REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL” bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA, ENLAZADO CON LABVIEW MEDIANTE INTERFAZ USB

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

ORLANDO GABRIEL IZA IZA
gavriel_io@hotmail.es

DIRECTOR: Ing. ANA VERÓNICA RODAS BENALCÁZAR
ana.rodas@epn.edu.ec

QUITO, Julio 2015

DECLARACIÓN

Yo, Iza Iza Orlando Gabriel, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y la normativa institucional vigente.

_____

Iza Iza Orlando Gabriel

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Iza Iza Orlando Gabriel, bajo mi supervisión.

Ing. Ana Verónica Rodas

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por bendecirme con la salud y la presencia de mis padres en esta etapa importante de mi vida.

Agradecer a mi Padre Sergio y en especial a Azunción, mi madre quién ha sido mi mejor amiga y es para mí un ejemplo de sacrificio y constancia.

Un profundo agradecimiento a Mely, Janeth, Pauly, Valeria, Marco, Carlos y Neyser por todo su apoyo.

DEDICATORIA

A todos y cada uno de los miembros de mi hogar, Sergio y Azunción mis padres; Mely, Janeth y Paulina, mis hermanas; quienes me han brindado su amor, comprensión, paciencia y apoyo incondicional. Sobre todo por haber compartido conmigo los buenos y malos momentos vividos en el camino que me condujo a conquistar esta meta.

CONTENIDO

CERTIFICACIÓN ii

AGRADECIMIENTO iii

DEDICATORIA iv

CONTENIDO v

RESUMEN xi

PRESENTACIÓN xii

CAPÍTULO 1 1

MARCO TEÓRICO 1

1.1 INTRODUCCIÓN 1

1.2 MÓDULOS O PLANTAS DE ENTRENAMIENTO 2

1.2.1 OBJETIVO DE LOS MÓDULOS O PLANTAS 2

1.3 MÓDULO PCT23 MKII DE ARMFIELD 2

1.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA 3

1.4 EDAS/VIS SISTEMA EDIBON DE ADQUISICIÓN DE DATOS /SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL 4

1.4.1 ENTRENADOR DE TRANSDUCTORES E INSTRUMENTACIÓN 5

1.5 ENTRENADORES DE INGENIERÍA QUANSER (QNET) DE NATIONAL INSTRUMENTS 6

1.5.1 ENTRENADOR DE CONTROL DE MOTOR DC 6

1.5.2 ENTRENADOR QNET HVAC 7

1.5.3 ENTRENADOR DE DESPEGUE Y ATERRIZAJE QNET-VTOL 8

1.5.4 ENTRENADOR DE PÉNDULO ROTATORIO INVERTIDO 8

1.5.5 ENTRENADOR QNET DE SENSORES DE MECATRÓNICA 9

1.5.6 ENTRENADOR QNET MIOELÉCTRICO 10

1.6 EPC DE NATIONAL INSTRUMENTS 10

1.6.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE LA DAQ 11
1.6.2 COMPONENTES DE LA EPC 11
1.7 MÓDULO PLANTEADO 13
1.7.1 DESCRIPCIÓN GENERAL 13
CAPÍTULO 2 15
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA 15
2.1 ESTRUCTURA DEL HARDWARE 15
2.2 FUENTES DE ALIMENTACIÓN 17
2.2.1 ADAPTADOR DE VOLTAJE 12 VDC A 2 A 17
2.2.2 FUENTE DE 5VDC 18
2.2.3 FUENTE DE 3.3 VDC 18
2.3 MICROCONTROLADORES DEL MÓDULO MESCI_USB 19
2.3.1 MICROCONTROLADOR PIC18F2550 19
2.3.2 MICROCONTROLADOR ATXMEGA32A4 21
2.3.3 MICROCONTROLADOR ATMEGA8 24
2.4 CIRCUITO DE COMUNICACIÓN USB2.0 Y COMUNICACIÓN SERIAL USART 25
2.4.1 DISEÑO DEL CIRCUITOCOMUNICACIÓN USB 2.0 Y COMUNICACIÓN SERIAL USART 25
2.5 CIRCUITO PARA SENSOR DE TEMPERATURA LM35 27
2.5.1 SENSOR DE TEMPERATURA LM35 27
2.5.2 CIRCUITO PARA LECTURA DE TEMPERATURA 27
2.6 CIRCUITO PARA CONTROL DEL SERVOMOTOR 27
2.6.1 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR 28
2.7 CIRCUITO PARA ACELERÓMETRO LSM303DLH 29
2.7.1 SENSOR LSM303DLH 29
2.8 CIRCUITO PARA ENTRADAS DIGITALES 31

