] [9].

2.3.2. Arquitectura abierta

Los robots de arquitectura abierta brindan la posibilidad de tener acceso e incluso modificar elementos de hardware, software o ambos [7].

Algunas ventajas en manipuladores arquitectura abierta es su gran flexibilidad y posibilidad de evolución, razón por la cual muchas universidades y centros de investigación ha puesto interés en el desarrollo de este tipo de dispositivos, lo que ha tenido como resultado un mayor rendimiento en estudiantes universitarios y la posibilidad de desarrollo de nuevos algoritmos de control por parte de investigadores, lo que ha logrado mejorar en diseños originales de algunos robots industriales como es el caso del trabajo realizado por F. Vences, en el que al obtener la dinámica del robot manipulador PUMA 200 lograron la mejora del sistema al sustituir la unidad de control por una computadora personal y desarrollar un software controlador basado en la dinámica del sistema [7].

Por otro lado algunas de sus desventajas son su robustez, que generalmente no son diseñados para realizar trabajos en los que se requiera grandes esfuerzos y

su sensibilidad a modificaciones, ya que al permitir la modificación tanto de software como de hardware son más propensos a fallas en su funcionamiento [8] [9].

2.3.2.1. Arquitectura abierta ámbito académico

Este tipo de arquitectura es más comúnmente encontrada en trabajos de investigación como el realizado por J. Gómez, en el que realiza el diseño de arquitectura abierta tanto en software como en hardware de un robot manipulador industrial Stäubli RX60. El desarrollo del software es realizado al utilizar una plataforma en Simulink de Matlab, por el lado del hardware sensores de torque así como un acelerómetro son implementados en el manipulador. La lectura de los sensores se realiza por medio de una tarjeta de adquisición de datos conectada por medio del puerto PCI en una computadora industrial Pentium II @ 450MHz [10].

2.3.2.2. Arquitectura abierta ámbito comercial

Por el lado comercial se pueden encontrar kits de desarrollo como el Robix o Mindstorm de Lego que ofrecen una arquitectura abierta ciertamente limitada a algunos diseños y de poca robustez al ser de fines didácticos [20] [21].

2.4. Sensores y transductores

Se define como sensor a un dispositivo capaz de transformar variables físicas o químicas del medio y proporcionar una señal eléctrica de salida. Estas variables pueden ser mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas) [19].

Por otro lado, un transductor es un dispositivo capaz de convertir una variable física de entrada a una señal correspondiente de salida, pero de una variable física diferente, más adecuada para el sistema [19].

2.4.1. Sensores de desplazamiento

2.4.1.1. Potenciómetro

Los potenciómetros funcionan como divisores de tensión, dada una trayectoria conocida se puede estimar la posición en base la tensión medida. Esta es una opción económica, sin embargo, existen varias desventajas como problemas de fiabilidad por desgaste, trayectorias limitadas, precisión limitada. La Figura 2 muestra un potenciómetro [6].

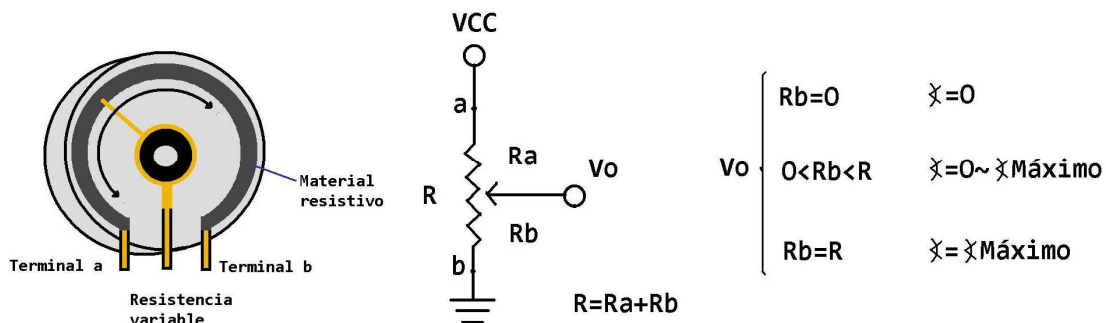


Figura 2. Potenciómetro.

2.4.1.2. Codificadores ópticos

Los codificadores ópticos consisten un disco o regleta ranurada colocados entre un diodo emisor y detector, la cual, al moverse proporcionan una señal al detector que puede traducirse como desplazamiento, este se encuentra limitado por la resolución del mismo, sin embargo existen métodos para ampliar su

resolución como el utilizado por Ju-Chan Kim, basado en interpolación de arco seno para incrementar su precisión [6] [11]. La figura 3 muestra el diagrama de un codificador óptico incremental con detección de giro, comúnmente encontrado en mouse de computadora, compuesto por su disco dentado, sus leds emisores y fototransistores receptores.

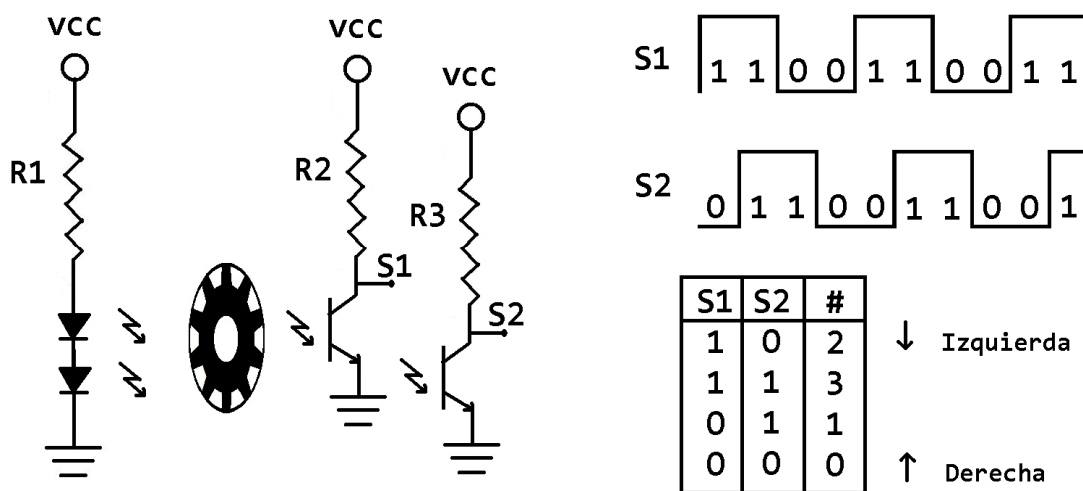


Figura 3. Codificador óptico incremental.

2.4.1.3. Resolvedores

Son utilizados para medir desplazamiento angular con resolución teóricamente infinita, su funcionamiento se basa en la interacción entre los devanados del rotor y dos del estator. El giro del devanado del rotor provoca que el acoplamiento de los devanados en el estator varíe, de lo que se obtienen dos señales senoidales desfasadas 90° entre ellas [1]. La figura 4 muestra el diagrama de un resolvedor.

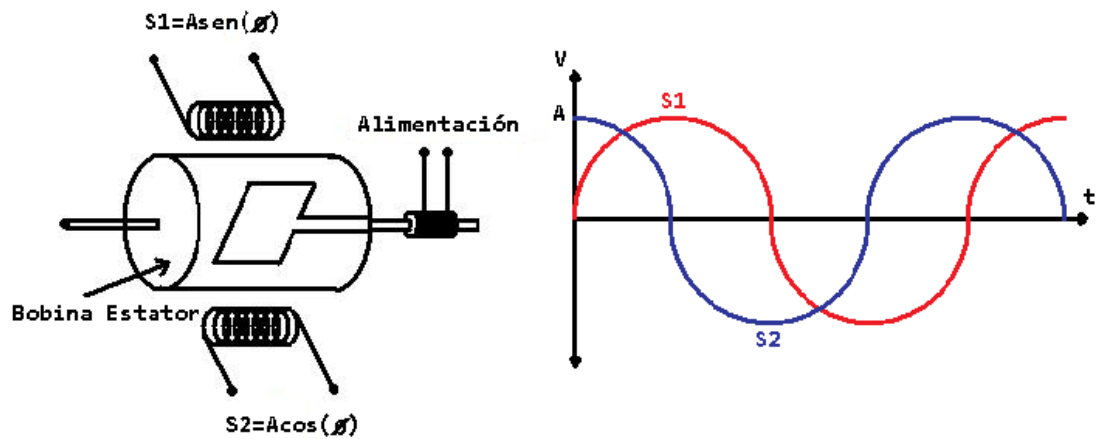


Figura 4. Resolvedor.

2.4.2. Sensores de proximidad

2.4.2.1. Interruptores

Sin duda los más simples pero comúnmente utilizados en actuadores lineales como finales de carrera. Básicamente este tipo de sensores proporciona un cambio en la señal de salida al generarse un contacto mecánico, la señal de salida será binaria [6]. La figura 5 siguiente muestra un interruptor o switch límite.

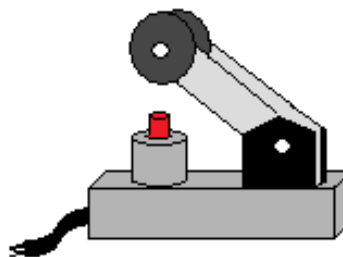


Figura 5. Switch límite.

2.4.2.2. Sensores inductivos

Comúnmente utilizados para la detección de objetos ferromagnéticos en este caso el contacto físico no es necesario. Su funcionamiento se basa en el cambio en la inductancia que provoca el objeto en cuestión al variar el campo magnético, su distancia de operación relativamente corta [6]. En la figura 6 se muestra un la estructura interna de un sensor inductivo y como el afectado el campo magnético.

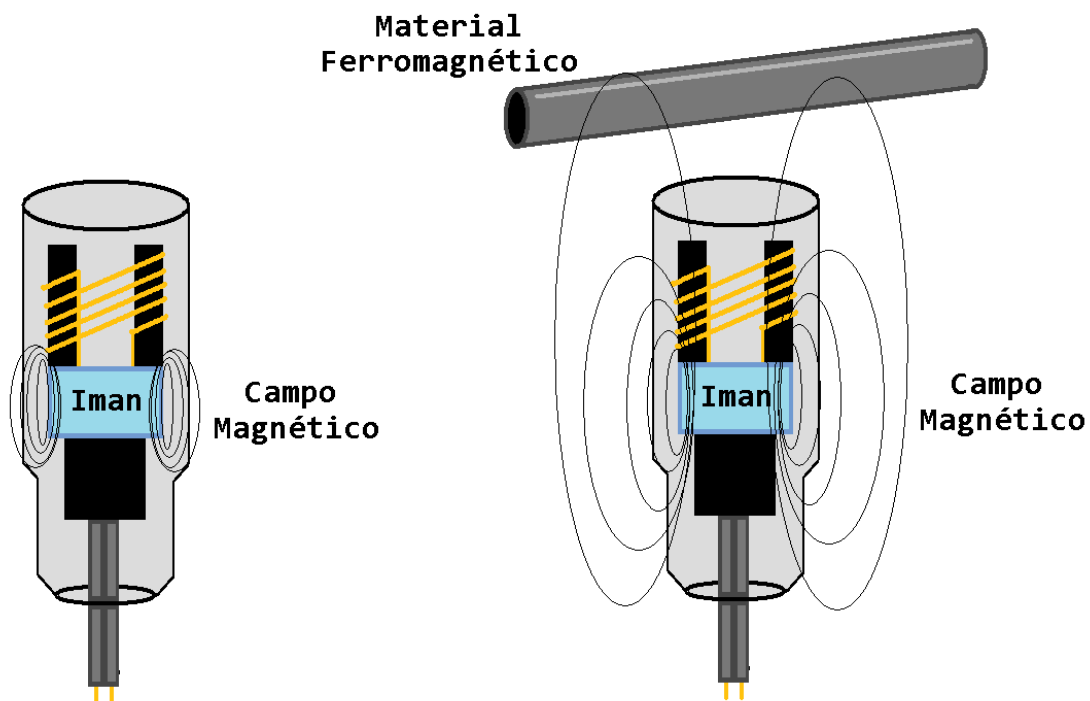


Figura 6. Sensor inductivo.

2.4.2.3. Sensores capacitivos

En el caso de objetos no ferromagnéticos pueden ser empleados este tipo de sensores. A diferencia de los sensores inductivos estos trabajan con cambios de capacitancia en una superficie, su distancia de operación es relativamente corta,

la variación de la capacitancia puede ser vista a través de un circuito oscilador [6]. La figura 7 muestra un sensor capacitivo y su utilización en un oscilador.

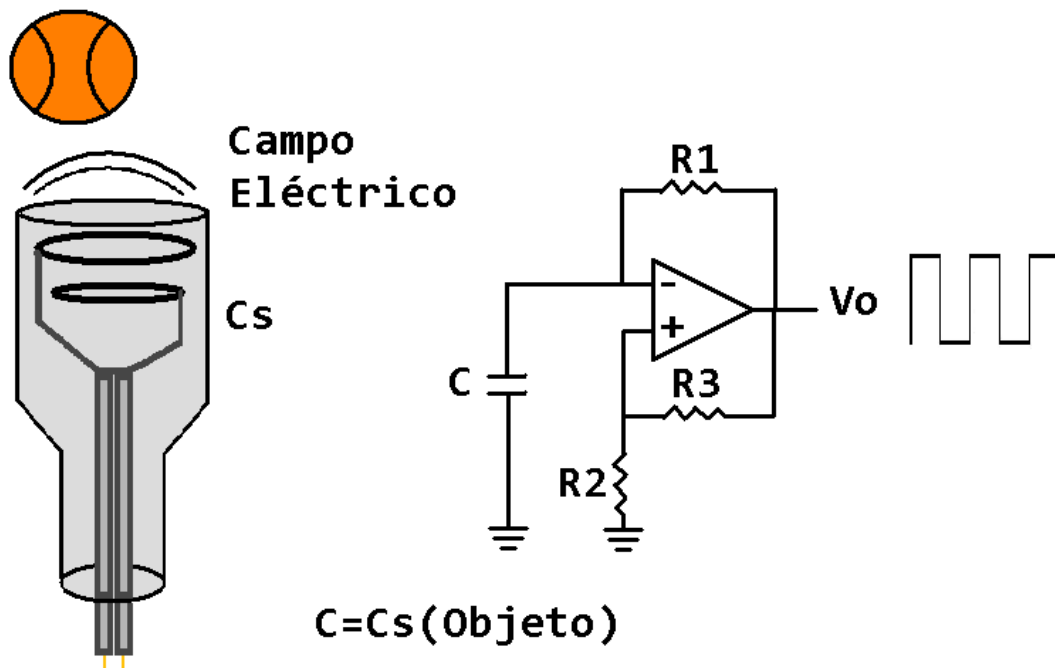


Figura 7. Sensor capacitivo.

2.4.2.4. Sensor de Efecto Hall

Este tipo de sensores se sirve del efecto hall al relacionar la corriente que fluye por un conductor o semiconductor con un campo magnético. La presencia de materiales ferromagnéticos debilita al campo magnético, lo que permite la detección de dicho objeto [6]. La Figura 8 muestra un sensor de efecto Hall.

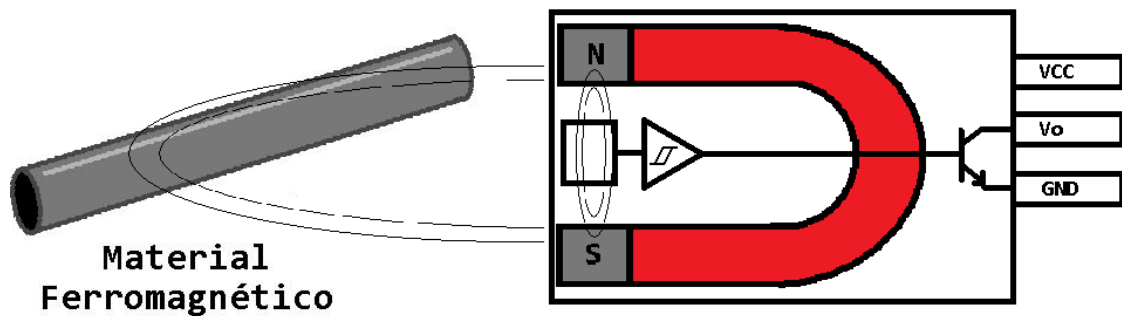


Figura 8. Sensor de efecto Hall.

Existen otras aplicaciones que se logran al utilizar otras configuraciones, como ejemplo se puede citar el artículo realizado por R. Wegener., que describe el trabajo realizado para la detección de posición y dirección de un actuador lineal basado en efecto hall, en el que se emplearon dos sensores de efecto hall, las señales de estos fueron acondicionadas al utilizar filtros para la entrada a un convertidor, para esto se consideró la amplitud, la fase y el rango, para evitar errores en la señal. Los resultados con este tipo de sensor brindan poca exactitud, al oscilar entre 200 μm y 1 mm, sin embargo existe numerosas aplicaciones en las que este rango de precisión no es crucial [12].

2.4.2.5. Sensores Ópticos

Un sensor ampliamente utilizado para la medición de proximidad y la detección de objetos, son los sensores ópticos que consiste básicamente de un diodo emisor de luz y un foto detector, que bien puede ser fototransistor, fotodiodo o fotoresistor. Existen varias configuraciones para este tipo de sensores como lo son tipo barrera, utilizada para detección de objetos, o de reflexión empleada para mediación de proximidad o detección [6]. En la figura 9 se muestran los componentes que conforman un sensor óptico.

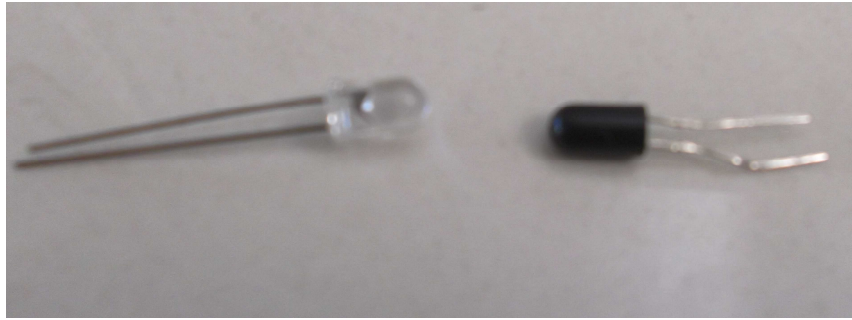


Figura 9. Diodo infrarrojo y fototransistor.

2.4.2.6. Sensores Ultrasónicos

El funcionamiento de estos sensores consiste en la emisión y detección de pulsos ultrasónicos, mediante el principio de tiempo de vuelo. Una señal de sonido es emitida y en base al tiempo transcurrido desde su emisor hasta su detección después de ser reflejada en algún objeto, es posible calcular la distancia conocida la velocidad de propagación del sonido. Cabe la posibilidad de errores de medición, al no ser consideradas irregularidades en las superficies de reflexión y temperatura [6]. La figura 10 muestra un sensor ultrasónico de proximidad.

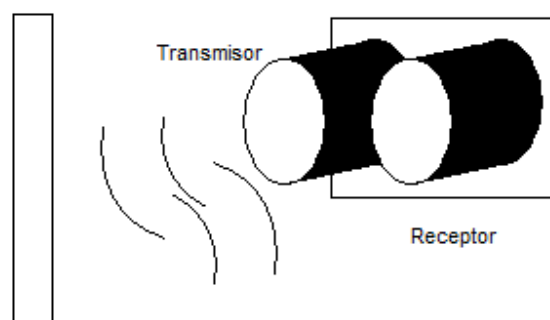


Figura 10. Sensor ultrasónico.

2.4.3. Sensores de tacto

Este tipo de sensores proveen al manipulador de cierta percepción al tacto. El sensor está constituido de una matriz de agujas las cuales pueden generar una señal de manera inductiva o por microcontacto. La figura 11 muestra un sensor de tacto [6].

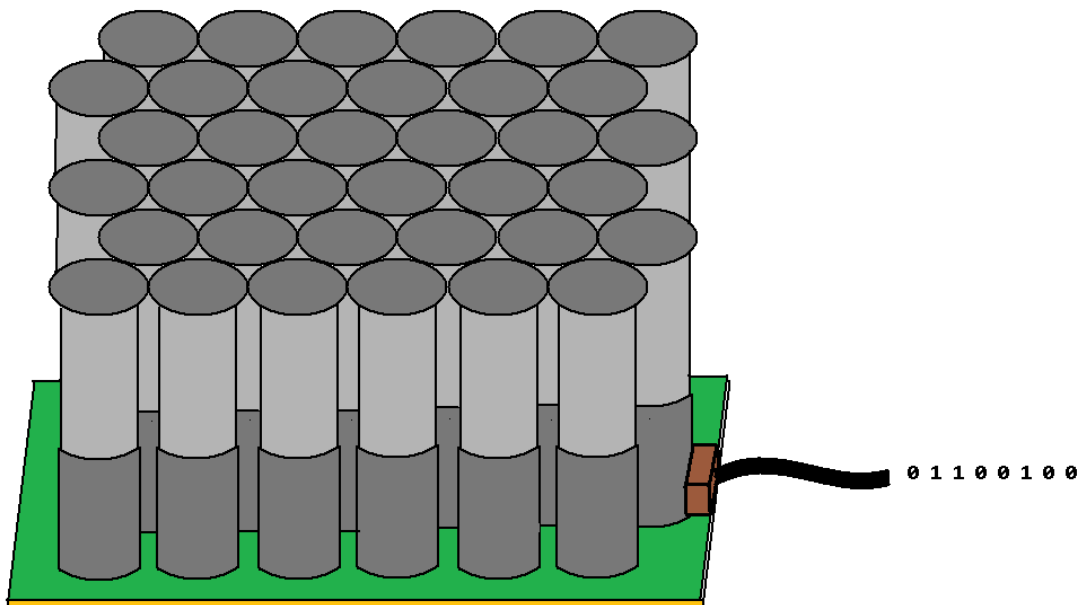


Figura 11. Sensor de tacto.

2.4.4. Sensores de fuerza

Sensores de fuerza o galgas extensiométrica, estos sensores se valen del efecto piezoeléctrico, la deformación del material provoca un cambio en las propiedades resistivas de este. Varios tipos de materiales son empleados para la fabricación del sensor, el material con el que está hecho determina la sensibilidad del sensor [6]. La figura 12 muestra una galga extensiométrica y la configuración de un circuito de wheatstone comúnmente usado para este tipo de sensores.

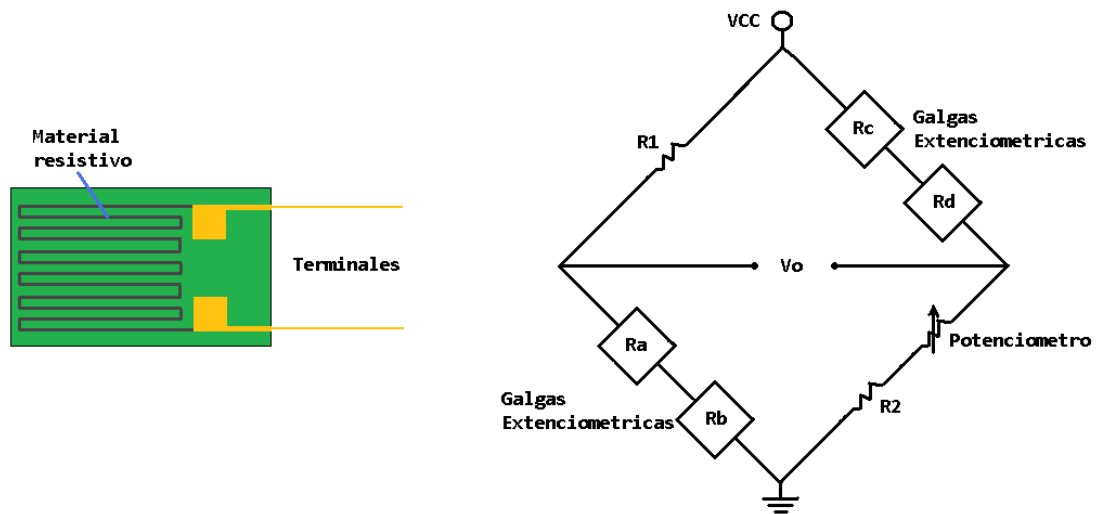


Figura 12. Galga extensiométrica.

2.5. Actuadores y servomecanismos de brazos manipuladores

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar la fuerza para accionar otro dispositivo mecánico. Por su movimiento estos se pueden ser lineales o rotativos. Según el tipo de energía empleado para su actuación se puede clasificar en eléctricos, hidráulicos y neumáticos. A continuación se presentará cada uno de estos actuadores, con énfasis en los actuadores eléctricos, por su importancia en el proyecto [13].

2.5.1. Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos utilizan fluidos como medio de presión para mover los pistones de los cilindros, estos pueden alcanzar velocidades de 0.5 rpm hasta 10,000 rpm y un par de 1 Nm hasta 20,000 Nm [13].

Este tipo de actuadores se utiliza ampliamente en maquinaria de construcción, excavadores, plataformas elevadoras, simuladores de vuelo entre otras [13].

Algunas de las ventajas de estos sistemas son su gran potencia con pequeños componentes, posicionamiento preciso, arranque con cargas pesadas, movimientos lineales independientemente de las cargas debido a las propiedades de los líquidos al ser casi incompresibles [13].

Por otro lado algunas de sus desventajas son riesgo de incendios en caso de fuga de aceite, sensibilidad a la suciedad, peligro presente debido a las grandes presiones que se manejan, dependencia de temperatura debido a los cambios de viscosidad [13]. En la figura 13 se muestra los componentes de un actuador hidráulico.

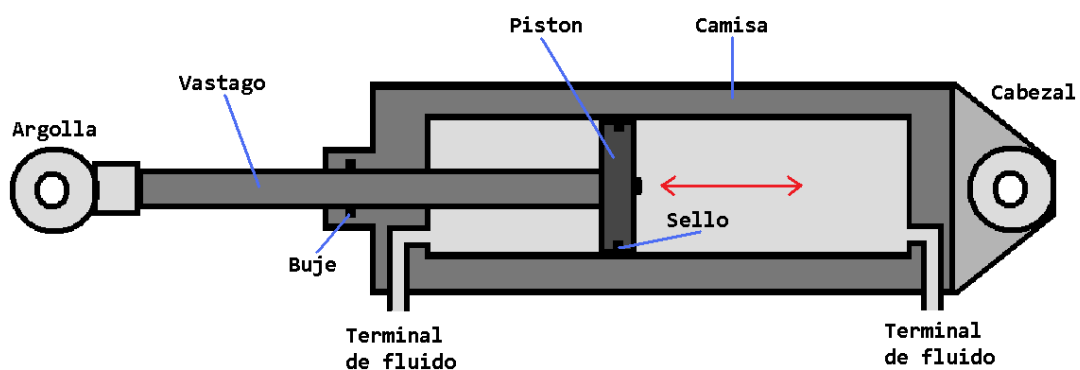


Figura 13. Actuadores hidráulico.

2.5.2. Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos son sistemas que emplea aire comprimido para su funcionamiento, son empleados en herramientas, posicionadores, martillos neumáticos, elevadores, herramientas de impacto, prensas neumáticas, robots industriales [13].

Ventajas en estos dispositivos, se pueden mencionar su bajo costo en componentes, facilidad de diseño e implementación, su bajo par o fuerza

generar con las bajas presiones con las que puede trabajar (6 bar típicamente), su seguridad [13].

De manera contraria algunas de sus desventajas son la imposibilidad de obtener una velocidad estable debido a las propiedades de compresión de aire, los costos elevados de la energía neumática y su rendimiento debido a posibles fugas [13]. En la figura 14 se muestra un actuador neumático.



Figura 14. Actuador neumático.

2.5.3. Actuadores eléctricos

Este tipo de actuadores son de accionamiento eléctrico que bien puede ser de corriente continua o corriente alterna [14].

Dada su sencillez y precisión, sin ignorar sus características de control el actuador eléctrico es el más utilizado en robots manipuladores [14]. Por su variedad pueden ser clasificados en tres grupos diferentes:

- Motores de corriente continua.
- Motores de corriente alterna.
- Motores a pasos.

2.5.3.1. Motores de corriente continua

Un motor de corriente continua es un dispositivo que convierte energía eléctrica, en este caso de corriente continua, en energía mecánica. Este también puede ser visto como un dínamo en operación inversa. Este tipo de motores pueden ser controlados por inducción o por excitación [14]. En la figura 15 se presenta auto de juguete con motor de corriente continua.



Figura 15. Auto de juguete con motor de corriente continua.

2.5.3.2. Motores de corriente alterna

Son dispositivos electromecánicos alimentados con corriente alterna. Hasta principios de la década pasada este tipo de motores no era común en aplicaciones de robótica debido a las complicaciones en el control, sin embargo los avances logrados en máquinas síncronas han hecho de este tipo de motores una opción muy conveniente en robots industriales, algunas de las razones son la construcción de motores síncronos sin escobillas, convertidores estáticos para variación de velocidad y el uso de microelectrónica para el control de los mismos [14] [1].

El control de este tipo de motores se basa en el manejo de la frecuencia de alimentación, un cambio de frecuencia se refleja en un cambio de velocidad [1]. La figura 16 muestra un motor de corriente alterna.



Figura 16. Motor de corriente alterna.

2.5.3.3. Motores a pasos

Este tipo de motores son dispositivos electromecánicos que convierten impulsos eléctricos en movimientos angulares discretos, algunas de sus características principales es la precisión y repetitividad, sin embargo su posicionamiento está limitado por la resolución del mismo [14]. La figura 17 muestra un motor a pasos.

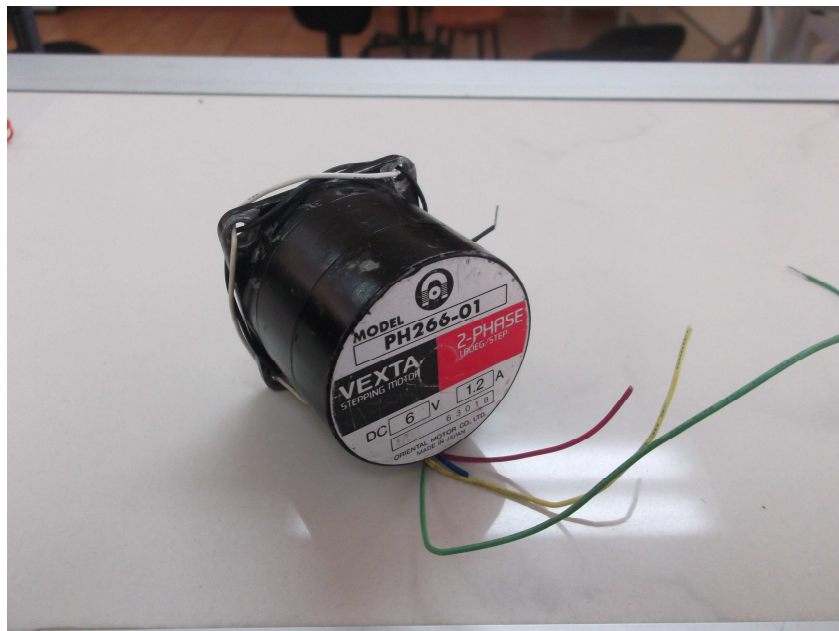


Figura 17. Motor a pasos.

2.5.3.4. Control de motores de inducción

El control de motores de inducción requiere establecer algunos principios básicos como lo son la asistencia de encendido, frenado y cambio de giro [15].

Los asistentes de encendido son empleados para reducir el sobre impulso que se genera al encender un motor, con el fin de garantizar que el motor no sufra daños y prolongar la vida del mismo [15]. Existen varios tipos de asistentes de encendido algunos de ellos se presentan a continuación:

- **Estrella Delta starting**

Consiste en un arreglo de interruptores que permiten el paso entre conexiones estrella y delta en el motor. El encendido se realiza en configuración estrella, el voltaje y corriente, es reducido casi a la mitad en comparación de la configuración delta, posteriormente es reconfigurado a delta [15]. La figura 18 muestra la configuración estrella-delta para encendido de motores de inducción.

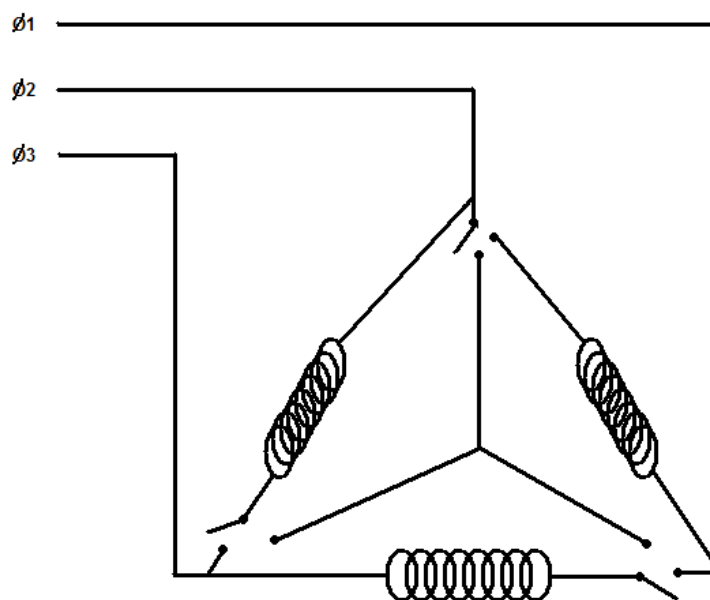


Figura 18. Configuración Estrella-Delta.

- **Autotransformer starting**

Consiste en un arreglo de transformadores cuyas conexiones son modificadas de manera secuencial para el encendido, de modo que el voltaje al encendido es reducido [15].

- **Impedance starting**

Consiste en un arreglo de impedancias conectadas en serie para reducir la corriente de encendido que posteriormente son sustituidas por cortos mediante interruptores [15].

- **Soft starting**

Este tipo de encendido consiste en interruptores basados en semiconductores, lo que se modifica la forma de onda del voltaje y corriente, de modo que los niveles de voltaje y corriente pueden ser reducidos para un menor impacto en los motores al encendido [15].

- **Frenado e inversión**

Existen varias maneras de frenar un motor eléctrico, de los que se puede mencionar el frenado dinámico, por control de frecuencia, por cambio de número de polos en el embobinado del estator, entre otros. Uno de los más simples es el frenado por conexión cuyo principio también es utilizado para el cambio de giro del motor [15].

El frenado por conexión, se realiza al cambiar la secuencia de fases en el suministro eléctrico, esto se logra al intercambiar la conexión de dos de las fases, lo que provoca un cambio en la orientación del campo magnético lo que causa que el motor gire en sentido opuesto, el motor debe ser desconectado antes de llegar a la velocidad cero. Uno de los inconvenientes en este frenado es el sobrecalentamiento debido a la energía cinética, por lo que debe ser utilizado con precaución [15].

Con lo anterior es posible realizar de numerosas aplicaciones, sin embargo, tiene sus desventajas y limitaciones desperdicio de energía, sensibilidad a

cambios de voltaje lo que genera una dependencia en la calidad del suministro eléctrico [15].

- **Control de velocidad**

Debido a que el cambio de velocidad requiere cambios de frecuencia en el suministro de alimentación, una conexión directa resultaría inútil, por lo que es necesaria la implementación de circuitos más complejos para la adecuación del suministro de alimentación en los motores [15].

Este tipo de circuitos consiste en arreglos de transistores, alimentados por un lazo de corriente continua, con los cuales es controlada la frecuencia de la señal de salida, esto permite realizar variaciones en velocidad, así como cambio de giro y frenado con tan solo modificar la señal de excitación en los transistores [15].

2.5.4. Servomecanismos

Este tipo de dispositivos electromecánico, capaz de autoregularse al detectar una diferencia entre su posición real y la deseada. Este tipo de mecanismos puede combinar elementos neumáticos e hidráulicos [1] [16].

Los servomecanismos son ampliamente utilizados en sistemas de realimentación de posición y velocidad, para la generación de señales de control en robots industriales, algunos son parte de sistemas de control más grandes para maximizar su funcionamiento, como caso particular se puede mencionar el trabajo realizado por S. Zurlu, en el que una red neuronal es diseñada y entrenada de acuerdo con el modelo matemático de un servomotor con lo que se logró una alta eficiencia, bajo ruido de operación, además de lograr

resultados de alta precisión en altas velocidades [1] [16]. La figura 19 presenta un servo mecanismo.



Figura 19. Servomotor.

2.6. Interfaces de brazos articulados manipuladores a la PC

Con este tipo de interfaz se habla de todo el hardware que interviene para la comunicación entre brazo manipulador y la computadora o mando de control. Existen poca variedad de interfaces empleadas en robots manipuladores comerciales, básicamente consiste en una caja de control la cual se encarga de recibir las señales de sensores así como de proporcionar la alimentación necesaria a las articulaciones del manipulador. La programación de las tareas se realiza por medio de un mando de control o bien al conectar a una computadora, una vez programadas las tareas, las trayectorias son almacenadas en la caja de control el cual posee un tablero con el cual se selecciona el programa a realizar, así como rutinas de inicialización [1] [17] [18].

Por otro lado se tienen interfaces realizadas por investigadores, en las que ofrecen el empleo de tecnologías como FPGAs, sistemas de reconocimiento de imágenes, entre otros para el control de movimiento [1] [17] [18].

2.7. Interfaz al usuario en la PC

Una de las principales características de los robots manipuladores, es la multifuncionalidad dada por la capacidad de reprogramación para la determinación de diferentes trayectorias o trabajos a realizar, se referirá como interfaz al usuario al software utilizado para la tarea de programación. Cada fabricante ofrece una alternativa diferente de programación, que pueden ser desde programas especializados como RAPID de ABB o V+ de Adept Tech, hasta el uso de herramientas como Matlab [1].

Este tipo de software permite al operador acceder a diferentes prestaciones del robot mismo, lo que tiene como resultado una estrecha relación entre las características del software y el robot en sí. En algunas ocasiones este tipo de software limitan algunas de las funciones de los manipuladores por lo que hay quienes optan por el uso de software de arquitectura abierta para el control de estos dispositivos [1].

2.7.1. RT Toolbox2 y MELFA WORKS

Mitsubishi por su parte ofrece un paquete de software con RT Toolbox2 y MELFA WORKS, para la programación de sus diferentes equipos, el cual proporciona un lenguaje basado en una estructura de frase, así como la posibilidad desarrollar simulaciones con las cuales puede someterse el equipo antes de ser programado. Una vez simulados los programas estos pueden ser transferidos vía red, puerto USB o serial [17].

Una ventaja más del RT Toolbox2 es la capacidad de supervisión y diagnóstico, así como la visualización de velocidad y corriente suministrada en los motores [17].

2.7.2. USA, 2010, “KCF: Una toolbox de MATLAB para control de movimiento de robots manipuladores KUKA”

F. Chinello, muestra en su trabajo la toolbox de MATLAB, KCF, desarrollada especialmente para robots manipuladores KUKA. El KCF es de fácil integración con otras herramientas de MATLAB y comparte las ventajas del KRL, KUKA robot lenguaje desarrollado por KUKA, agrega algunas mejoras como conexión TCP/IP, funciones dedicadas para gráficos y animaciones en 3D, así como una interfaz gráfica. Esta herramienta ha sido probada para el control de trayectoria en diferentes sistemas operativos con resultados exitosos [18].

2.8. Sumario

En la actualidad existen una gran variedad de robots manipuladores comerciales, dotados con diferentes cualidades según su diseño, este tipo de robots son robustos y sus niveles de exactitud son muy elevados, sin embargo el diseño mismo o las herramientas de programación que ofrecen estos resultan ser algunas limitantes si se desea realizar mejoras en el desempeño de trabajo de este, por lo que algunos investigadores se han dado a la tarea de diseñar o modificar robots manipuladores, de manera que estos ofrezcan una arquitectura abierta ya sea de software, hardware o ambos. Con lo que se ha logrado resultados favorables.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En el presente capítulo se describirán los elementos y herramientas empleadas para el desarrollo del proyecto, así como la metodología de los procedimientos realizados enfocados a cumplir los objetivos del mismo, análisis del sistema, pruebas y mediciones de laboratorio, ingeniería inversa para el diseño del driver de potencia, pruebas finales.

3.2. Equipos

3.2.1. Robot manipulador Mitsubishi Melfa RV-E2

El Mitsubishi RV-E2 es un robot manipulador de 6 grados de libertad tipo industrial capaz de realizar una amplia variedad de tareas industriales como manipulación de objetos o uso de herramientas. Este modelo puede alcanzar velocidades de 120°/s hasta 200°/s según su articulación. Algunas de sus características se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Características Mitsubishi RV-E2.

Características:	Descripción:
Gados de libertad.	6 articulaciones.
Carga útil.	2 Kg.
Repetividad.	±0.04 mm.
Peso.	37 kg.
Tipo de estructura.	Articulación vertical.
Tipo de montura.	Montura en piso.

La figura 20 muestra al brazo manipulador Mitsubishi RV-E2.



Figura 20. Robot manipulador Mitsubishi RV-E2.

3.2.2. Controlador Mitsubishi Melfa CR-E116

El Melfa CR-E116 es el controlador utilizado para el robot manipulador Mitsubishi Melfa RV-E2 entre otros de la misma compañía, este controlador es capaz de controlar hasta 6 ejes. La figura 21 presenta el controlador CR-E116 de Mitsubishi.



Figura 21. Controlador CR-E116 de Mitsubishi.

Para equipo de laboratorio véase apéndice A.

3.3. Elementos

3.3.1. FNB41560

El FNB41560 es un módulo inteligente de poder, consiste de un arreglo de transistores IGBT, que incluyen un circuito integrado de control para el manejo de compuertas y protección de los transistores. El FNB41560 es capaz de manejar voltajes de salida de 600 V y una corriente de hasta 15 A, con una interfaz de entrada compatible 3.3/5 V CMOS. La figura 22 presenta al circuito integrado FNB41560.