2.8.1 DISEÑO CIRCUITO DE ENTRADAS DIGITALES 32
2.9 CIRCUITO PARA SALIDAS DIGITALES 34
2.10 CIRCUITO PARA SALIDAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE 35
2.10.1 CONVERSOR DIGITAL ANALÓGICO MCP4822 35
2.10.2 AMPLIFICADOR OPERACIONAL AD822 36
2.10.3 DISEÑO CIRCUITO SALIDAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE 36
2.11 CIRCUITO PARA SALIDAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE 37
2.12 CIRCUITO DE ENTRADAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE 41
2.13 CIRCUITO PARA ENTRADAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE 43
2.14 CIRCUITO PARA SALIDAS TIPO RELÉ 44
2.15 CIRCUITO PARA CONTROL DE LA LÁMPARA 46
2.16 CIRCUITO PARA CONTROL DE MOTOR DC Y VENTILADOR 49
2.16.1 DRIVER L293D (PUENTE H) 50
2.17 CIRCUITO PARA MANEJO DEL LCD 16X4 51
2.17.1 LCD 16 X 4 51
2.17.2 CIRCUITO PARA MANEJO DEL LCD 52
2.18 CIRCUITO PARA SALIDAS TIPO PWM 53
2.19 CAPACITORES DE DESACOPLO Y CIRCUITOS EXTRAS 53
2.19.1 CAPACITORES DE DESACOPLO 53
2.19.2 CIRCUITOS EXTRAS 54
CAPÍTULO 3 55
DESARROLLO DEL SOFTWARE DE SOPORTE 55
3.1 COMPILADOR PCWHD 55
3.1.1 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO 55
3.2 BASCOM – AVR 56
3.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROGRAMAS 57
3.3.1 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL 57

3.3.2 DIAGRAMA DE FLUJO COMUNICACIÓN USB Y COMUNICACIÓN SERIAL USART ENTRE EL PIC18F2550 Y ATXMEGA32A4 59
3.3.3 DIAGRAMA DE FLUJO ENTRADAS/SALIDAS DIGITALES 60
3.3.4 DIAGRAMA DE FLUJO SALIDAS ANALÓGICAS 62
3.3.5 DIAGRAMA DE FLUJO ENTRADAS ANALÓGICAS 63
3.3.6 DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE VELOCIDAD MOTOR DC .. 65
3.3.7 DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE TEMPERATURA 66
3.3.8 DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE POSICIONAMIENTO SERVOMOTOR 68
3.3.9 DIAGRAMA DE FLUJO SALIDAS TIPO RELÉ 70
3.3.10 DIAGRAMA DE FLUJO SALIDAS PWM 71
3.3.11 DIAGRAMA DE FLUJO MANEJO LCD 72
3.4 INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW 73
3.4.1 VENTANA DE PRESENTACIÓN 74
3.4.2 VENTANA DE E/S DIGITALES Y TIPO RELÉ 74
3.4.3 VENTANA DE ENTRADAS Y SALIDAS ANALÓGICAS 75
3.4.4 VENTANA PARA CONTROL DE MOTOR DC Y SERVOMOTOR ... 76
3.4.5 VENTANA PARA CONTROL DE TEMPERATURA 77
3.4.6 VENTANA PARA CONTROL DE SALIDAS TIPO PWM 78
3.4.7 VENTANA PARA CONTROL DE ENSAMBLE SOLIDWORKS 79
3.4.8 VENTANA DE INFORMACIÓN 80
3.5 NI VISA (CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO USB) 81
3.5.1 CONFIGURACIÓN DE NI-VISA PARA CONTROL DEL DISPOSITIVO USB 81
3.5.2 GENERACIÓN DEL ARCHIVO .INF 81
3.5.3 INSTALACIÓN DEL ARCHIVO .INF 85
3.6 ENLACE LABVIEW- SOLIDWORKS 86

CAPÍTULO 4 89

PRUEBAS Y RESULTADOS 89

4.1 PRUEBAS DE RECONOCIMIENTO DEL DISPOSITIVO USB 89

4.1.1 ADMINISTRADOR DE DISPOSITIVOS 90

4.1.2 VISA INTERACTIVE CONTROL 90

4.1.3 NATIONAL INSTRUMENTS MEASUREMENT & AUTOMATION EXPLORER (MAX) 91

4.1.4 DISPOSITIVOS E IMPRESORAS 92

4.1.5 QUITAR HARDWARE DE FORMA SEGURA 93

4.2 DISPOSITIVO USB Y LABVIEW 94

4.2.1 INTERFAZ INICIAL DE PRUEBAS 95

4.2.2 CIRCUITO INICIAL DE PRUEBAS 95

4.3 PRUEBAS DESARROLLADAS CON MÓDULO MESCI_USB 97

4.3.1 PRUEBA DE VOLTAJES 98

4.3.2 PRUEBA DE SALIDAS DIGITALES 99

4.3.3 PRUEBA DE ENTRADAS DIGITALES 100

4.3.4 PRUEBA DE SALIDAS TIPO RELÉ 101

4.3.5 PRUEBA DE SALIDAS TIPO PWM 102

4.3.6 PRUEBA SALIDAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE (4-20mA) 104

4.3.7 PRUEBA SALIDAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE (0-5VDC) 105

4.3.8 PRUEBA ENTRADAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE (4-20 mA) 107

4.3.9 PRUEBA ENTRADAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE (0-5VDC) 109

4.3.10 PRUEBA CONTROL DE POSICIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR 110

4.3.11 PRUEBA DE CONTROL DE TEMPERATURA 112

4.3.12 PRUEBA DE CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR DC 116

4.3.13 PRUEBA DE CONTROL DE ANIMACIÓN DE ENSAMBLE 118

CAPÍTULO 5 120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 120
REFERENCIAS BIBLIOGÁFICAS..... 124
ANEXO A 126
ANEXO B 127
ANEXO C 128
ANEXO D 132
ANEXO E 133

RESUMEN

La gran mayoría de procesos o sistemas de control, hace uso de tarjetas de adquisición de datos para la transmisión de datos hacia una PC, lo cual incrementa el costo de dichos sistemas o procesos. Los módulos de entrenamiento a nivel académico no se escapan de esta falencia, como es el caso del módulo EPC de National Instruments disponible en el laboratorio de Instrumentación de la Escuela Politécnica Nacional. Es por ello que el presente proyecto plantea el diseño e implementación de un módulo de instrumentación electrónica con interfaz USB, lo cual permitirá enlazar el módulo con Labview a través de interfaz de comunicación USB.