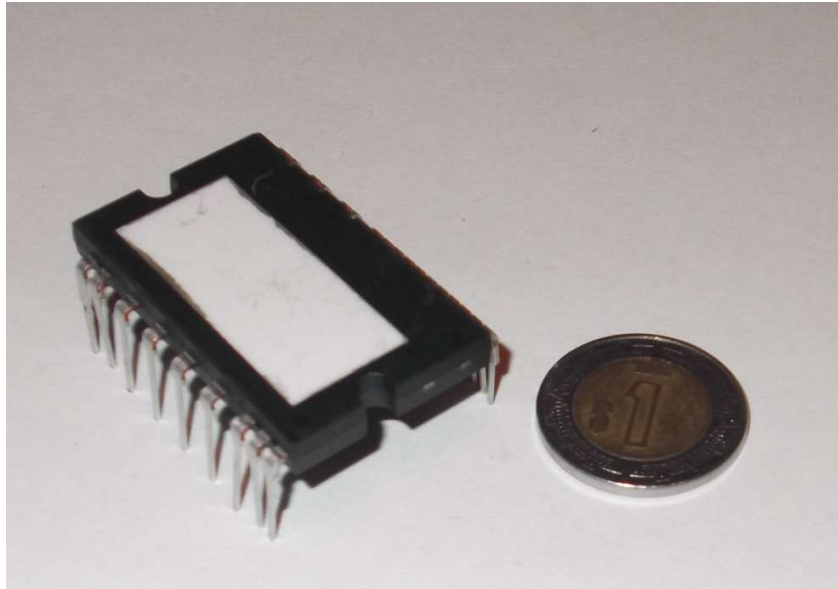


Figura 22. Circuito integrado FNB41560.

3.3.2. M5229demokit

El M52259DEMOKIT es un kit de desarrollo basado en la familia mcf5225X de microcontroladores de Freescale, el kit incluye dos tarjetas, M52259DEMOMCU con el microcontrolador, puertos para su programación y comunicación con una memoria externa, M52259DEMOCOM una expansión para puertos de comunicación como Ethernet 10/100, RS-232. Además incluye el CodeWarrior de Freescale, como plataforma de desarrollo y programación. La figura 23 muestra las dos tarjetas del M52259DEMOKIT conectadas.



Figura 23. Tarjetas M52259DEMOKIT.

3.3.3. CodeWarrior Development Studio

CodeWarrior Development Studio es entorno de desarrollo integrado, diseñado para la programación de microcontroladores de Freescale, esta plataforma proporciona un amplio marco visual y diversas herramientas, para acelerar el desarrollo de aplicaciones. La figura 24 presenta la ventana del CodeWarrior Development Studio.

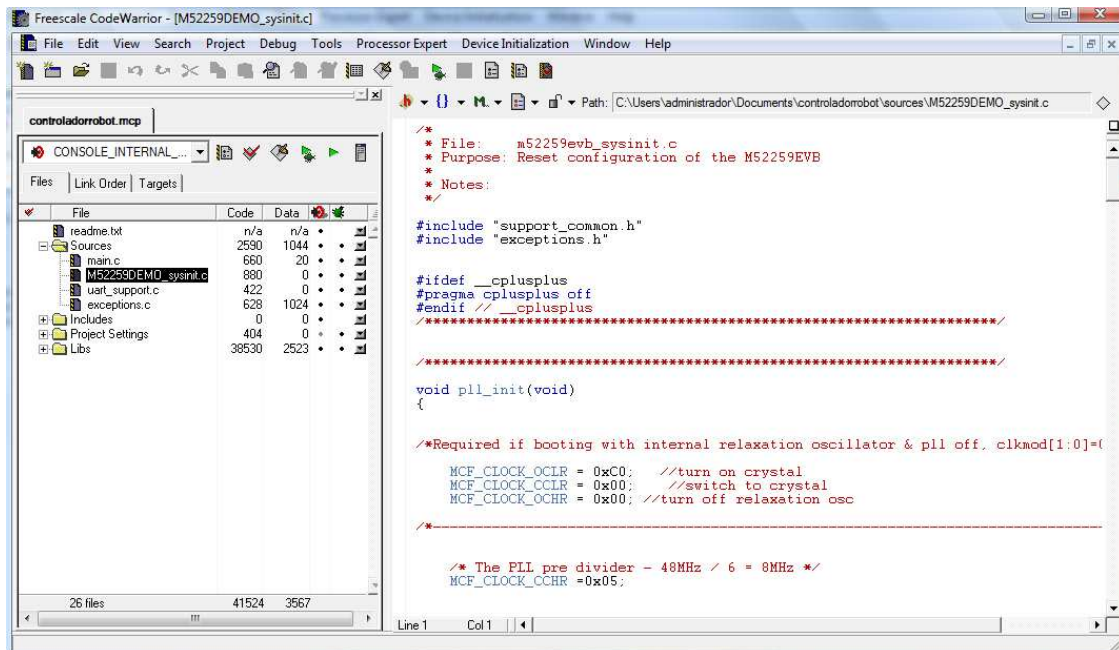


Figura 24. Ventana del CodeWarrior Development Studio.

3.4. Procedimientos

3.4.1. Análisis del sistema

Se inició con la búsqueda y análisis de la documentación de las unidades que conforman el sistema del robot manipulador, así como con la inspección y evaluación física para determinar el estado de las mismas, esto para el fin de determinar los elementos útiles para la modificación a una arquitectura abierta.

3.4.1.1. Robot manipulador

Para su análisis se revisó la documentación del fabricante de la cual se pudieron obtener algunos datos de conectores, así como un esquemático de la posición de la tornillería de las cubiertas. Como paso siguiente se desensambló la unidad con el fin de analizar los elementos internos que la componen, como motores y

sensores. La figura 25 muestra al robot manipulador con las cubiertas removidas.



Figura 25. Robot manipulador, vista interna.

De lo anterior obtuvo que el robot manipulador está constituido de dos tipos motores de AC, uno para las tres articulaciones inferiores y otro de tamaño más pequeño para las tres articulaciones superiores. La tabla 4 muestra una relación de información en las placas del los motores.

Tabla 4. Características motores.

Motores	# parte	Watts (W)	Volts (V)	Amperes (A)	R.P.M.	Clasificación	Peso (Kg)
M1, M2, M3	DTBL B5010B	80	100	2.4	2000	Continuo	1.4
M4, M5, M6	DTBL 2714 ^a	40	100	0.74	3000	Continuo	0.64

Por otro lado los motores cuentan con una sola clase de encoder como sensores de posicionamiento, este es de tipo absoluto. En la figura 26 se puede apreciar una de las articulaciones del robot manipulador.

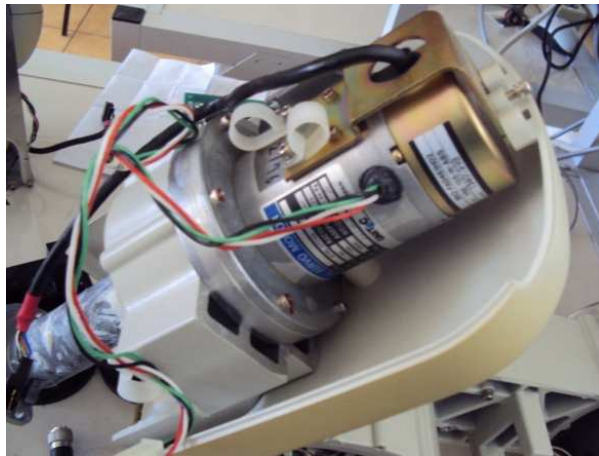


Figura 26. Motor de CA con codificador absoluto integrado.

Posteriormente se realizó una búsqueda de los números de parte de estos componentes con el fin de obtener información de su modo de operación, sin embargo, no fue posible obtener información adicional del fabricante, al parecer son datos reservados para los fabricantes de la unidad manipuladora.

3.4.1.2. Unidad de control

Del mismo modo se realizó una revisión de la documentación del fabricante para la operación de la unidad controladora, con lo que se procedió al encendido de dicha unidad, sin respuesta para la inicialización.

Posteriormente se le dio mantenimiento a la unidad al desensamblar y limpiar los elementos de esta, con lo que se pudo observar que el cable correspondiente a la tierra en la alimentación de la unidad se encontraba desconectado. Al terminar con el mantenimiento se intentó encender la unidad, sin respuesta nuevamente. Se observó que el display del panel frontal presentaba poca iluminación y algunos botones no encendían, por otro lado una serie de leds de error se

encendieron en la parte interna de la unidad de control. En la figura 27 se muestra los leds de error dentro de la unidad de control.

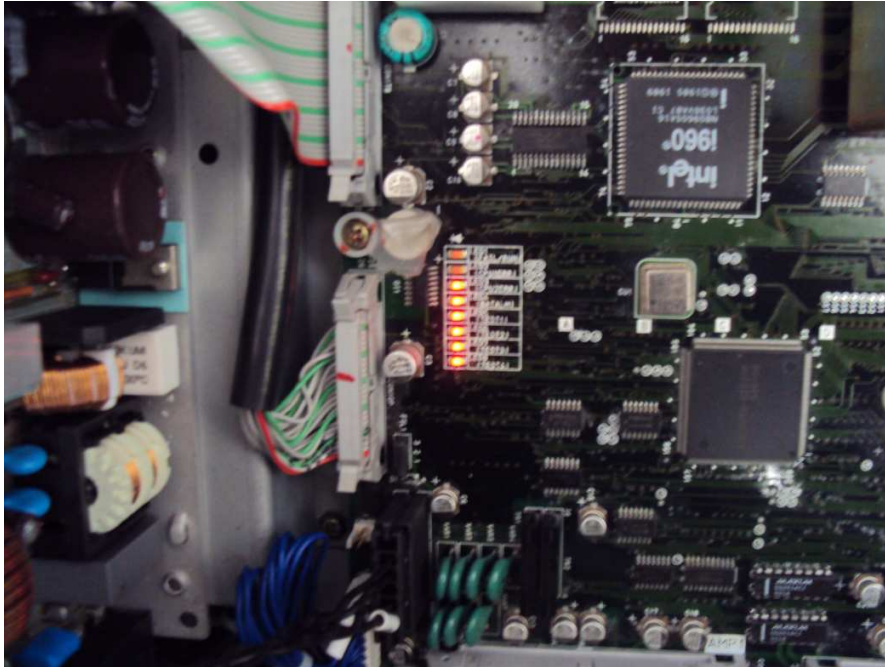


Figura 27. Leds de error en unidad de control.

Nuevamente se revisó la documentación en búsqueda de información acerca de el comportamiento de la unidad, sin embargo no se encontró nada acerca de este tipo de errores. Posteriormente se intentó contactar directamente al fabricante, de quienes no se consiguió respuesta alguna. Por otro lado fue posible comunicarse con el representante de Mitsubishi en la zona, sin embargo los resultados no fueron alentadores, no fue posible conseguir información adicional al ser una unidad descontinuada.

Se realizaron búsquedas en foros de robótica, donde se encontró un caso similar con problemas de inicialización en el cual explicaba una serie de pasos para un método de reset de memoria, con el cual se resolverían los problemas de inicialización, con lo que se procedió a realizar el reset, sin embargo no fue

posible la aplicación de dicho método pues se requería el uso de los botones del panel frontal de la unidad los cuales no respondían.

Sin la posibilidad del método de reset ya mencionado se buscó la manera de realizar un reset directamente, con lo que se procedió a ubicar el integrado de memoria en la motherboard, posteriormente se busco información de este para reiniciarlo, de esta manera se procedió a realizar el reset, con resultados positivos, al lograr que el display frontal iluminara de manera correcta y se apagaron un par de leds de error, sin embargo algunos leds de error continuaron encendidos y los problemas de inicialización persistieron. La figura 28 muestra el panel frontal de la unidad de control, los botones start, stop y reset no encienden.



Figura 28. Panel frontal de unidad de control.

3.4.2. Pruebas de laboratorio

Dados los resultados en el análisis de las unidades se determinó el trabajar con los módulos de potencia así como las fuentes de alimentación de la caja de control por lo que se realizó un análisis más a detalle del módulo de potencia así como una serie de pruebas con la finalidad de rescatar este módulo para la arquitectura abierta del manipulador a continuación se presentan las pruebas realizadas.

3.4.2.1. Módulo de potencia

La primera tarea a realizar fue la obtención del esquemático, búsqueda de componentes y análisis a detalle de los mismos, con la misión de obtener información, de las señales de entrada y salida del módulo. La figura 29 muestra el módulo de potencia de la unidad de control.



Figura 29. Módulo de potencia.

Uno de los componentes más relevantes en este módulo fue el IR2130, su hoja de datos lo describe como un puente controlador de fases, este tiene la

capacidad de manejar hasta 6 señales de bajo voltaje como entrada y proporcionar señales de salida para la activación de MOSFET's o IGBT's que operen voltajes de hasta 600 V. También se revisó la hoja de aplicación del IR2130, de la cual se observó que la configuraciones propuestas, no concordaban con la configuración empleada en el módulo de potencia. Sin embargo, con la obtención del esquemático y las hojas de datos de los componentes se logró determinar la alimentación correspondiente a algunos de los pines del conector motherboard-módulo de potencia.

Por otro lado se realizó la medición de las señales de salida de la motherboard al módulo de potencia con lo que apoyados en algunos de los componentes de la motherboard se lograron obtener la mayoría de las señales faltantes correspondientes al conector del módulo de potencia. Se pudo determinar que la alimentación de los integrados así como de las señales de control provienen de la motherboard. En el caso de los transistores, su polarización se realiza desde la tarjeta de alimentación del la caja de control.

En base a lo anterior se decidió probar el módulo de potencia, para esto se realizo un circuito de prueba basado en una aplicación para el IR2130. La figura 30 muestra en circuito empleado para probar el módulo de potencia.

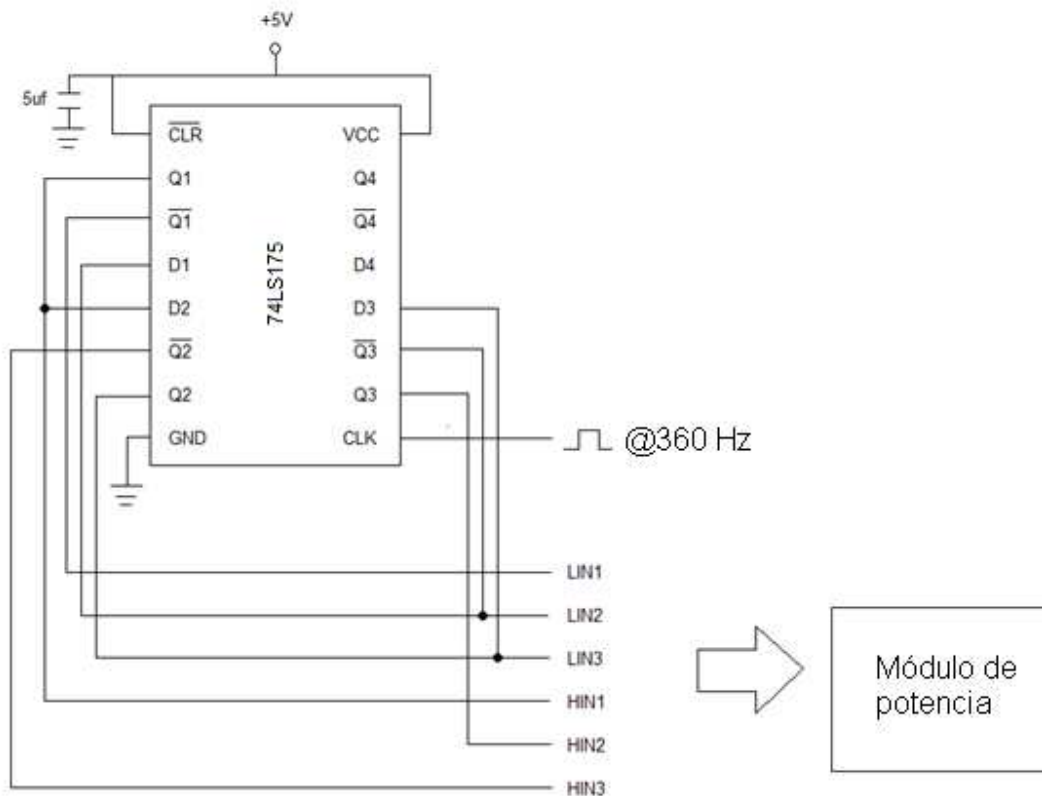


Figura 30. Circuito divisor de frecuencia.

Este circuito consiste en un Flip-Flop como divisor de frecuencia que proporciona tres señales cuadradas @60 Hz desfasadas entre ellas 120° y otras tres señales que corresponden a la inversión de las anteriores. La figura 31 se muestra la señal de salida del circuito de prueba.



Figura 31. Señales de salida circuito divisor de frecuencia.

Se realizaron las conexiones entre la motherboard y el módulo de potencia con excepción de los pines correspondientes a las entradas del IR2130 en el módulo de potencia, estas entradas fueron sustituidas por las señales del circuito de prueba. La figura 32 muestra un bosquejo de la unidad de control y donde fue colocado el circuito de prueba.

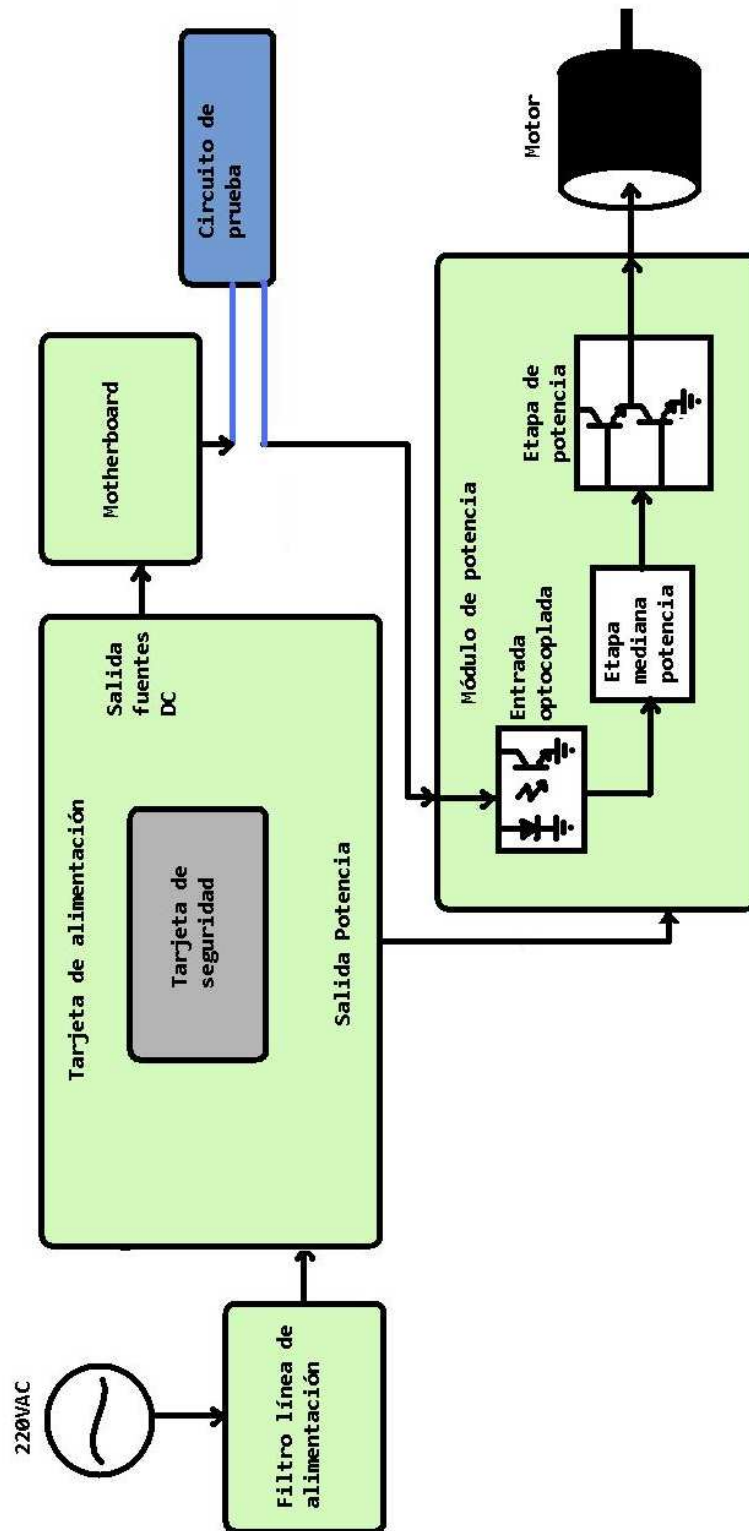


Figura 32. Bosquejo unidad de control, circuito de prueba.