El módulo permitirá experimentar con sistema de control de temperatura, control de velocidad y sentido de giro de un motor DC, control de posicionamiento de un servomotor, manejo de entradas/salidas tanto digitales como analógicas, manejo de salidas tipo relé y tipo PWM.

Contará con un sistema para el control de temperatura en el interior del módulo desde la temperatura ambiente hasta una temperatura máxima de 60°C, una lámpara a la cual se puede realizar control tipo ON/OFF o control de fase, un ventilador y un sensor LM35. El control del motor DC se lo realiza desde una velocidad mínima aproximada 360 RPM hasta una velocidad máxima de 2700 RPM; en el caso del servomotor se podrá controlar la posición en la cual se ubica el eje del servomotor en el rango de 0° a 180°. En cuanto a recursos de entradas y salidas que pone a disposición el módulo son las siguientes: 8 entradas y 8 salidas digitales, 2 salidas tipo relé, 2 salidas tipo PWM, 2 entradas y 2 salidas analógicas de corriente (4 – 20) mA, 2 entradas y 2 salidas analógicas de voltaje (0-5) VDC.

Otra de las opciones que brinda el módulo es la posibilidad de vincular o enlazar Labview con Solidworks lo cual permite analizar el comportamiento de ensambles antes de ser implementados físicamente; en este caso se podrá controlar los movimientos de un brazo robótico, por medio de controles disponibles en la interfaz de usuario.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto lleva por título “Diseño e implementación de un Módulo de Instrumentación Electrónica, enlazado con Labview mediante Interfaz USB” y pretende ser una herramienta de desarrollo ya que pone a disposición del estudiante o usuario los típicos casos de estudio en sistemas de control: control de temperatura, control de velocidad de un motor DC, manejo de entradas/salidas analógicas de voltaje (0 – 5V) y corriente (4 – 20mA), entradas/salidas digitales, salidas tipo relé y tipo PWM que permitirán desarrollar aplicaciones que involucren el manejo de actuadores y sensores.

El desarrollo e implementación del Módulo se describe a través de cinco capítulos, los cuales se indican a continuación.

En el primer capítulo denominado Marco Teórico se hace referencia a algunos módulos didácticos disponibles comercialmente, sus funciones y características; se indica también la función y características del módulo cuyo diseño y desarrollo se describe en este documento.

El segundo capítulo se refiere al Diseño del Hardware del Sistema, en el cual se indican los circuitos desarrollados y las características de los dispositivos que conforman dichos circuitos.

El tercer capítulo referente al Desarrollo del Software del Proyecto hace una descripción del software empleado, se indica la lógica de los programas cargados en los microcontroladores a través de diagramas de flujo, y la configuración de los recursos empleados en los microcontroladores.

En el cuarto capítulo denominado Pruebas y Resultados se indican los resultados obtenidos durante la ejecución de las pruebas, en las cuales se verifica el cumplimiento de los objetivos planteados ya que el módulo responde satisfactoriamente.

En el quinto y último capítulo referente a las Conclusiones y Recomendaciones se indican las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del módulo, se indican

también las recomendaciones para el manejo adecuado del módulo con el fin de garantizar su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los factores que determina la eficiencia en el proceso educativo es el aprovechamiento adecuado de los recursos que se dispone, en este sentido emplear adecuadamente tanto el tiempo, como la ayuda de la tecnología es muy importante y contribuye al mejoramiento de dicho proceso.

En el campo de la electrónica, contar con módulos de entrenamiento para sistemas de control e instrumentación contribuye a optimizar el aprovechamiento del tiempo en el laboratorio, ya que al disponer de sensores y actuadores acoplados de manera que conforman sistemas de control de: nivel, caudal, temperatura, velocidad, posicionamiento, señales analógicas, señales digitales y otros, listos para emplearse, permite realizar experimentos para demostración de temas y conceptos teóricos.

Por otro lado el puerto serie y más aún el puerto paralelo poco a poco van quedando relegados empleándose en la actualidad para reducidas aplicaciones. En contraste con ello, la superpoblación de ordenadores personales trae consigo un vertiginoso crecimiento de la conectividad USB, de tal manera que en la actualidad se cuenta con una variedad de dispositivos: mouse, teclados, impresoras, discos duros, teléfonos móviles, iPod, reproductores de MP3, cámaras fotográficas, cámaras de video, los cuales se conectan hacia el computador a través del puerto USB.

En el mercado existen plantas de entrenamiento de diferentes marcas y que realizan diversas actividades; se empezará describiendo éstas, para luego del correspondiente análisis diseñar la planta o módulo de entrenamiento objeto de este proyecto.

1.2 MÓDULOS O PLANTAS DE ENTRENAMIENTO

1.2.1 OBJETIVO DE LOS MÓDULOS O PLANTAS

Los módulos de entrenamiento para control e instrumentación tienen por objetivo demostrar temas teóricos optimizando el aprovechamiento del tiempo en el laboratorio. Para su correcta manipulación se requiere que el usuario cuente con nociones respecto a los dispositivos, parámetros y variables físicas involucradas en el empleo de los módulos.

Los diferentes productores y proveedores de módulos o plantas de entrenamiento didáctico ofrecen una variedad de módulos de diferentes tamaños desde muy grandes hasta tamaños pequeños que pueden ser fácilmente transportados. Los campos en los cuales se hallan enfocados los módulos son la electro-neumática, automatización y control de procesos, robótica, instrumentación electrónica, comunicaciones y análisis de señales. Los principales proveedores son Festo, National Instruments, Lab-Volt, Schneider Electric, Edibon. A continuación se hace referencia a algunos de ellos, en los cuales se indica sus principales características y funciones.

1.3 MÓDULO PCT23 MKII DE ARMFIELD

Producido por Armfield, es un sistema didáctico de control de procesos a pequeña escala. Está compuesto de una unidad montada sobre un soporte, una consola eléctrica de mando y software de control que trabaja con Windows a través del puerto USB; la figura 1.1 muestra una imagen de este equipo.

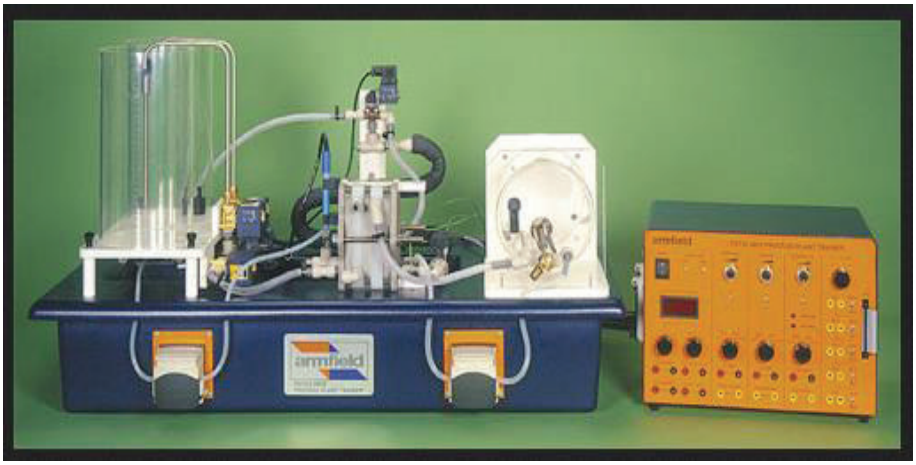


Figura 1.1. Equipo PCT23 MKII de Armfield, Tomado de [1].

1.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

Este equipo simula el proceso de la pasteurización HTST (alta temperatura - corta duración), para ello cuenta con: un tubo de retención del producto, un intercambiador de calor de tres etapas (reciclado, calentamiento y enfriamiento), dos depósitos de alimentación con sus respectivos sensores de nivel, temperatura y válvula de desvío para evacuar el producto que no ha recibido el tratamiento correcto. Para el llenado y vaciado de los depósitos cuenta con válvulas de solenoide y una bomba de alimentación; estos componentes en conjunto con la consola eléctrica permite realizar lo siguiente: control de velocidad de la bomba de alimentación, control de la potencia del calentador, medición de las variables temperatura, nivel, flujo en varias etapas del proceso; manejo de salidas digitales para controlar las válvulas de solenoide.

Además ofrece un software en el cual se muestra el diagrama esquemático de la planta tal como se puede apreciar en la figura 1.2 y con el cual el usuario puede interactuar.

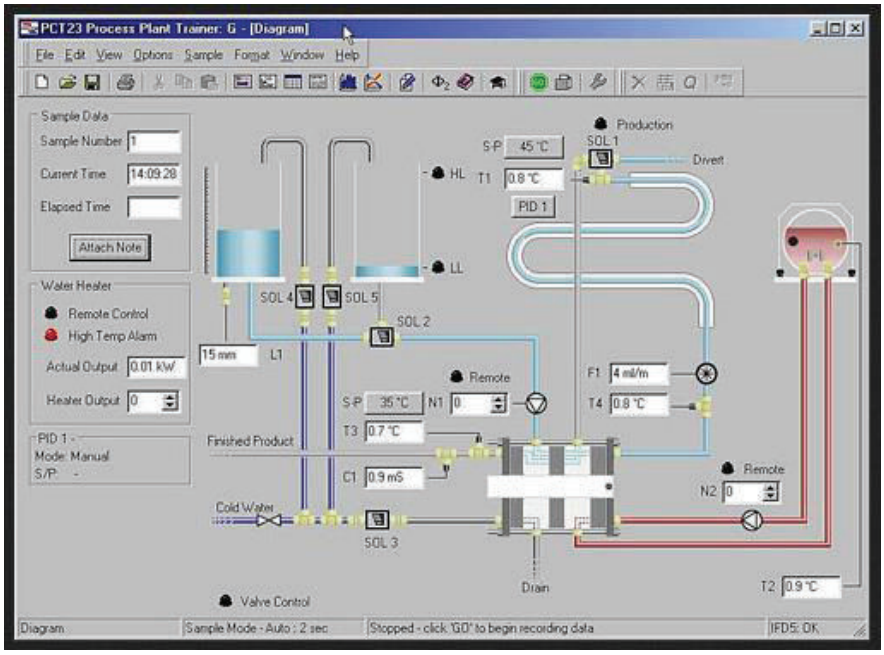


Figura 1.2. Interfaz Gráfica de PCT23 MKII, Tomado de [1].