Posteriormente se encendió y probó, sin embargo no se produjo respuesta. Al realizar un seguimiento de las señales se logró observar una caída en el nivel voltaje a la salida del circuito de prueba, por lo que fue agregado un buffer para reforzar las señales. Con lo que se logró que las señales llegaran adecuadamente al módulo de potencia. Se continuó con el seguimiento de señales hasta llegar a los transistores de la etapa de potencia, donde no se produjo señal de salida hacia los motores. El mismo comportamiento presentaron los módulos de potencia adyacentes de la caja de control, después de una serie de pruebas y monitoreo de las señales se observó que los transistores no presentaba voltaje de alimentación, por lo que se procedió a realizar un análisis en la tarjeta que suministra la alimentación a estos.

Durante el proceso de análisis se descubrió un sistema de seguridad de la tarjeta de alimentación, el cual deshabilitaba un par de relevadores que cortan el suministro de alimentación hacia los transistores. Posteriormente se descubrió la conexión a tierra del osciloscopio producía efectos en el sistema de seguridad de la tarjeta de alimentación, por consiguiente provocaba el paro en la alimentación de los transistores, dicho instrumento siempre estuvo conectado para el monitoreo de señales del módulo de potencia.

Al continuar con las pruebas, el módulo de potencia fue alimentado directamente con lo que se obtuvo señales de salida para los motores, sin embargo estas no eran acordes a las señales con desfase esperadas, las señales de salida eran semejantes a la alimentación de los transistores. Por lo que aparentemente los transistores no funcionan correctamente, ya que estos se encontraban en conducción, sin responder a las señales de activación en las compuertas de los mismos.

3.4.2.2. Tarjeta de alimentación

Esta tarjeta posee varias fuentes de alimentación de DC, dentro de las cuales una proporciona un lazo de DC para la etapa de potencia de los motores. El análisis de esta tarjeta fue requerido debido a la ausencia de voltaje de alimentación en los transistores del módulo de potencia al utilizar el circuito de prueba.

La tarjeta presentaba un par de módulos de relevadores conectados en serie, de los que se pudo observar que la activación de estos permitiría que la tarjeta proporcionara alimentación a la etapa de potencia de los motores. Al buscar algún tipo de falla en la activación de estos relevadores, se realizó un seguimiento de las señales que activan las bobinas de estos. De lo que se obtuvo, que las bobinas son activadas por unos transistores y estos a su vez una señal digital proveniente de una pequeña tarjeta adyacente a la tarjeta de alimentación.

Esta pequeña tarjeta, está compuesta de una serie de compuertas y un circuito integrado de monitoreo de voltajes. Al revisar la hojas de datos del integrado se determinó su funcionamiento, este monitorea hasta tres señales de DC y una de AC si alguno de los voltajes que está monitoreado presenta anomalías, el integrado envía una señal que bien puede ser utilizada para activar o desactivar algún otro dispositivo o bien como alarma, por lo que fue fácil deducir que esta tarjeta estaba encargada de realizar tareas de seguridad.

De lo anterior se pudo suponer que la ausencia de voltaje de alimentación en la etapa de potencia de los motores fue debido a una irregularidad en alguno de los voltajes monitoreados por este circuito. Sin embargo no fue posible determinar la falla con exactitud debido a las señales monitoreadas provenían de una serie de compuertas y estas a su vez de la motherboard donde resulta imposible el seguimiento de estas sin conocimiento del diseño de la motherboard. Al buscar

la manera de continuar con las pruebas de decidió activar directamente los relevadores por medio de una fuente externa sin embargo esto ya no fue necesario al encontrar lo que provocaba el paro de alimentación. La figura 33 muestra la tarjeta de alimentación en unidad de control.

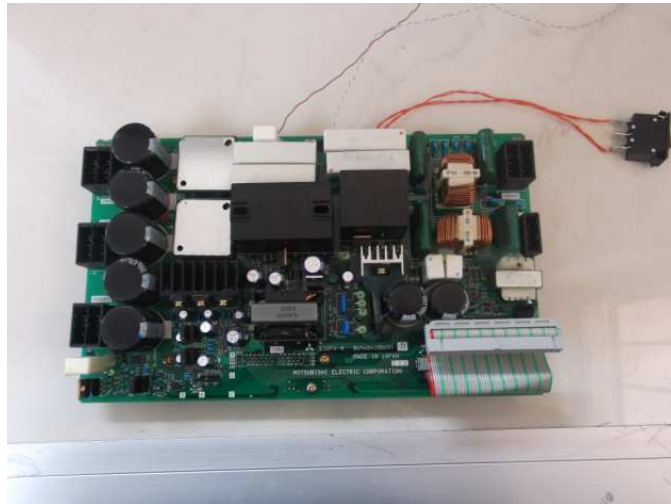


Figura 33. Tarjeta de alimentación en unidad de control.

3.4.2.3. Motores

Durante el análisis inicial de la unidad se determinó que los motores del robot manipulador eran de AC, sin embargo no fue posible obtener hojas de datos de los mismos, por lo que para determinar su funcionamiento se procedió a desensamblar el motor así como la realización de algunas pruebas de alimentación.

Al desarmar uno de los motores se pudo observar el cable color verde correspondiente al neutro sujeto a la tapa del motor, así como tres embobinados alternados en el estator, cada uno correspondientes a los cables negro, blanco y rojo, del conector del motor. Las figuras 34 muestran la parte interna correspondiente al estator de uno de los motores.



Figura 34. Embobinado del estator de motor de AC trifásico.

Por otro lado se observo que el rotor corresponde a un motor de inducción jaula de ardilla. La figura 35 muestra la parte interna del motor correspondiente al rotor.



Figura 35. Rotor de motor AC trifásico.

Posteriormente se realizaron las pruebas correspondientes a la alimentación del motor para verificar su funcionamiento y cambio de giro en la rotación en base a la información obtenida referente al motor.

Durante los análisis anteriores con el módulo de potencia se obtuvo que el voltaje con el que estos motores eran alimentados por 40 VAC, por lo que se

procedió a realizar un arreglo de transformadores para obtener un voltaje similar a partir de la alimentación trifásica del laboratorio, de 120 VAC a 30 VAC. La figura 36 muestra un arreglo de transformadores en configuración estrella-estrella para la reducción de voltaje de una instalación trifásica.

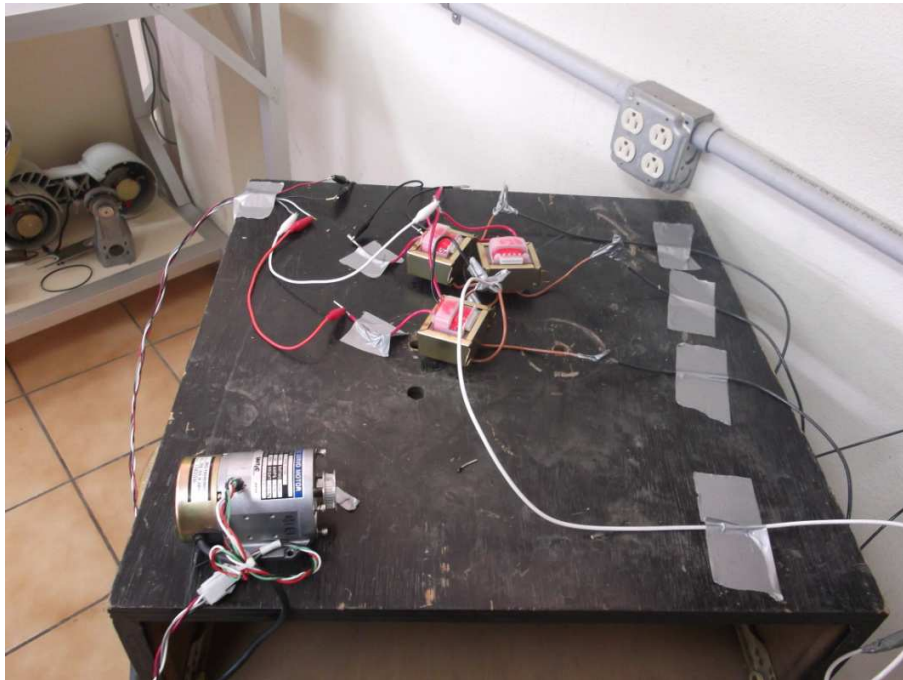


Figura 36. Arreglo estrella-estrella de transformadores para reducción de voltaje.

Verificados los voltajes de salida de los transformadores se procedió a alimentar el motor con lo que este comenzó a girar. Al invertir dos de sus fases el giro del motor cambió en sentido opuesto con lo que se obtuvieron los resultados esperados.

3.4.2.4. Diseño Nuevo Módulo de potencia

Debido a que el arreglo de transistores del módulo de potencia original se encontró dañado y la dificultad de conseguir un repuesto del mismo, se optó por realizar un nuevo diseño del módulo basado en el original.

Se realizó una búsqueda en el mercado de arreglos de transistores IGBT de acuerdo a las especificaciones de los transistores originales, con lo que se seleccionó FNB41560, un nuevo modelo de arreglo de transistores IGBT, en el cual incluye un circuito integrado para el manejo de compuertas y la protección de los transistores.

Posteriormente se tomó de base el circuito propuesto en las hojas de datos y se modificaron algunos componentes de acuerdo con los valores disponibles en el mercado local, además se agregó un puente de diodos y un capacitor para poder suministrar AC. La figura 37 muestra el circuito implementado para como módulo de potencia.

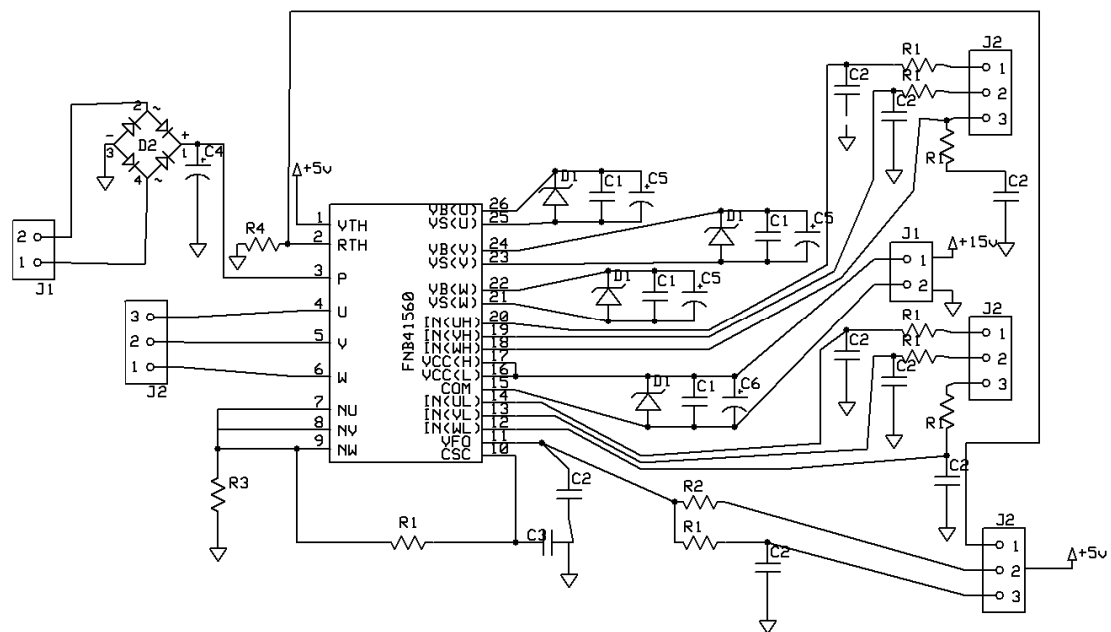


Figura 37. Circuito implementado para como módulo de potencia.

La lista de componentes utilizados en el circuito anterior se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Lista de materiales driver de potencia.

Componente:	Descripción:
R1.	Resistencia 100 Ohms, 1/4 W.
R2.	Resistencia 4700 Ohms, 1/4 W.
R3.	Resistencia 0.01 Ohms, 1/4 W.
R4.	Resistencia 6800 Ohms, 1/4 W.
C1.	Capacitor 0.1 μ F, 50 V.
C2.	Capacitor 0.001 μ F, 50 V.
C3.	Capacitor 0.022 μ F, 50 V.
C4.	Capacitor 220 μ F, 200 V.
C5.	Capacitor 33 μ F, 25 V.
C6.	Capacitor 220 μ F, 25 V.
D1.	1N4749: Diodo Zener, 25 V.
D2.	Puente de Diodos, 200 V, 4 A.
FNB41560.	Módulo de transistores IGBT, 600 V, 15 A.
J1	Terminal con 2 tornillos, TRT-02.
J2	Terminal con 3 tornillos, TRT-03.

Con lo que se implementó el nuevo módulo de potencia, el mismo fue probado gradualmente por etapas, se inició con una polarización de bajo voltaje en los transistores y en la entrada de señales de control, para monitorear su respuesta a la salida, finalmente se polarizaron los transistores con un voltaje similar al suministrado originalmente por la caja de control del robot. La figura 38 muestra la instalación completa de módulo de potencia para la operación del motor.

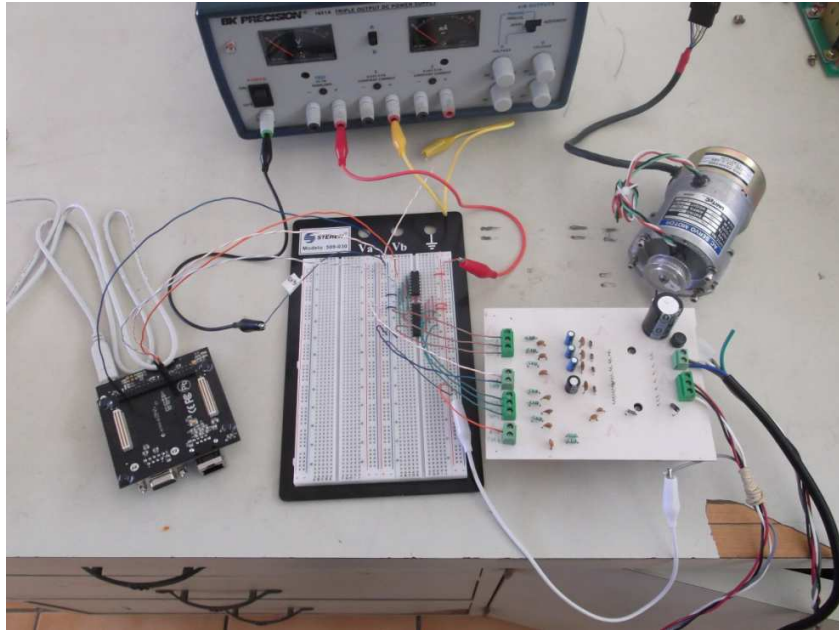


Figura 38. Operación de módulo de potencia con microcontrolador.

3.4.2.5. Programación Microcontrolador

Para la activación y prueba del driver de potencia fue necesario la programación de un microcontrolador. El programa debería generar las tres señales base para el control de driver de potencia, estas señales serían señales cuadradas desfasadas 120° entre ellas. El programa además debería poder modificar la frecuencia de estas señales, para un cambio de velocidad en el giro del motor, a mayor frecuencia mayor velocidad. Para el sentido de giro, se requeriría intercambiar la salida de dos de las señales generadas. La figura 39 muestra el diagrama de flujo del programa realizado.

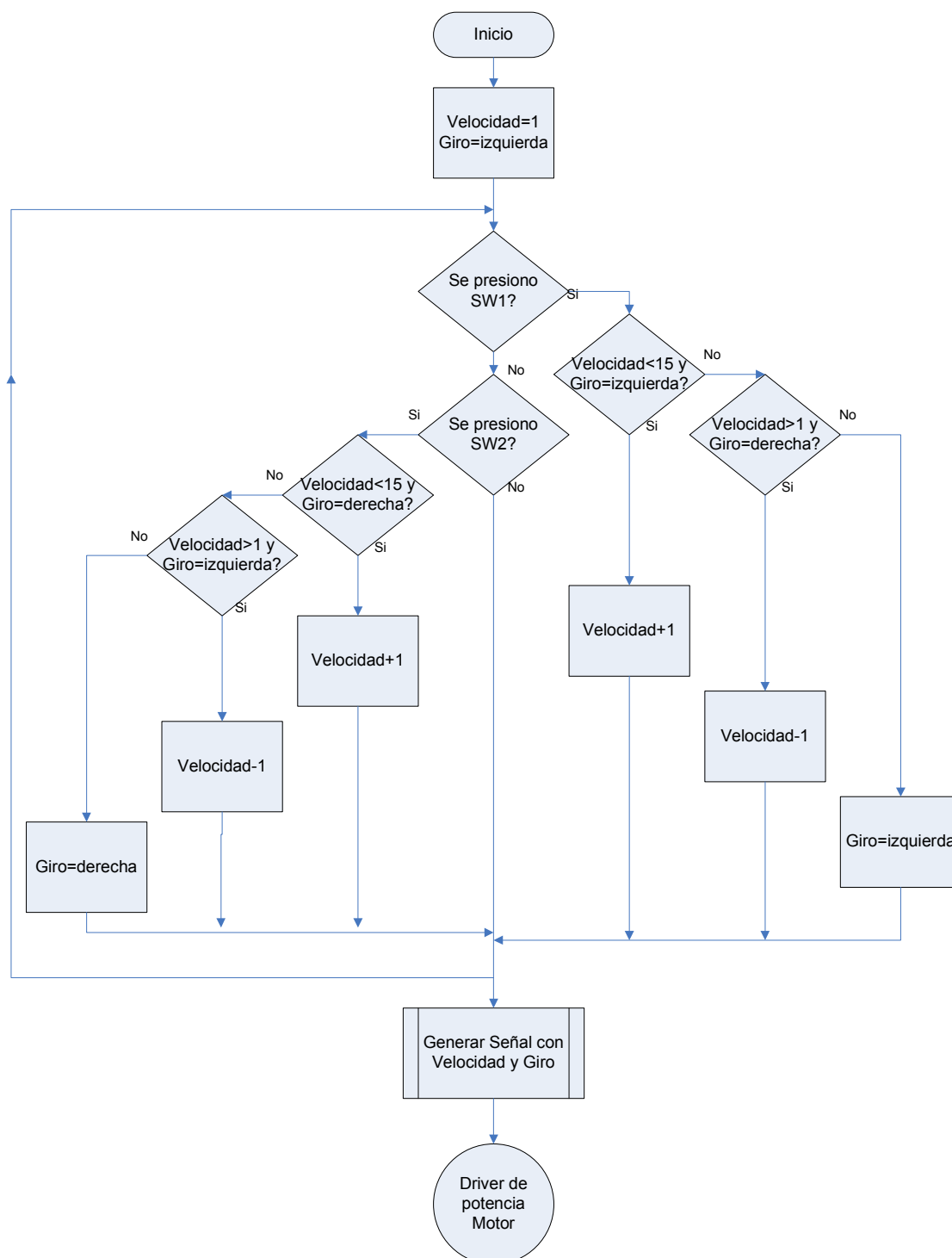


Figura 39. Diagrama de flujo del programa.

El programa comienza con la configuración de los puertos del microcontrolador así como la declaración e inicialización de las variables que se utilizarán. Su

estructura consiste en un ciclo anidado que puede ser seccionado en dos partes, la primera posee una serie de condiciones basadas en la activación de los botones SW1 y SW2, del microcontrolador y el estado de las variables del programa, *Sentido_giro* y *Velocidad_giro*, estas condiciones determinan las propiedades de la señal de salida para el sentido de giro y velocidad del motor. La segunda parte del conciste en las funciones que hacen posible la generación de las señales de salida, *acción_salida()* y *cpu_pause()*. *acción_salida()* es la función encargada de la secuencia de la señal de salida, está conformada de secuencias, según sea el sentido de giro del motor y está determinado por la variable *Sentido_giro*. La función *cpu_pause()* se encarga de generar un retardo entre los estados en las señales de salida del microcontrolador, controlada de este modo la frecuencia de la señal de salida, por consiguiente la velocidad de giro del motor.

La variable *Velocidad_giro* puede tener valores entre 1 y 15, con velocidades ya asignadas entre 4 Hz y 60 Hz. En caso de llegar al valor de 15 la variable *Velocidad_giro* ya no puede ser incrementada y el programa continua sin cambio alguno. En el caso de llegar al valor 1 el valor de este ya no puede ser decrementado sin embargo se realiza un cambio en la variable *Sentido_giro* lo que provoca un cambio en las señales para generar un cambio de giro en el motor.

En el apéndice se presenta el programa realizado para la operación del motor.

3.4.2.6. Tarjeta de comunicación

Se diseñó e implementó una tarjeta para la comunicación entre microcontrolador y el driver de potencia. El trabajo de esta tarjeta es proporcionar protección entre los dispositivos por medio de buffers además de generar las señales complementarias para el driver de potencia, a partir de las tres señales base

generadas por el microcontrolador. La figura 40 muestra la tarjeta implementada para la comunicación entre el microcontrolador y el driver de potencia.