1.4 EDAS/VIS SISTEMA EDIBON DE ADQUISICIÓN DE DATOS /SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

El Sistema EDAS/VIS es un conjunto de componentes destinados a la adquisición de datos que permite enviar la información generada en los módulos o equipos didácticos hacia el computador, en donde dicha información puede ser analizada con un software que permite desarrollar sistemas de instrumentación virtual.

Varios módulos pueden ser acoplados al Sistema de Adquisición de Datos EDAS/VIS: el módulo para estudios de electrónica básica, el módulo de comunicaciones básicas y el entrenador de transductores e instrumentación SAIT.

Pone a disposición los siguientes recursos:

- 16 Entradas analógicas, 12 para voltaje y 2 para corriente.
- 2 Salidas analógicas.
- 24 Entradas/Salidas digitales con sus respectivos diodos leds indicadores de estado.

- 4 Interruptores de señal digitales 0 – 5 V.
- 2 Potenciómetros de señal analógica +/-12 V.
- Fuente de alimentación interna de 12 y 5 V.
- Conector para la tarjeta de Adquisición de Datos.

Para la conexión entre la interfaz de adquisición de datos y el computador se utiliza una tarjeta de adquisición de datos; el software permite visualizar el estado de las diferentes entradas y salidas, puede trabajar como: osciloscopio digital, multímetro, generador de funciones, analizador de espectro, registrador de transitorios, generador y analizador lógico, la figura 1.3 muestra los componentes del sistema EDAS/VIS.

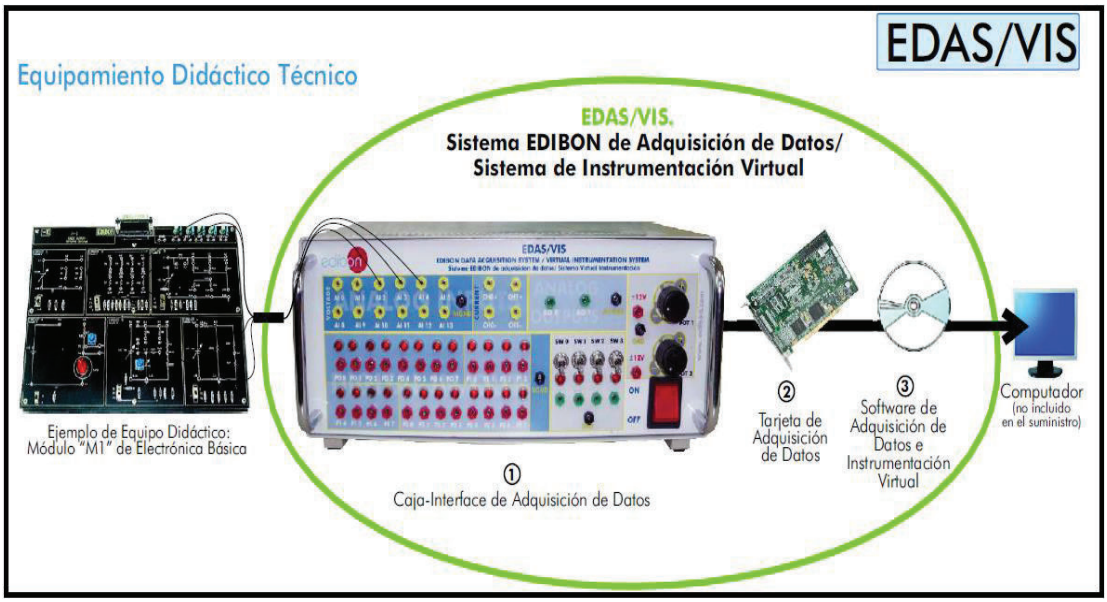


Figura 1.3. Sistema EDAS/VIS de EDIBON, Tomado de [2].

1.4.1 ENTRENADOR DE TRANSDUCTORES E INSTRUMENTACIÓN

El Entrenador de Transductores e Instrumentación SAIT se muestra en la figura 1.4. Este equipo permite mostrar el funcionamiento y características de los dispositivos más comunes utilizados en sistemas electrónicos (relé DC, motor DC, amplificadores operacionales en diferentes configuraciones, sensor de

temperatura LM335, sensor de flujo de aire, sensor de humedad y presión, sensor inductivo, sensor de efecto Hall, micrófono, entre otros). Estos dispositivos se hallan alojados sobre una base y cuenta con fuente de alimentación tanto eléctrica como neumática.