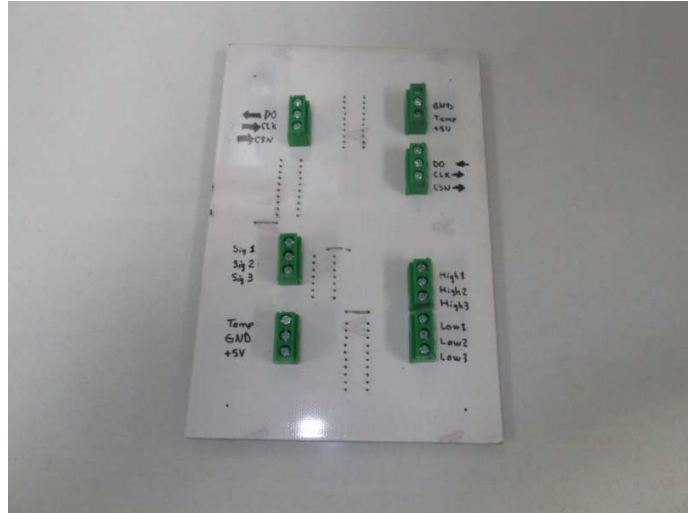


Figura 40. Tarjeta de comunicación.

3.4.2.7. Prueba de driver de potencia

Una vez implementados el módulo de potencia, la tarjeta de comunicación e implementado el programa para la operación del motor, se realizaron algunas pruebas para observar el comportamiento de este. Se conectó el sistema completo con resistencia de carga para monitorear la señal de salida. En la figura 41 se muestra la conexión del módulo de potencia, la tarjeta de comunicación y el microcontrolador.

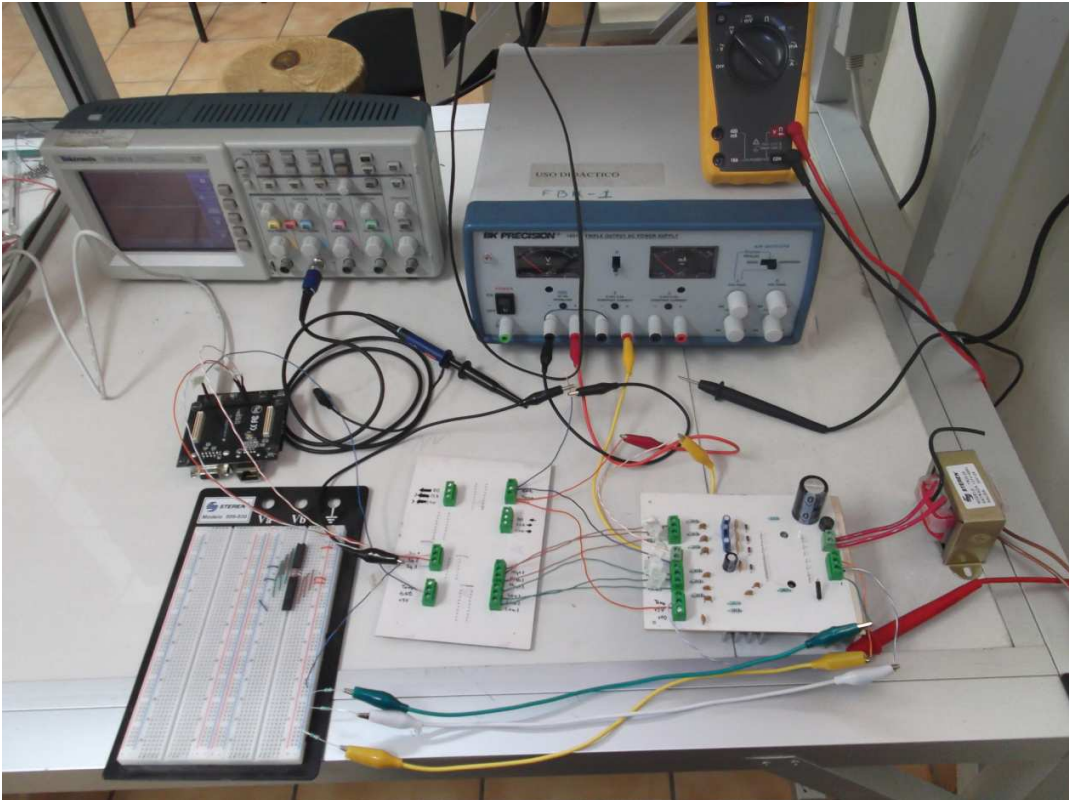


Figura 41. Módulos conectados a resistencia de carga.

Las señales de salida del sistema fueron analizadas, con lo que se confirmó que los voltajes y desfases en las señales eran los requeridos para la operación del motor. La figura 42 muestra las señales de salida del driver de potencia.

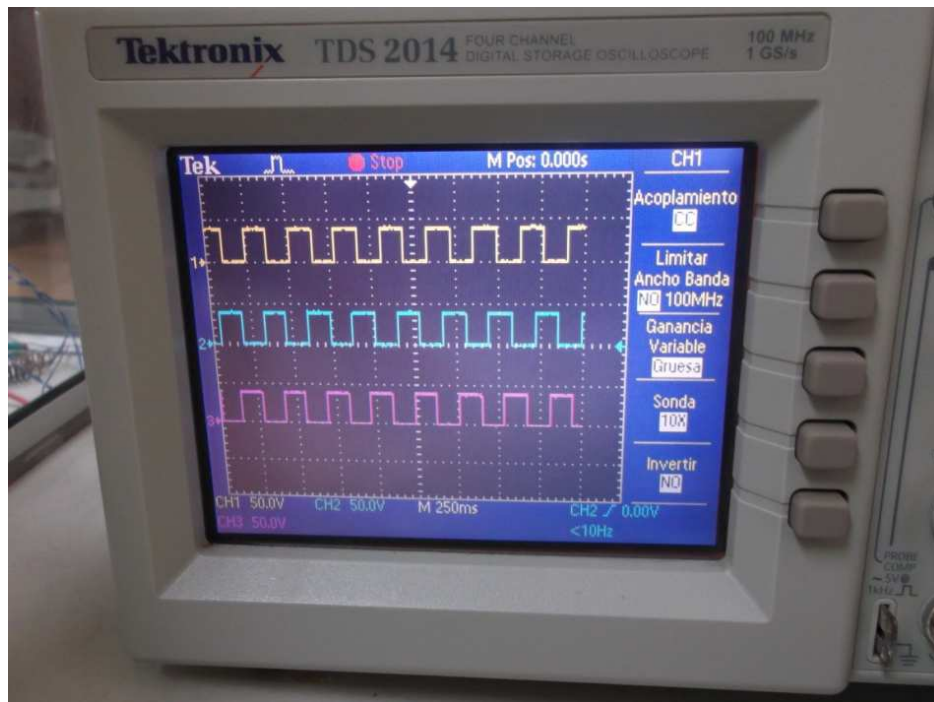


Figura 42. Señales de salida en driver de potencia.

Posteriormente se realizaron las pruebas con un motor conectado. En estas pruebas se debía determinar si la fuente de alimentación utilizada suministraba la potencia adecuada para operar los motores y sí este respondía a los comandos de cambio de velocidad, cambio de giro proporcionados por el microcontrolador. La figura 43 muestra un motor operado por el sistema.

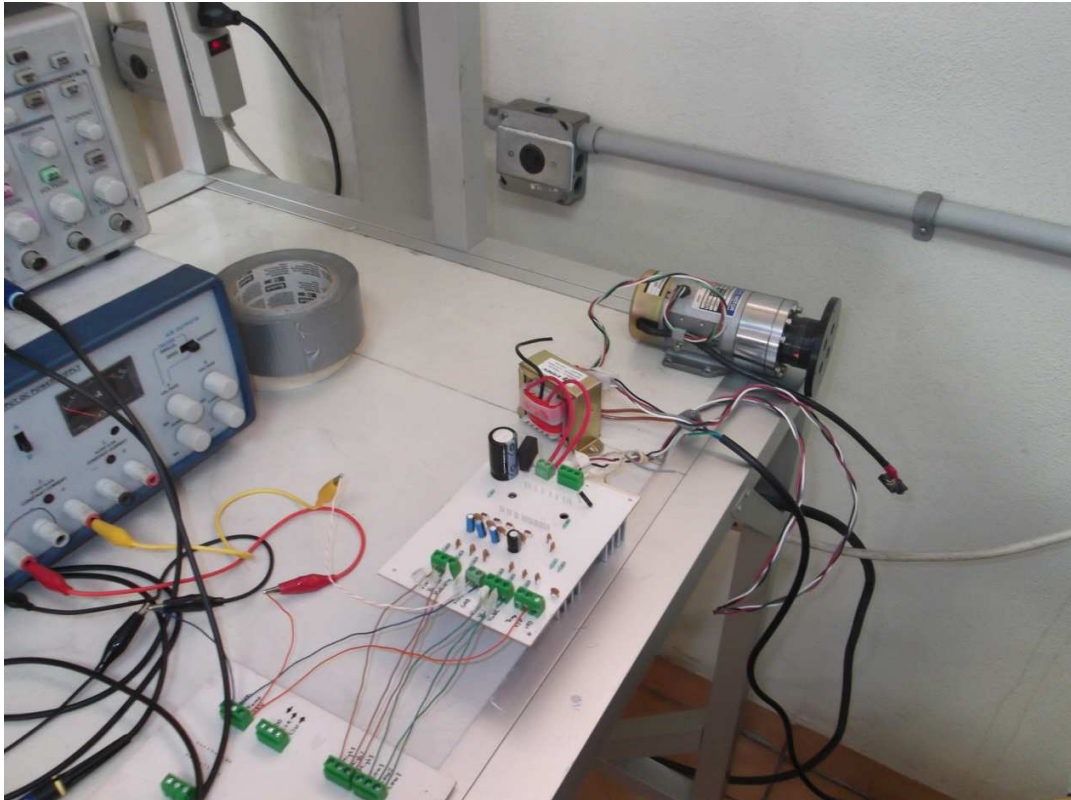


Figura 43. Motor operado por el sistema.

3.4.2.8. Fuente de alimentación y análisis de potencia

Como primera aproximación de la fuente de alimentación se utilizó un transformador entrada 127 V – 60 Hz, salida 24 V – 2 A. Una vez determinado el transformador que se utilizaría se procedió a tomar las mediciones de voltaje y corriente suministrados por este, al operar el motor. La figura 44 muestra las señales de voltaje (Azul) y corriente (Amarilla), para esta última se utilizaron las puntas de corriente con una escala de 1 A por división.



Figura 44. Señales de voltaje y corriente, fuente de alimentación.

Una vez realizadas las mediciones se procedió a los cálculos correspondientes para la obtención del valor efectivo y de este modo determinar la potencia suministrada por la fuente. Para facilitar los cálculos ambas señales fueron consideradas como senoidales, de lo que se obtuvo los siguientes resultados.

La corriente alimentación es la ecuación 1:

$$V_{\text{efectivo}} = (3.5 \text{ A}) (0.707) = 2.474 \text{ A} \quad (1)$$

El voltaje alimentación en la expresión 2:

$$V_{\text{efectivo}} = (40 \text{ V}) (0.707) = 28.280 \text{ V} \quad (2)$$

De modo que la potencia suministrada por la fuente de alimentación al driver de potencia queda expresada por la ecuación 3:

$$P = V \cdot I = (2.474 \text{ A}) (28.280 \text{ V}) = 69.964 \text{ W} \quad (3)$$

Del mismo modo se realizaron las mediciones de las señales de salida al motor. La figura 45 muestra las señales de salida de voltaje (Azul) y corriente (Amarillo) suministrada al motor.

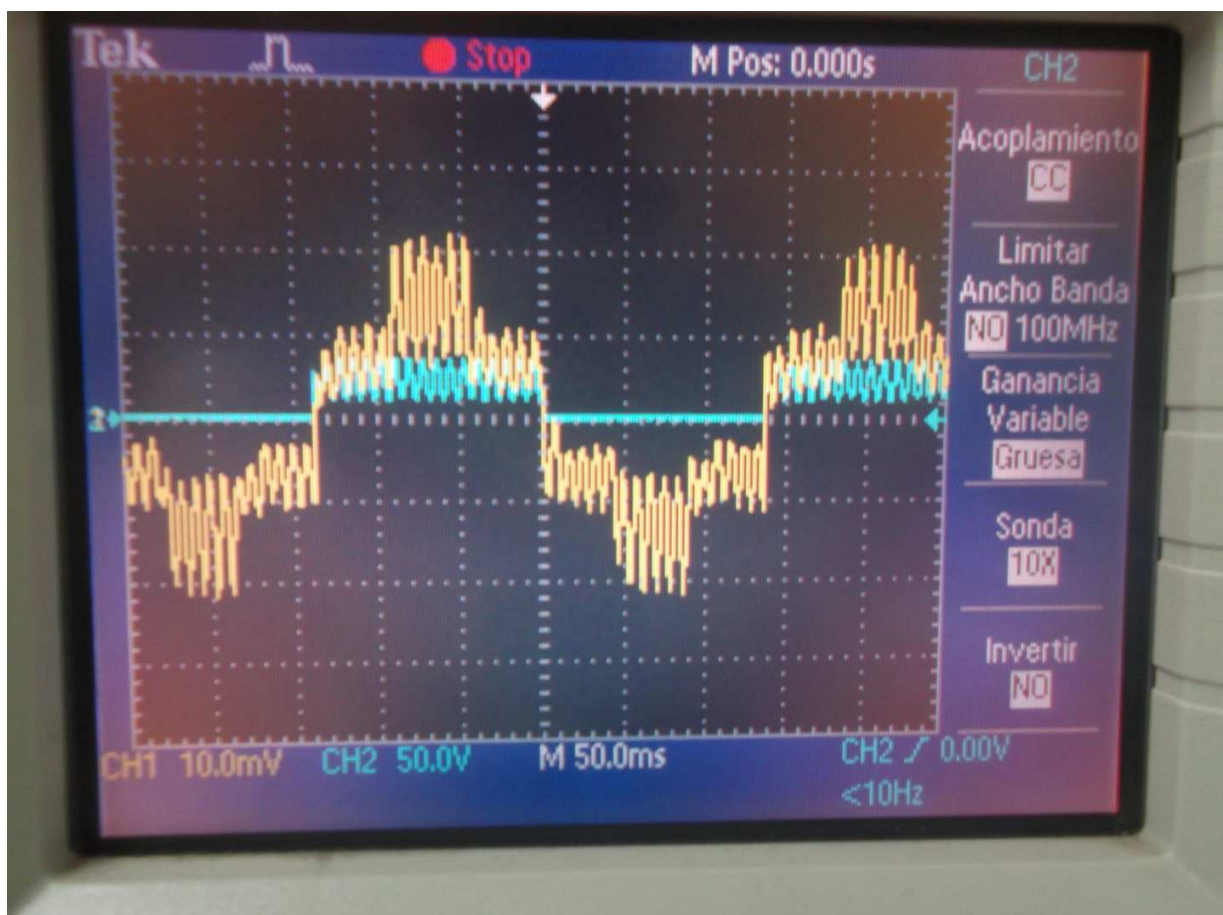


Figura 45. Señales de voltaje y corriente, en motor.

Estas señales fueron divididas en sus componentes de CD y CA, para su cálculo y posteriormente fueron sumadas. Para el caso del voltaje se consideró una

señal cuadrada con una amplitud de 25 V y una senoidal de medio periodo con amplitud de 25 Vpp, de esta manera se procedió a realizar las operaciones. La figura 46 muestra la señal de voltaje correspondiente al motor.

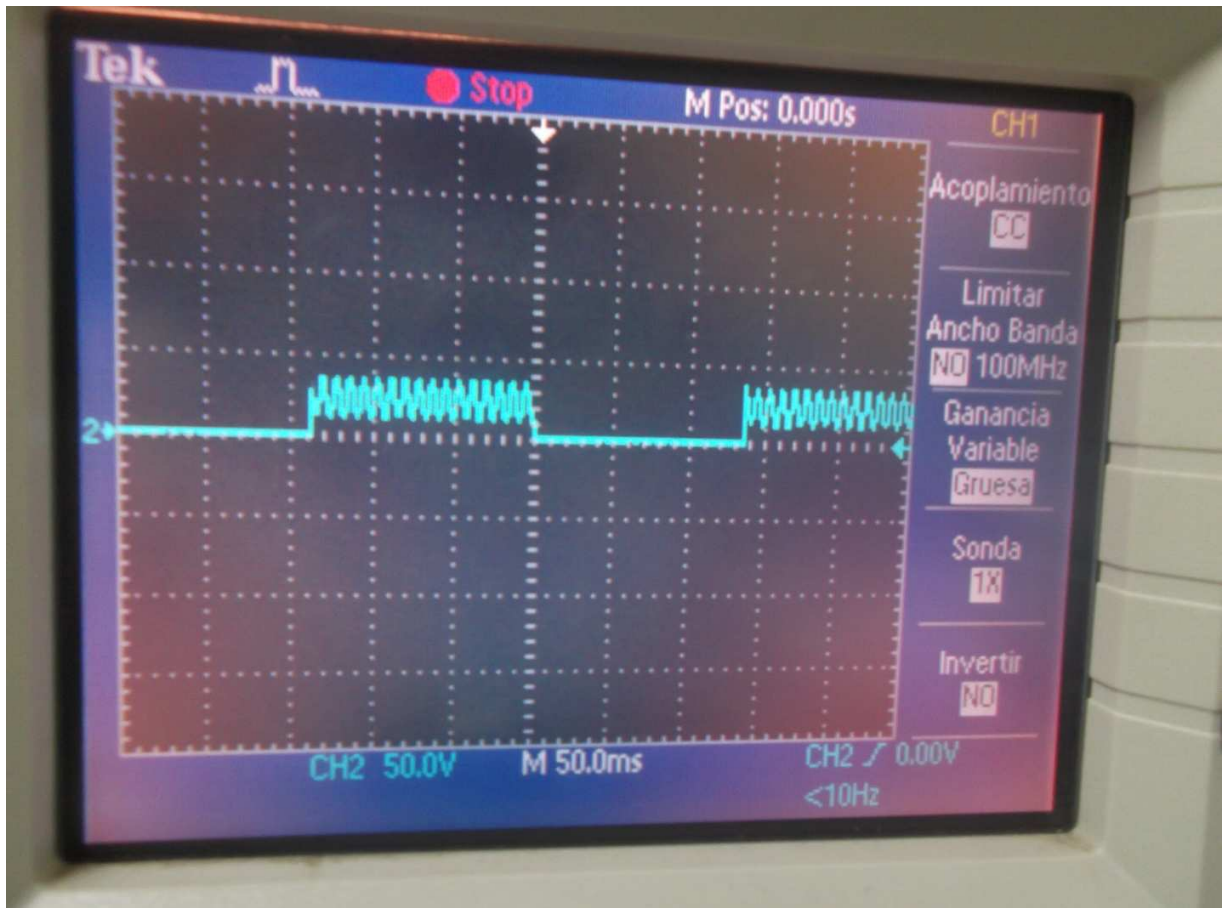


Figura 46. Señal de voltaje en el motor.

Cálculos para la señal cuadrada en la fórmula 4:

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^T \frac{V^2(t) dt}{T}} = \sqrt{\frac{\int_0^{0.140} (25)^2 dt + \int_{0.140}^{0.280} (0)^2 dt}{0.280}} \quad (4)$$

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^{0.140} \frac{625 dt}{0.280}} = \sqrt{\frac{625(0.140) - 625(0)}{0.280}} \quad (5)$$

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\frac{87.5}{0.280}} = 17.677 \text{ V} \quad (6)$$

Para señal senoidal la ecuación 7:

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^T \frac{V^2(t) dt}{T}} = \sqrt{\int_0^{0.140} \frac{(12.5 \text{ Sen} 2\pi f)^2 dt}{0.280}} = 6.250 \text{ V} \quad (7)$$

El valor efectivo para el voltaje suministrado al motor queda expresado por la suma de ambos resultados en la fórmula 8.

$$V_{\text{efectivo}} = 17.677 \text{ V} + 6.250 \text{ V} = 23.927 \text{ V} \quad (8)$$

Para el caso de la corriente se procedió de modo similar, se consideró la suma de una señal en cuadrada y otra senoidal de varias amplitudes, para realizar los cálculos. La figura 47 muestra la señal de corriente suministrada al motor.

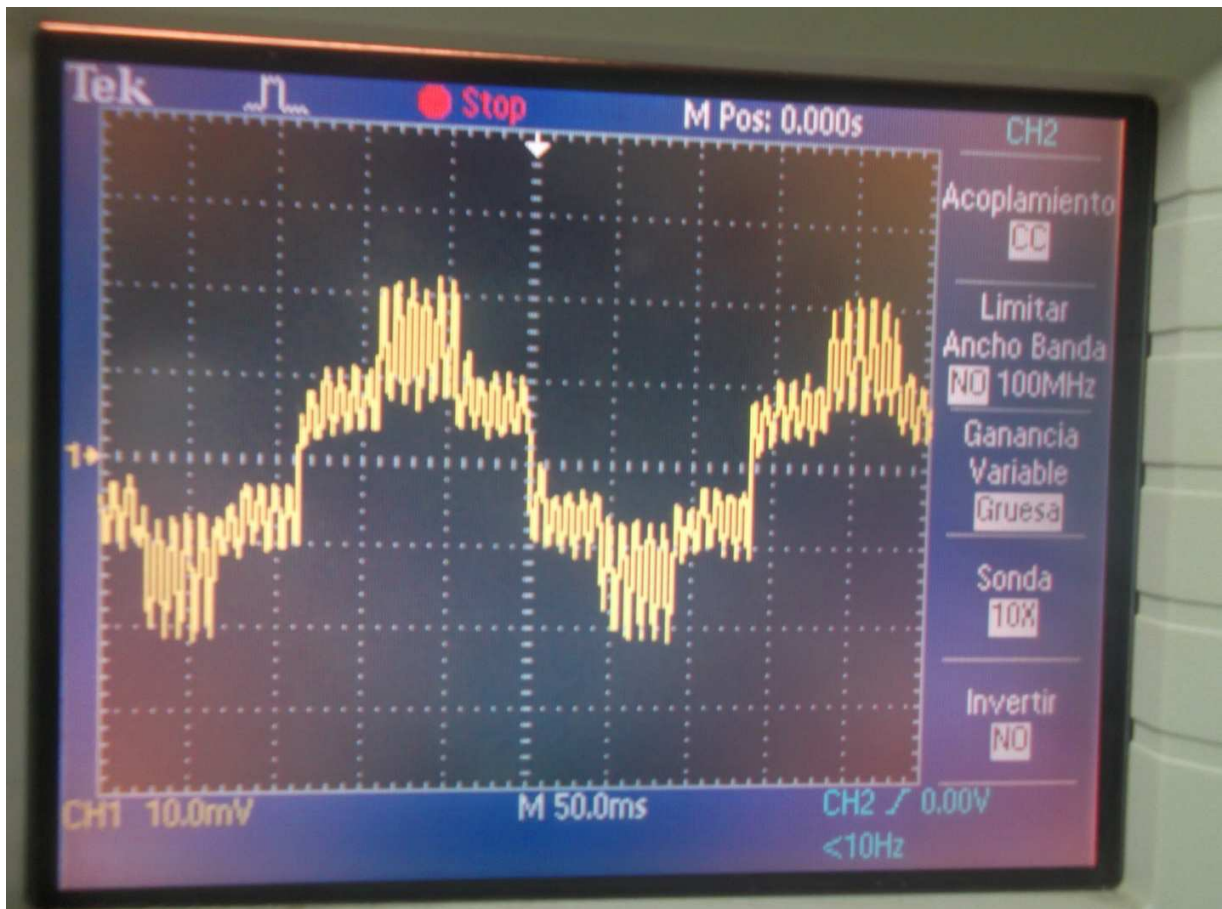


Figura 47. Señal de corriente en el motor.

Para la señal cuadrada se recomendaron las amplitudes de voltaje y la duración en el periodo para reducir los cálculos en la ecuación 9:

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^T \frac{I^2(t)dt}{T}} \quad (9)$$

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^{0.093} 0.49dt + \int_{0.093}^{0.140} 2.25dt + \int_{0.140}^{0.233} 0.49dt + \int_{0.233}^{0.280} 2.25dt} \quad (10)$$

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\frac{0.303}{0.280}} = 1.082 \text{ A} \quad (11)$$

Para la señal senoidal la fórmula 12:

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^T \frac{I^2(t) dt}{T}} = \sqrt{\int_0^{0.093} \frac{0.7 \text{Sen} 2\pi f dt}{0.280} + \int_0^{0.187} \frac{12.5 \text{Sen} 2\pi f dt}{0.280}} \quad (12)$$

$$V_{\text{efectivo}} = 0.486 \text{ A} \quad (13)$$

El valor efectivo para la corriente será la suma de ambos resultados, fórmula 14:

$$V_{\text{efectivo}} = 1.082 \text{ A} + 0.486 \text{ A} = 1.568 \text{ A} \quad (14)$$

Realizamos los cálculos pertinentes para obtener la potencia de salida, ecuación 15:

$$P = V \cdot I = (23.927 \text{ V}) (1.568 \text{ A}) = 37.517 \text{ W} \quad (15)$$

Calculo de la eficiencia en la fórmula 16:

$$\text{Eficiencia} = \text{Potencia de salida} / \text{Potencia de entrada} \quad (16)$$

$$\text{Eficiencia} = 37.517 \text{ W} / 69.964 \text{ W} = 53.62 \% \quad (17)$$

A pesar de que la potencia suministrada al motor se encontraba por ligeramente debajo de la máxima recomendada de 40 W, la corriente presente superaba por más de doble la recomendada de 0.78 A por lo que se determinó colocar una resistencia de potencia en la fuente de alimentación para reducir la corriente suministrada hacia el motor. Una vez modificada la fuente de alimentación se realizaron las mediciones y cálculos nuevamente. La figura 48 muestra las señales de voltaje (azul) y corriente (amarillo) de la fuente de alimentación con la resistencia de potencia.

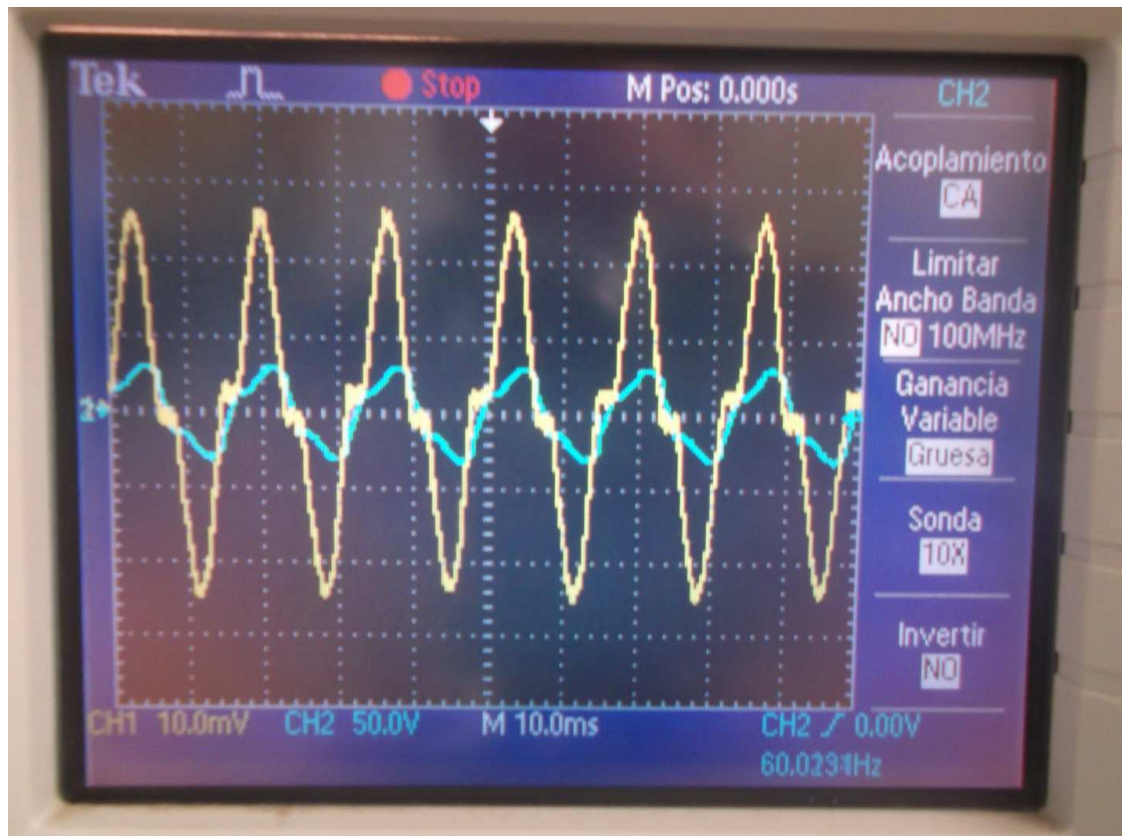


Figura 48. Voltaje (azul) y corriente (amarillo) fuente con la resistencia.

Corriente alimentación, ecuación 18:

$$V_{\text{efectivo}} = (2.7 \text{ A}) (0.707) = 1.908 \text{ A} \quad (18)$$

Voltaje alimentación, fórmula 19:

$$V_{\text{efectivo}} = (33 \text{ V}) (0.707) = 23.331 \text{ V} \quad (19)$$

De modo que ahora la potencia suministrada por la fuente de alimentación al driver de potencia queda expresada por la ecuación 20:

$$P = V \cdot I = (1.908 \text{ A}) (23.331 \text{ V}) = 44.515 \text{ W} \quad (20)$$

Una vez analizada la fuente de alimentación, se realizaron las mediciones de las señales de salida al motor. La figura 49 muestra las señales de salida de voltaje (Azul) y corriente (Amarillo) al motor.

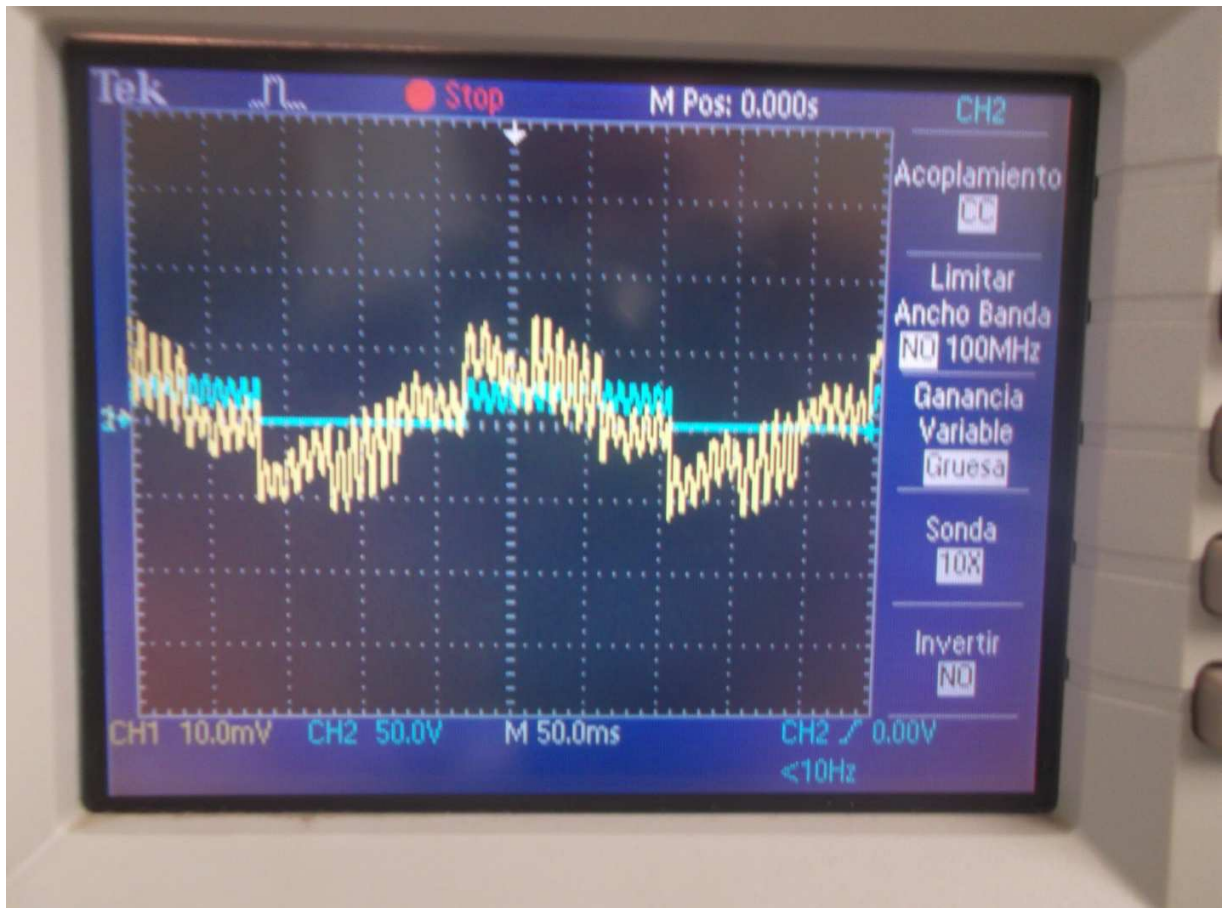


Figura 49. Corriente y voltaje en motor (transformador con resistencia).

Así como para el caso anterior, la señal fue dividida para realizar los cálculos de valor efectivo, con una señal cuadrada de 20 V de amplitud y una senoidal de 20 Vpp. La figura 50 muestra la señal de voltaje en el motor (transformador con resistencia de potencia).

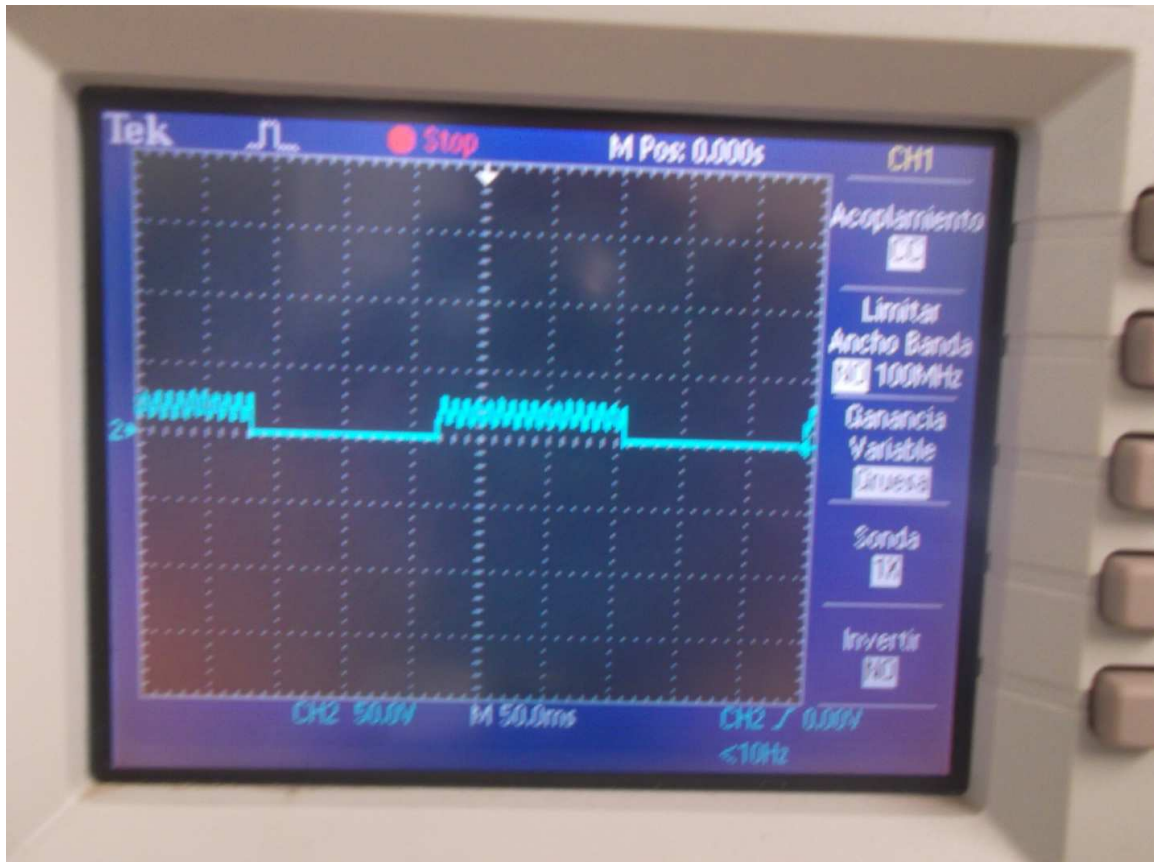


Figura 50. Señal de voltaje en el motor (transformador con resistencia).

Cálculos para la señal cuadrada en la fórmula 21:

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^T \frac{V^2(t) dt}{T}} = \sqrt{\frac{\int_0^{0.140} (20)^2 dt + \int_{0.140}^{0.280} (0)^2 dt}{0.280}} \quad (21)$$

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^{0.140} \frac{400 dt}{0.280}} = \sqrt{\frac{400(0.140) - 400(0)}{0.280}} \quad (22)$$

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\frac{56}{0.280}} = 14.142 \text{ V} \quad (23)$$

Calculo para la señal senoidal, ecuación 24:

$$V_{\text{efectivo}} = \sqrt{\int_0^T \frac{V^2(t) dt}{T}} = \sqrt{\int_0^{0.140} \frac{(10 \text{ Sen } 2\pi f)^2 dt}{0.280}} = 5 \text{ V} \quad (24)$$

El valor efectivo para el voltaje será la suma de ambas señales, ecuación 25:

$$V_{\text{efectivo}} = 14.142 \text{ V} + 5 \text{ V} = 19.142 \text{ V} \quad (25)$$

Para la corriente, dada su complejidad y al observar la forma que describe se considerara una señal senoidal simplemente para realizar los cálculos. La figura 51 muestra la señal de corriente en el motor con 1 A por división.

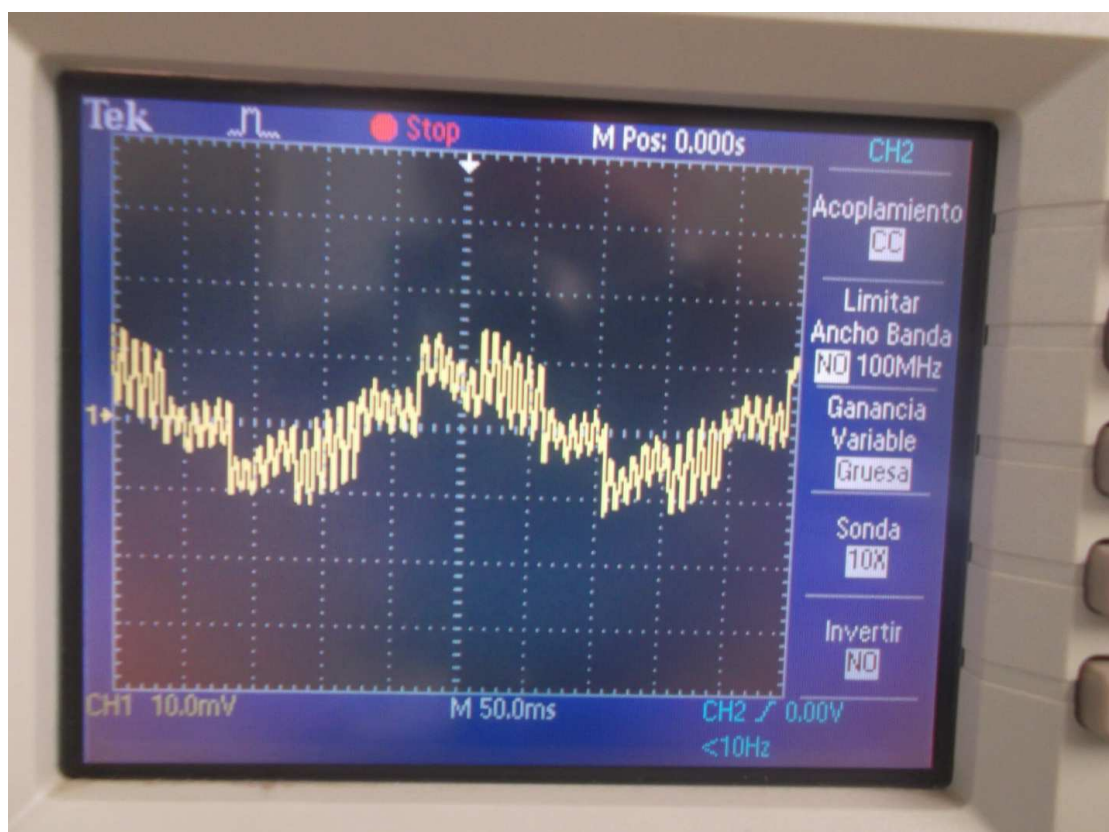


Figura 51. Señal de corriente en el motor (transformador con resistencia).

El valor efectivo de la corriente queda expresado por la ecuación 26:

$$V_{\text{efectivo}} = (1.5 \text{ A}) (0.707) = 1.060 \text{ A} \quad (26)$$

La potencia de salida al motor quedara expresada por la formula 27:

$$P = V \cdot I = (19.142 \text{ V}) (1.060 \text{ A}) = 20.290 \text{ W} \quad (27)$$

Se realiza el cálculo de eficiencia por la formula 28:

$$\text{Eficiencia} = \text{Potencia de salida} / \text{Potencia de entrada} \quad (28)$$

$$\text{Eficiencia} = 20.290 \text{ W} / 44.515 \text{ W} = 45.58 \% \quad (29)$$

Dado que en este caso la potencia de salida no excedía la recomendada y la corriente suministrada al motor apenas sobrepasaba unas decimas la corriente recomendada, se conservo este diseño para la operación del motor.

3.4.2.9. Respuesta de motor a comandos del microcontrolador

Se probaron las funciones del microcontrolador, cambio de velocidad y giro. Durante las pruebas se observaron los resultados esperados, sin embargo en varias de las frecuencias se presentaron comportamientos inconsistentes en el motor, por lo que se realizó un barrido de frecuencias para estudiar a detalle estas respuestas y determinar los límites de operación del motor.