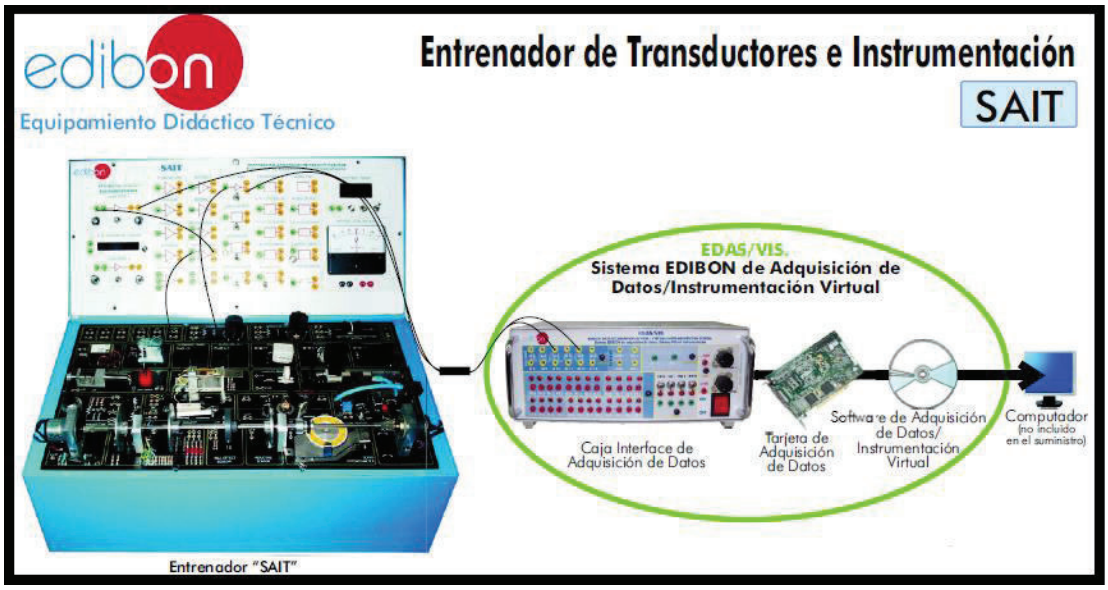


Figura 1.4. Entrenador de Transductores e Instrumentación SAIT, Tomado de [3].

1.5 ENTRENADORES DE INGENIERÍA QUANSER (QNET) DE NATIONAL INSTRUMENTS

Son un conjunto de pequeños módulos de entrenamiento de ingeniería, con aplicaciones específicas los cuales se los hace referencia a continuación.

1.5.1 ENTRENADOR DE CONTROL DE MOTOR DC

El entrenador de control de motor DC se muestra en la figura 1.5, este permite experimentar el control de un motor DC, a través de la configuración de velocidad y sentido de giro.

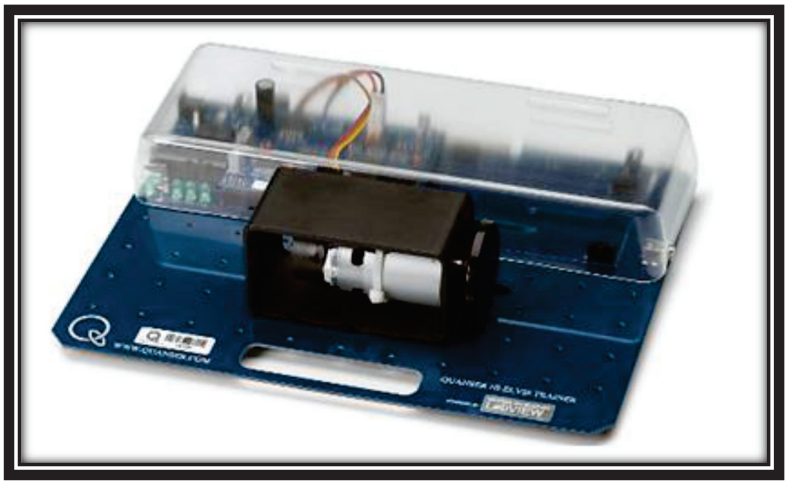


Figura 1.5. Entrenador de Control de Motor DC (QNET), Tomado de [4].

1.5.2 ENTRENADOR QNET HVAC

La planta de entrenamiento QNET – HVAC consiste en un sistema de control de temperatura en el interior de una cámara, compuesto básicamente con un sensor electrónico de temperatura, una lámpara de halógeno de intensidad variable y un ventilador, permite experimentar conceptos relacionados al control termodinámico; una imagen de este equipo se muestra en la figura 1.6.

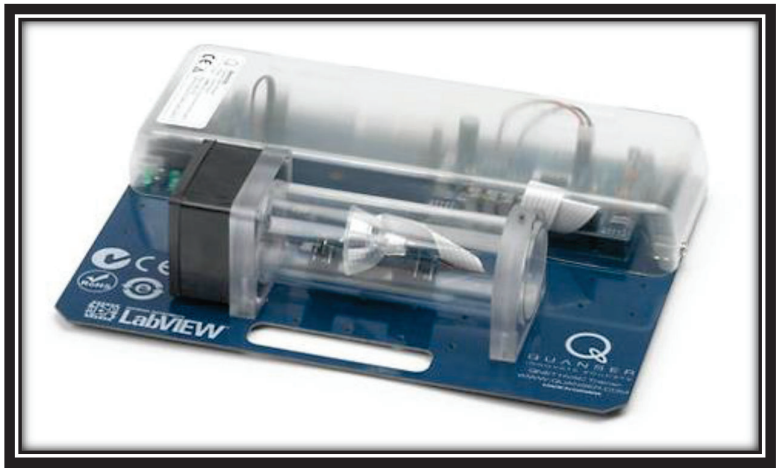


Figura 1.6. Entrenador QNET – HVAC, Tomado de [5]

1.5.3 ENTRENADOR DE DESPEGUE Y ATERRIZAJE QNET-VTOL

El entrenador de despegue y aterrizaje vertical (QNET-VTOL) es un modo de helicóptero de 1 grado de libertad, construido con un ventilador de velocidad variable y un brazo móvil, permite experimentar fundamentos relacionados al control de movimiento, dinámica aeroespacial y cinemática; una imagen de este equipo se muestra en la figura 1.7.