La prueba de barrido se realizó con frecuencias desde los 4 Hz hasta los 60 Hz en uno de los motores chicos y los resultados se monitorearon por medio de un

tacómetro en el osciloscopio. La figura 52 muestra el tacómetro utilizado para medir las revoluciones del motor.

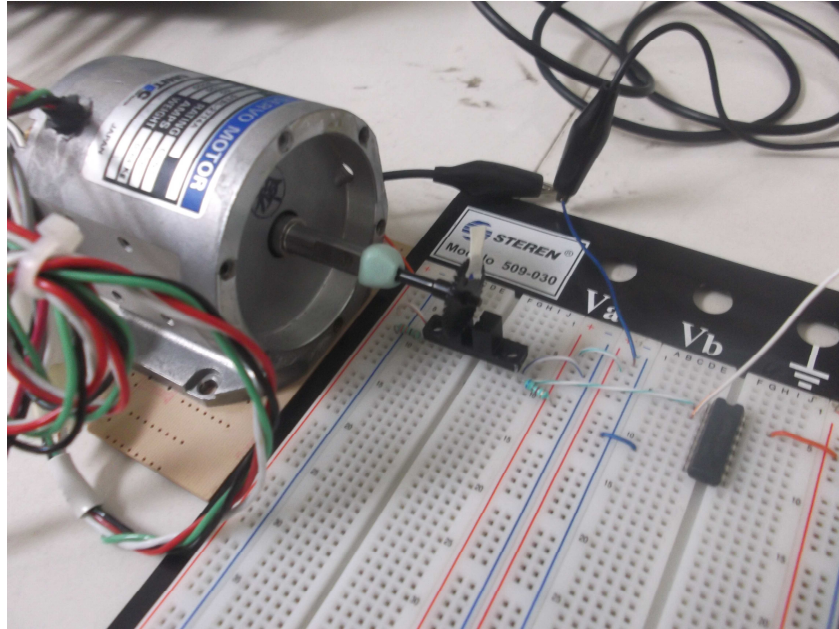


Figura 52. Tacómetro.

Durante las pruebas se determinó que para frecuencias por debajo de los 30 Hz el motor no respondía adecuadamente ya que perdía el sentido de giro.

3.4.2.10. Esquemático final del diseño

Como resultado final en la figura 53 se muestran todos los elementos que constituyen el diseño, estos están distribuidos de la siguiente manera, la computadora y microcontrolador se encuentran conectados por medio del cable USB para la programación de este último, una vez programado la computadora puede ser desconectada o conservar la conexión para el monitoreo del programa. Los pines utilizados por el microcontrolador son el 13, 14 y 16, para las señales de salida y el pin 38 corresponde a la referencia a tierra. Las señales generadas por el microcontrolador son acondicionadas, por medio de una serie

de buffers y compuertas antes de servir como señales de control al driver de potencia, este es alimentado por CA para proporcionar la potencia de salida a los motores así como por una fuente de CD de 15 V para la activación de los transistores. Finalmente el driver de potencia genera las señales de salida requeridas para la operación del motor de acuerdo a las señales de control de entrada.

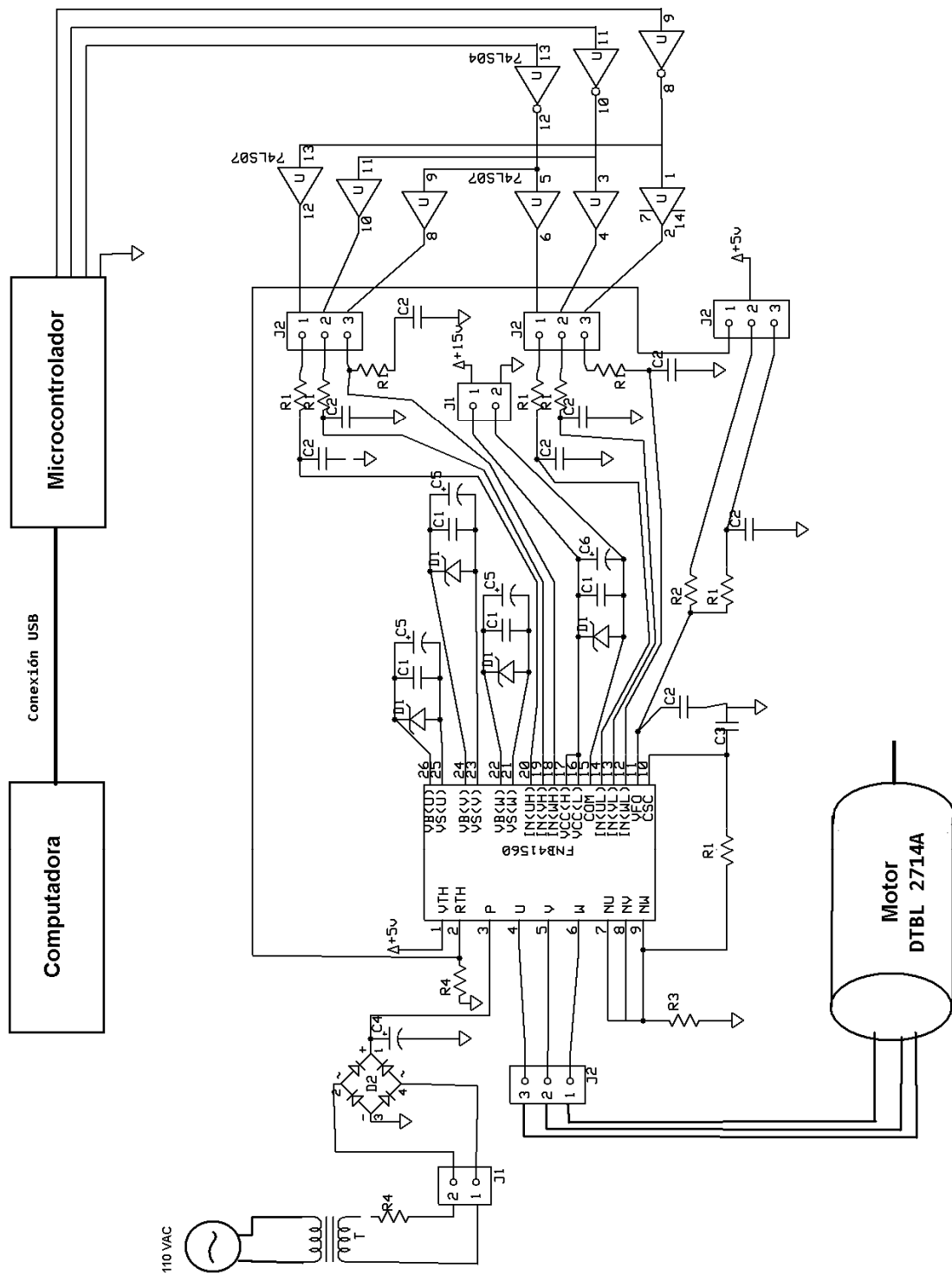


Figura 53. Esquemático final del diseño.

La tabla 6 muestra el listado de componentes utilizados en el circuito anterior.

Tabla 6. Lista de materiales circuito completo.

Componente:	Descripción:
R1.	Resistencia 100 Ohms, 1/4 W.
R2.	Resistencia 4700 Ohms, 1/4 W.
R3.	Resistencia 0.01 Ohms, 1/4 W.
R4.	Resistencia 6800 Ohms, 1/4 W.
R5.	Resistencia 4 Ohms, 20 W.
C1.	Capacitor 0.1 μ F, 50 V.
C2.	Capacitor 0.001 μ F, 50 V.
C3.	Capacitor 0.022 μ F, 50 V.
C4.	Capacitor 220 μ F, 200 V.
C5.	Capacitor 33 μ F, 25 V.
C6.	Capacitor 220 μ F, 25 V.
D1.	1N4749: Diodo Zener, 25 V.
D2.	Puente de Diodos, 200 V, 4 A.
T.	Transformador entrada: 127 V – 60 Hz, salida: 24 V – 2 A.
FNB41560.	Módulo de transistores IGBT, 600 V, 15 A.
74LS07.	Buffer.
74LS04.	Compuerta inversora.
J1.	Terminal con 2 tornillos, TRT-02.
J2.	Terminal con 3 tornillos, TRT-03.
Computadora.	Pentium Dual-Core T4200, 2.0GHz.
Microcontrolador.	M52259Demokit.
Motor.	DTBL 2714A.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Introducción

Una vez programado el microcontrolador y con el driver de potencia implementado, se procedió a la instalación prueba y toma de resultados para la validación de los módulos en conjunto.

4.2. Resultados microcontrolador

Finalizado el programa para el microcontrolador, se realizó la lectura de las señales generadas, por medio del osciloscopio, donde se pudo observar 3 señales desfasadas 120° entre si, correspondientes a las 3 señales base requeridas por el driver de potencia. La figura 54 muestra las 3 señales generadas desde el microcontrolador.

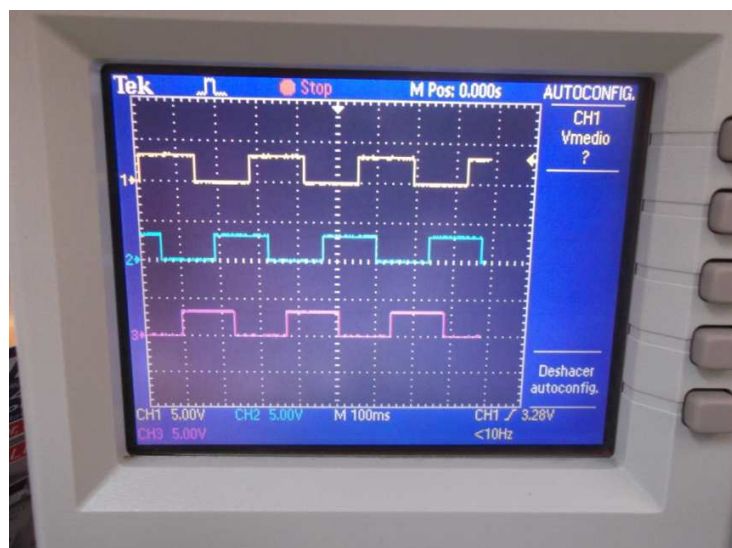


Figura 54. Señales generadas por el microcontrolador.

Seguido de esto se probaron los comandos de cambio de frecuencia y giro por medio de los switches del microcontrolador. En la figura 55 se muestra los cambios de frecuencia a la salida del microcontrolador.



Figura 55. Barrido de frecuencias.

Por lo que se pudo determinar que el programa y el microcontrolador cumplían con niveles de voltaje, así como con las funciones necesarias para la manipulación de las señales, para las tareas de cambio de velocidad o sentido de giro, requeridas por el driver de potencia.

4.3. Resultados driver de potencia

Una vez implementado el driver de potencia y hechas las pruebas de las señales de salida con una resistencia de carga, se procedió realizar las pruebas con uno de los motores del robot Mitsubishi Melfa RV-E2 para su validación. En este punto se analizó el voltaje suministrado por la fuente de alimentación, primero con un transformador entrada 127 V – 60 Hz, salida 24 V – 2 A y posteriormente, este mismo con una resistencia de potencia como limitadora de corriente, con lo que se obtuvo los siguientes resultados. La tabla 7 muestra los resultados obtenidos por la fuente de alimentación.

Tabla 7 Resultados fuente de alimentación.

Fuente de alimentación:	Suministro al driver de potencia:			Suministro al motor desde el driver de potencia:			Eficiencia. %:
	Voltaje (V):	Corriente (A):	Potencia (W):	Voltaje (V):	Corriente (A):	Potencia (W):	
Transformador.	28.280	2.474	69.964	23.927	1.568	37.517	53.62
Transformador con resistencia.	23.331	1.908	44.515	19.142	1.060	20.290	45.58

En ambos casos el motor realizaba las tareas indicadas por el microcontrolador, sin embargo, para el caso en el que solo se utilizó el transformador la potencia suministrada estaba muy cercana a potencia de 40 W recomendada para el motor, pero su corriente excedía por más del doble la recomendada de 0.78 A, por este motivo se decidió utilizar el transformador con la resistencia de potencia para las pruebas subsecuentes, por suministrar una corriente mas de acuerdo a la indicada por el motor aun que esto representara una menor potencia de salida.

4.4. Resultados frecuencias de operación en el motor

Al realizar las pruebas del sistema con el motor se observaron comportamientos inconsistentes para frecuencias bajas, por lo que fue necesario realizar algunas pruebas para determinar las frecuencias de operación de los motores, estas se realizaron en los tres motores más chicos para frecuencias bajas, no especificadas en las características de estos. El barrido se realizó con frecuencias desde los 4 Hz hasta los 60 Hz.

Como resultado se obtuvo que para frecuencias debajo de los 29 Hz se mostraban inconsistencias en la velocidad y sentido de giro. En la figura 56 se puede observar una de las señales de activación del motor (amarillo) a frecuencias por debajo de los 25 Hz y la señal proporcionada por el tacómetro en el motor donde se observa la variación en la respuesta de giro.

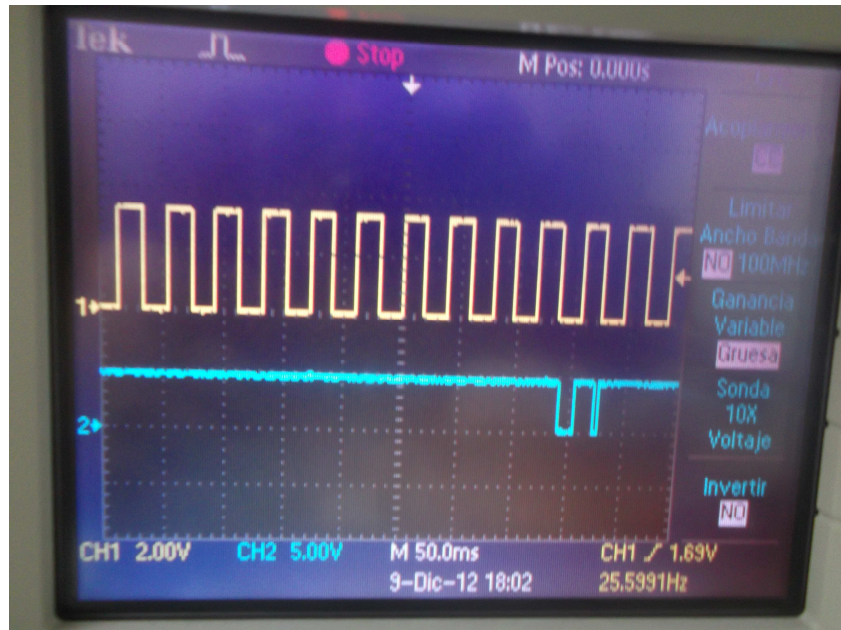


Figura 56. Inconsistencia en el giro del motor, señal tacómetro.

Por otro lado durante el resto del barrido de frecuencias se obtuvieron resultados constantes en frecuencia por arriba de los 29 Hz. La figura 57 muestra la señal de activación del motor (amarillo) y la señal del tacómetro (azul) con pulsos constantes.



Figura 57 Señal constante en tacómetro.

Con los datos adquiridos por el tacómetro se obtuvieron los siguientes resultados. La tabla 8 muestra los resultados adquiridos por el tacómetro en el motor.

Tabla 8. Tacómetro en el motor.

Señal de activación:	Periodo (ms) de pulsos en el tacómetro:	Revoluciones por segundo motor:
29.25	0.1350	7.40
32.90	0.1225	8.24
40.22	0.1000	10.00
43.86	0.0900	11.11
47.52	0.0825	12.12
51.17	0.0775	12.90
54.82	0.0725	13.79
60.00	0.0625	15.16

De los datos anteriores se puede observar un comportamiento lineal en la respuesta del motor para frecuencias arriba de los 30 Hz. la figura 58 muestra la gráfica de los datos obtenidos durante las mediciones del tacómetro.

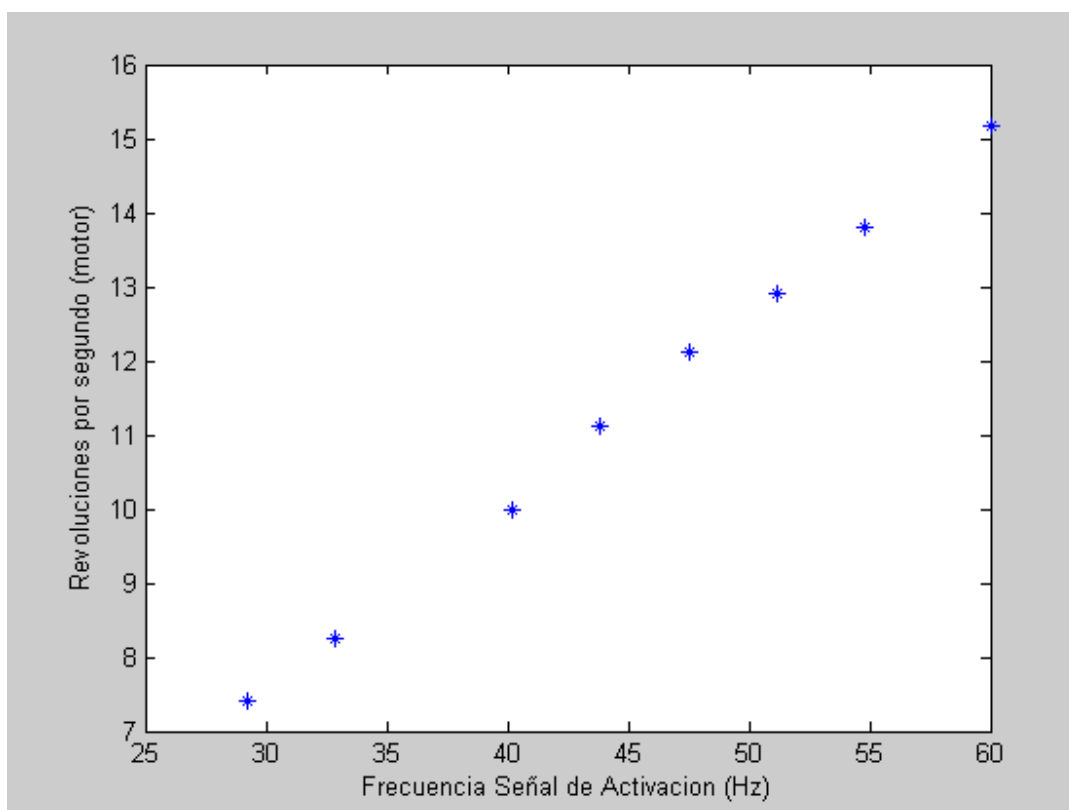


Figura 58. Respuesta Frecuencia contra revoluciones del motor.

Los resultados obtenidos por el driver de potencia resultaron satisfactorios, al lograr la activación del motor, así como, permitir el cambio de dirección de giro y velocidad de rotación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

5.1. Introducción

La implementación de un sistema de arquitectura abierta para un robot manipulador, demanda tomar en consideración cada uno de los diferentes subsistemas que lo conforman, así mismo, las características y requerimientos del robot manipulador; esto se logra al seleccionar componentes adecuados a las necesidades, con lo que se proporciona una alimentación adecuada, así como al implementar sistemas de protección en caso de falla. De esta manera se puede garantizar un funcionamiento adecuado y tiempo de vida prolongado en el sistema.

5.2. Conclusiones

Se implementó un driver de potencia para el accionamiento de los motores del robot Mitsubishi Melfa RV-E2 como parte del diseño para su arquitectura abierta. El driver de potencia posee como elemento principal el FNB41560 un módulo inteligente de poder, este integrado tiene además un sensor de temperatura así como con una señal de alerta en caso de fallo, el driver es operado con señales de bajo voltaje 3.3/5 V.

Como problema se tuvo que enfrentar a un sistema de arquitectura cerrada descompuesto, lo cual implicó tener que trabajar sin esquemáticos ni señales para analizar, esto se enfrentó al analizar el sistema por bloques, a partir de sus componentes, sin embargo, no fue posible obtener las hojas de datos de todos, por lo que no fue posible conseguir un conocimiento total de su funcionamiento pero si el necesario para un nuevo diseño para el driver de potencia.

Como aportaciones este proyecto permitió la construcción de un driver de potencia para los motores M4, M5, M6 del robot Mitsubishi RV-E2, con el cual ya pueden ser operados.

De lo anterior se puede concluir que el proyecto realizado cumple satisfactoriamente con el objetivo general:

- ✓ Realizar un driver de potencia para motores de corriente alterna que permita el funcionamiento del robot Mitsubishi Melfa RV-E2.

El cumplimiento del objetivo general del proyecto establece, que la hipótesis planteada para este trabajo se cumple afirmativamente:

- ✓ Sí se podrá realizar un driver de potencia para motores de corriente alterna que permita el funcionamiento del robot Mitsubishi Melfa RV-E2.

Con la validación de forma afirmativa de la hipótesis, es posible responder la pregunta de investigación:

- ✓ ¿Se podrá realizar un driver de potencia para motores de corriente alterna que permita el funcionamiento del robot Mitsubishi Melfa RV-E2?