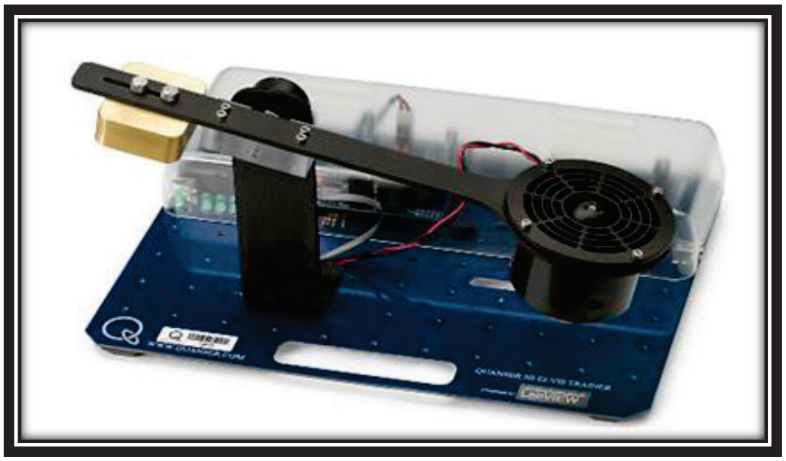


Figura 1.7. Entrenador QNET –VTOL, Tomado de [6].

1.5.4 ENTRENADOR DE PÉNDULO ROTATORIO INVERTIDO

El entrenador del péndulo rotatorio invertido de QNET consiste en un sistema de control que balancea una barra vertical en la punta de un brazo rotatorio, con el cual se pueden desarrollar temas como: modelado de sistemas, control de equilibrio. La planta tiene un servomotor de DC, amplificador de potencia y codificadores ópticos para detectar la posición del péndulo; una imagen de este equipo se muestra en la figura 1.8.

Figura 1.8. Entrenador Péndulo Rotatorio Invertido, Tomado de [7].

1.5.5 ENTRENADOR QNET DE SENSORES DE MECATRÓNICA

El entrenador de sensores de Mecatrónica de QNET permite experimentar las características de varios sensores analógicos y digitales, sensores digitales como son: conmutador push-button, conmutadores ópticos y conmutador magnético de efecto Hall y sensores analógicos como: potenciómetros, sensor óptico de distancia, campo magnético, presión, temperatura y piezopelícula; una imagen de este equipo se muestra en la figura 1.9.

Figura 1.9. Entrenador QNET de Sensores de Mecatrónica, Tomado de [8].

1.5.6 ENTRENADOR QNET MIOELÉCTRICO

El entrenador Mioeléctrico de QNET utiliza los principios de electromiografía (EMG), en el cual se puede controlar un servomotor por medio de la contracción de músculos. Permite experimentar con funciones básicas de procesamiento de datos y esquemas de control. El entrenador tiene un servomotor PWM con amplificador de potencia integrado y “pinza” para simular un actuador de prótesis; una imagen de este equipo se muestra en la figura 1.10.

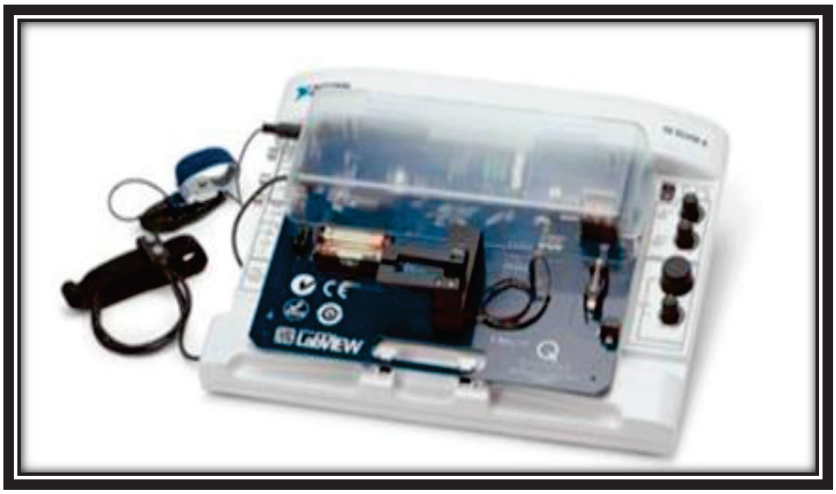


Figura 1.10. Entrenador QNET Mioeléctrico, Tomado de [9].

Los entrenadores QNET antes citados son empleados en conjunto con NI ELVIS (NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite), y por medio de éste se puede integrar hacia Control Design and Simulation del Software NI Labview.

1.6 EPC DE NATIONAL INSTRUMENTS

Es un equipo electrónico que incluye varios sensores y actuadores de sistemas de control e instrumentación; para conectarse hacia el computador se requiere una tarjeta de adquisición de datos DAQ, como lo es la USB-6009 o similar y la plataforma de desarrollo gráfico Labview de National Instruments, tal como se muestra en la figura 1.11.