La respuesta a la pregunta de investigación es que, sí se puede realizar el driver de potencia para motores de corriente alterna, que de acuerdo a sus características permite el accionamiento de los motores del robot Mitsubishi Melfa RV-E2, además de un dispositivo programado para su activación. De este modo se tiene en el Laboratorio de Mecatrónica de la FIAD un driver de potencia para el robot manipulador con el que pueden experimentar los usuarios de laboratorio.

Al atender la problemática:

- ✓ El Robot Melfa RV-E2 se encuentra dañado, dicho modelo ha sido discontinuado por Mitsubishi, lo que dificulta su reparación por dicha empresa. Al ser de arquitectura cerrada, no se tiene acceso a diagramas de diseño, lo que imposibilita su reparación por otros medios, por lo que se requiere una modificación en su arquitectura para su reparación.

Se obtuvo como resultado un sistema capaz de resolver el problema planteado al inicio del proyecto.

De lo anterior se puede decir que se rescata equipo de Laboratorio de Mecatrónica, lo que permite nuevamente la realización de prácticas de laboratorio, además de ampliar su capacidad para realización de investigación y desarrollo.

5.3. Trabajos futuros

Como trabajos futuros se pueden mencionar:

- Diseño e implementación, de una fuente de alimentación acorde con las demandas de los motores, así como de los diferentes módulos.
- Reproducción de los drivers de potencia para el resto de los motores.
- Implementación de algoritmos de control con realimentación.
- Implementación de comandos AT para comunicación PC-Microcontroladores.

Los trabajos futuros no están limitados a los mencionados anteriormente ya que la arquitectura abierta del sistema proporciona una gran gama de posibilidades y una gran capacidad para adaptarse nuevos proyectos.

APÉNDICE A

Equipos de Laboratorio

1. Fuente de poder BK precisión 1651A

El modelo 1651A de BK precisión cuenta con 3 salidas de corriente directa, con la opción de trabajar en paralelo o serie. Esta fuente de poder tiene protección de corto circuito, sobrecarga y polaridad inversa, además de la posibilidad de limitar la corriente de suministro. Para su monitoreo dispone con dos medidores analógicos uno para voltaje y otro para corriente. En la tabla 9 muestra las características de las fuentes.

Tabla 9. Características fuente de poder BK precisión 1651A.

Numero de fuentes:	Voltaje:	Corriente:
2.	0~24 V.	0.5 A.
1.	5 V.	4 A.

En la figura 59 se muestra la fuente de poder BK precisión 1651A.



Figura 59. fuente de poder BK precisión 1651A.

2. Osciloscopio Tektronix TDS2014

El Osciloscopio TDS2014 de Tektronix es parte de la serie TDS2000C, este tiene arquitectura de muestreo digital en tiempo real capaz de mostrar pequeños detalles en la señal. Este modelo posee conectividad USB, 16 medidores automáticos, además de una señal de prueba para su calibración. En la tabla 10 se muestran algunas de sus características.

Tabla 10. Características Osciloscopio TDS2014 de Tektronix.

Características:	Descripción:
Muestreo digital en tiempo real.	Captura de precisión con tecnología patentada de muestreo Tektronix.
Ancho de banda.	100 MHz.
Frecuencia de muestreo.	2.0 G muestras /segundo.
Canales.	4 Canales.
Herramientas de análisis.	Simplifica el análisis con 16 medidores automáticos, incluye transformada de Fourier.
Menú de ayuda.	Cuenta con un menú de ayuda de acuerdo al contexto.
Puerto frontal USB.	Almacena tus señales rápidamente al utilizar el puerto USB.
Conectividad USB.	Conexión a PC por medio del puerto USB lateral. Emplea NI LabVIEW SignalExpress™ software para controlar el osciloscopio.
Pantalla brillante a color.	Observa las señales a distancia y desde cualquier ángulo.

La figura 60 presenta el osciloscopio Tektronix TDS2014.



Figura 60. Osciloscopio Tektronix TDS2014.

3. Generador de funciones BK precisión 4010A

El BK precisión 4010A es un generador de funciones que combina múltiples funciones en un dispositivo, capaz de generar señales sinusoidales, cuadradas, entre otras; de hasta 2 MHz En la tabla 11 se muestran algunas de sus características.

Tabla 11. Generador de funciones BK precisión 4010A.

Características:	Descripción:
Frecuencia de trabajo.	0.2 Hz a 2 MHz.
Tipos de señales.	Seno, Cuadrada, Triangular, Pulsos y Diente de sierra.
Ciclo de trabajo.	Ciclo de trabajo variable.
Offset.	Offset CC variable.
Amplitud de Salida.	20 Vpp en circuito abierto.

La figura 61 muestra el generador de funciones BK precisión 4010A.



Figura 61. Generador de funciones BK precisión 4010A.

APÉNDICE B

Programa para control de velocidad y sentido de giro

A continuación se presenta el programa utilizado en el microcontrolador para el control de velocidad y sentido de giro de motores. El programa consiste en tres señales digitales desfasadas 120° la frecuencia de estas señales puede ser modificada por medio de los switch en el microcontrolador, al sobrepasar la velocidad más baja programada se realiza un intercambio en la salida de dos de las señales para generar un cambio de giro en el motor.

```
/* M52259DEMOKIT */
```

```
/* César Noel Díaz González
```

```
/* Generación de 3 señales desfasadas 120grados entre ellas
```

```

      ---      ---
S1   |__|  |__|
      1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0

```

```

      ---      ---
S2   __|  |__|  |__|
      0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0

```

```

      -      ---      ---
S3   |__|  |__|
      1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1

```

```
/* INICIO DEL PROGRAMA */
```

```
#include "support_common.h" /* include peripheral declarations and more */
#if (CONSOLE_IO_SUPPORT || ENABLE_UART_SUPPORT)
/* Standard IO is only possible if Console or UART support is enabled. */
#include <stdio.h>
#endif
```

```
/*****Funciones del programa*****/
/******
```

```
void cpu_pause (unsigned long);
void accion_salida_canal(void);
```

```
/******
/******
```

```
/*****Variables del programa*****/
/******
```

```
int Numero_segundo_sec = 0;
int Sentido_giro = 0;
unsigned long Velocidad_giro = 1;
int Giro_Izquierda = 0;
int Giro_Derecha = 1;
```

```
/******
/******
```

```

/*****INICIO DEL PROGRAMA*****/
/*****/

int main(void)
{
    int counter = 0;

    MCF_GPIO_PTCPAR = 0
|MCF_GPIO_PTCPAR_DTIN0_GPIO
|MCF_GPIO_PTCPAR_DTIN1_GPIO
|MCF_GPIO_PTCPAR_DTIN2_GPIO
|MCF_GPIO_PTCPAR_DTIN3_GPIO;

    MCF_GPIO_DDRTC = 15; // 00001111 configuramos como salida los 4
pines para DDRTC
    MCF_GPIO_PORTTC = 0; // ponemos en 0 las salidas (leds apagados)

    MCF_GPIO_PNQPARG = 0x404; // activa salidas de interrupciones
    MCF_EPORT_EPPARG = 0x404; // interrupcion por flanco de subida
flanco de subida
    MCF_EPORT_EPDDRG = 0x22; // entrada EPORT
    MCF_EPORT_EPIERG = 0x22; // habilita interrupciones

    for(;;)
    {

        if (MCF_EPORT_EPFR == 0x20) //si presiona sw1

```

```

    {
        //si ya esta en esta direccion la velocidad aumenta(velocidad
maxima +5)
        if (Sentido_giro == Giro_Izquierda & Velocidad_giro < 9)
        {
            Velocidad_giro++;
        }
        //si no esta en esta direccion y su velocidad es mayor a 1, la
velocidad se reduce -1
        if (Sentido_giro == Giro_Derecha & Velocidad_giro > 1)
        {
            Velocidad_giro--;
        }
        else
        {
            Sentido_giro = Giro_Izquierda;
        }
        MCF_EPORT_EPFR = 1 // limpia bandera interrupcion sw1
| MCF_EPORT_EPFR_EPF5;
    }
    if (MCF_EPORT_EPFR == 0x2) //si presiona sw2
    {
        //si ya esta en esta direccion la velocidad
aumenta(velocidad maxima +5)
        if (Sentido_giro == Giro_Derecha & Velocidad_giro < 9)
        {
            Velocidad_giro++;
        }
        //si no esta en esta direccion y su velocidad es mayor a 1, la
velocidad se reduce -1
        if (Sentido_giro == Giro_Izquierda & Velocidad_giro > 1)

```

```
    {  
        Velocidad_giro--;  
    }  
    else  
    {  
        Sentido_giro = Giro_Derecha;  
    }  
    MCF_EPORT_EPFR = 1 // limpia bandera interrupcion sw2  
    | MCF_EPORT_EPFR_EPF1;  
}
```

```
if(Numero_segundo_sec<6)  
{  
    accion_salida_canal();  
    cpu_pause(45000/Velocidad_giro);  
    Numero_segundo_sec++;  
  
}  
else  
{  
    Numero_segundo_sec = 0;  
}  
}
```

```
counter++;
```



```
        break;
        case 5:MCF_GPIO_PORTTC = 1;
        break;
    }
}
if (Sentido_giro == 1)
{
    switch (Numero_segundo_sec)
    {
        case 0:MCF_GPIO_PORTTC = 6;
        break;
        case 1:MCF_GPIO_PORTTC = 4;
        break;
        case 2:MCF_GPIO_PORTTC = 5;
        break;
        case 3:MCF_GPIO_PORTTC = 1;
        break;
        case 4:MCF_GPIO_PORTTC = 3;
        break;
        case 5:MCF_GPIO_PORTTC = 2;
        break;
    }
}
}
```

```
/*******/
```

```

/* FUNCION DE RETARDO PARA CUALQUIER TIEMPO */

/*****/
/*
 * Pause for the specified number of micro-seconds.
 * Uses DTIM3 as a timer
 */
void
cpu_pause(unsigned long usecs)
{
    /* Enable the DMA Timer 3 */
    MCF_DTIM3_DTRR = (usecs - 1);
    MCF_DTIM3_DTER = MCF_DTIM_DTER_REF;
    MCF_DTIM3_DTMR = 0
        | MCF_DTIM_DTMR_PS(SYSTEM_CLOCK_KHZ / 1000)
        | MCF_DTIM_DTMR_ORRI
        | MCF_DTIM_DTMR_FRR
        | MCF_DTIM_DTMR_CLK_DIV1
        | MCF_DTIM_DTMR_RST;

    while ((MCF_DTIM3_DTER & MCF_DTIM_DTER_REF) == 0)
    {};

    /* Disable the timer */
    MCF_DTIM3_DTMR = 0;
}
/*****/

```

APÉNDICE C

PCB Módulo de potencia, capa de soldadura, figura 62:

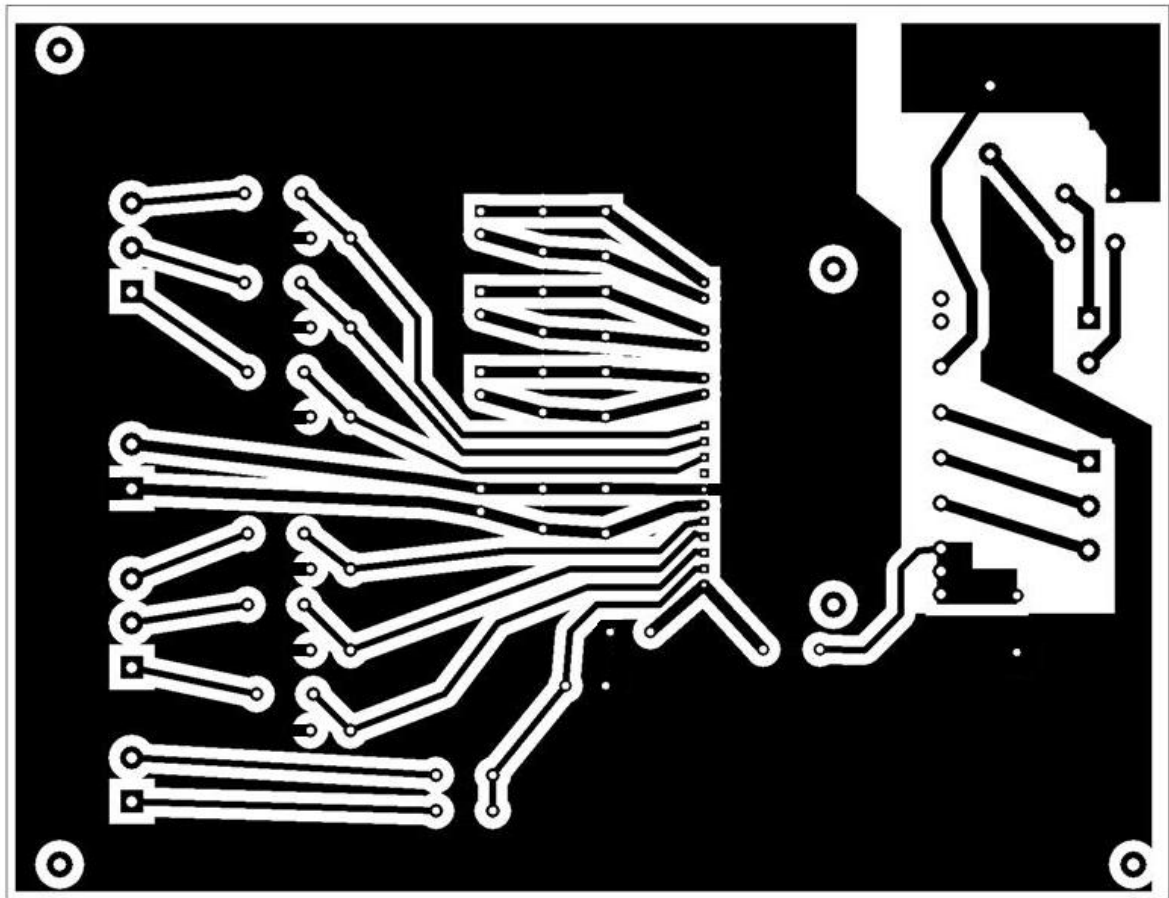


Figura 62. PCB Módulo de potencia.

PCB comunicación microcontrolador-módulo de potencia, capa de soldadura, figura 63:

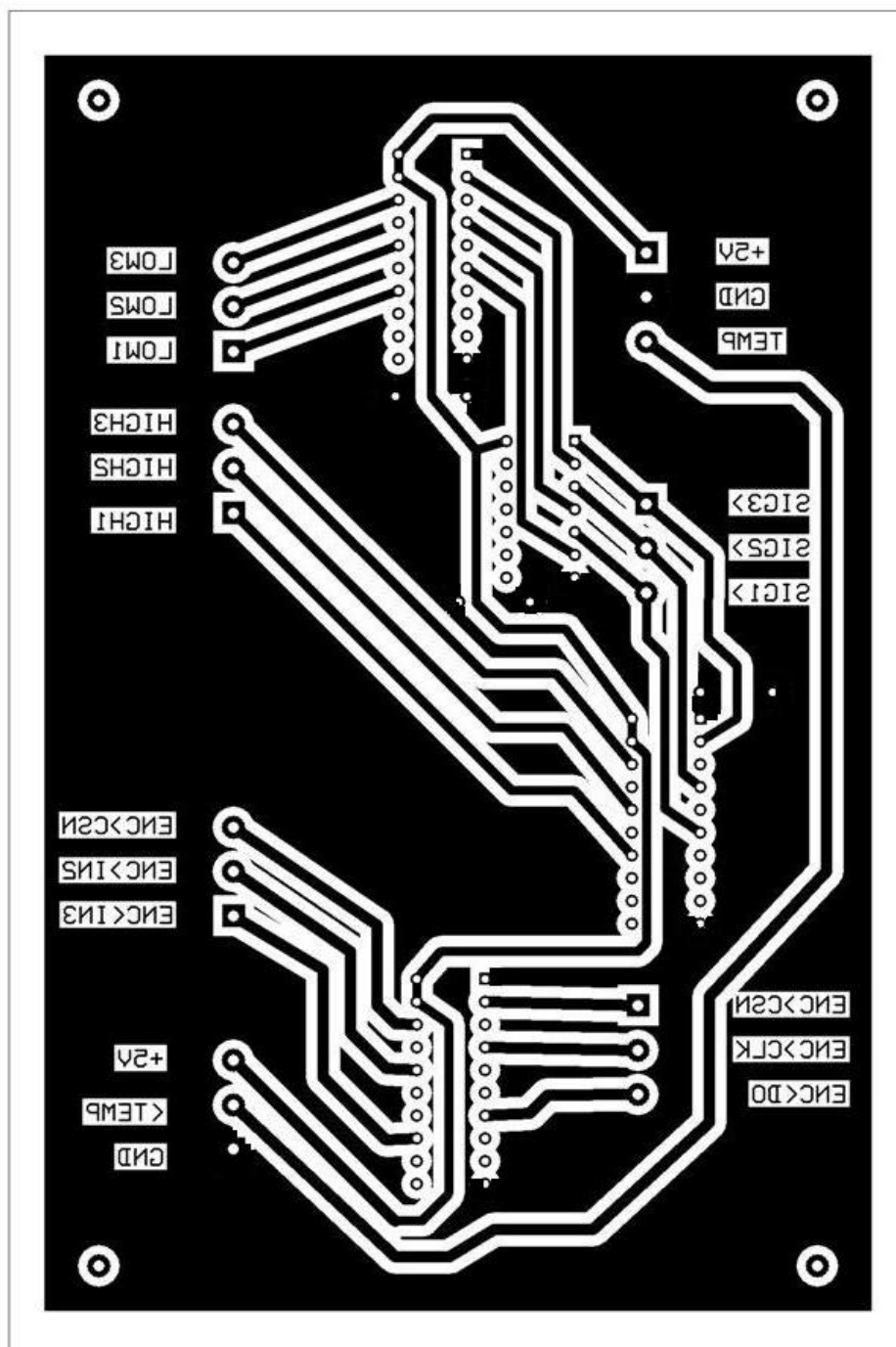


Figura 63. PCB comunicación microcontrolador-módulo de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Barrientos, L. A. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil, 2007 “Fundamentos de robótica”, 2ª edición, McGraw-Hill, España.

[2] Diccionario Lid Construcción e Inmobiliaria, 2a edición, 2003.

[3] J. Gámez, J. Gómez, M. Vargas, F. Rodríguez, 2003, “Arquitectura Abierta de un Robot Industrial Stäubli RX60”, Jornadas de Automática XXIV, Universidad de León, León, España.

[4] A. Guzmán R. J., J. Cid M., J. Méndez M., F. Porras S., G. Villegas R., 2002 “Interfaz del Brazo Robot PUMA 200 con la PC”, Segundo Congreso Nacional de Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

[5] Rafael Kelly, Victor Santibañez, 2003, “Control de movimiento de robots manipuladores”, Pearson Prentice Hall.

[6] Aníbal Ollero Baturone, 2007, “Robótica manipuladores y robots móviles”, Alfaomega Marcombo Boixareu Editores.

[7] Fernando Vences, Fernando Reyes, 2007 “Regulation Problem for an Industrial Manipulator with 3 DOF in Open Architecture” 4to. Congreso de electronic, robótica y maquinas automaticas.

[8] Tarjan I., Skrinjar D., 2010 “Using a Didactic Manipulator in Mechatronics and Industrial Engineering Courses”, IEEE Transactions on Education.

[9] Wood R., 2008, “Robotic Manipulation Using an Open-Architecture Industrial Arm:

A Pedagogical Overview”, IEEE Robotic and Automation Magazine.

[10] Ortega J., Nicto L., 2007, “Design and Validation of an Open Architecture for an Industrial Robot” IEEE International Symposium on Industrial Electronic.

[11] Jang-Monk Kim, Cheul-U Kim, 2006, “Ultra Precise Position Estimation of Servomotor using Analog Quadrature Encoder”, Twenty-first annual IEEE.

[12] Ralf Wegener Senicar F., Junge C., 2007, “Low Cost Position Sensor for Permanent Magnet Linear Drive”, 7th International Conference on Power Electrics and Drive Systems.

[13] Antonio Creus Solé, 2007, “Neumatica e hidráulica” 6^a edicion, Alfaomega Marcombo Boixareu Editores.

[14] Jesús fraile mora, 2008, “Maquinas eléctricas” 6^a edición, McGrawHill

[15] Andrzej M., 2001, “Control of induction motors” Academic Press.

[16] Sibel Zurlu, 2011, “Online speed control of a brushless AC servomotor based on artificial neural networks”, Turk J Elec Eng & Comp Sci, vol 19.

[17] Referencia Mitsubishi.

[18] Sheggi S., Francesco Chinello, 2010, “KCT: a MATLAB toolbox for motion control of KUKA robot manipulators” IEEE International Conference on Robotic and Automation.

[19] Ramón Pallás, 2007, “Sensores y acondicionadores de señal” 4^a edición, Alfaomega Marcombo Boixareu Editores.

- [20] <http://www.robix.com/> consultado febrero 2011.
- [21] <http://mindstorms.lego.com/en-us/Default.aspx> consultado febrero 2011.
- [22] <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/> consultado diciembre 2012.