Figura 1.11. Entrenador EPC de National Instruments.

1.6.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE LA DAQ

Los requerimientos mínimos que debe tener la tarjeta de adquisición de datos DAQ para poder emplearse con el entrenador EPC son las siguientes:

- 4 Salidas digitales tipo TTL.
- 1 Entrada analógica de 14 bits, 40 Ksps.
- 1 Salida analógica de 12 bits, 100 sps, de 0-5 Voltios.
- 1 Entrada contador de 5MHz.

1.6.2 COMPONENTES DE LA EPC

Bombillo halógeno: Se cuenta con un bombillo halógeno destinado a producir calor en el ambiente interior de la EPC, este dispositivo simula un dispositivo de calentamiento ON/OFF.

Sensor de temperatura: Cuenta también con un elemento sensor de temperatura LM35, el cual convierte la señal de temperatura en una señal de voltaje.

Ventilador: Este elemento permite sacar el aire caliente del interior de la EPC, enfriando el ambiente interior; actúa como una perturbación al sistema térmico.

Motor DC: El entrenador EPC cuenta también con un motor de corriente continua, en conjunto con un encoder de 36 pulsos por revolución para medir la velocidad del motor.

Motor de Pasos: Dispone también de un motor de pasos unipolar con cuatro entradas digitales para las bobinas de dicho motor, en conjunto con el motor se tiene un encoder de 36 pulsos por revolución de modo que cada pulso representa 10º.

Relé de propósito general: Se cuenta con un relé electromecánico para aplicaciones de conmutación de propósito general, con un contacto común, un contacto normalmente abierto y un contacto normalmente cerrado.

Leds indicadores: Se cuenta con leds los cuales indican si el entrenador se halla energizado o no, el estado activo del halógeno, la secuencia de activación de las bobinas del motor de pasos entre otras cosas. Los componentes de la EPC se muestran en la figura 1.12.

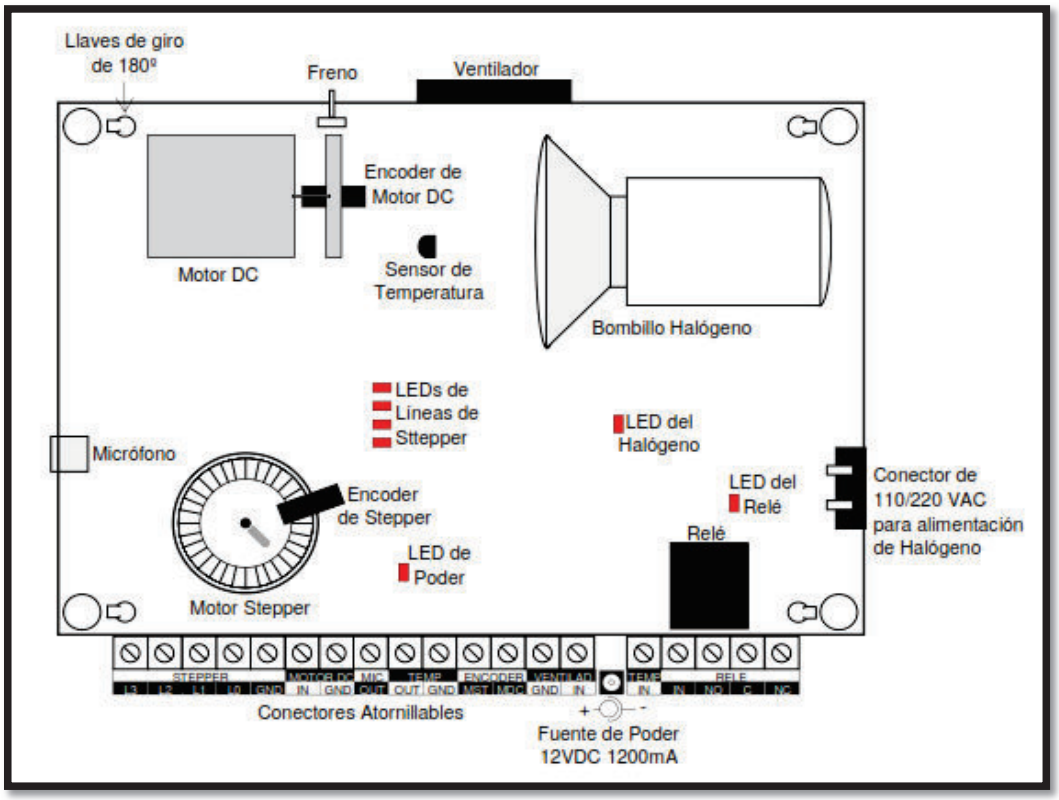


Figura 1.12. Esquema de Componentes de la EPC, Tomado de [10].

1.7 MÓDULO PLANTEADO

En función de las iníciales que identifican a este módulo se plantea conocerlo con el nombre MESCI_USB (Módulo de Entrenamiento para Sistemas de Control e Instrumentación, con interfaz USB 2.0).

1.7.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

En este proyecto se va a realizar el diseño e implementación de un módulo de instrumentación electrónica, para el cual se contempla las siguientes consideraciones:

El módulo contará con un motor DC, del cual se podrá realizar control tanto de velocidad como de sentido de giro; la velocidad del motor se establece en función de la relación de trabajo de una señal PWM. El motor dispondrá de un encoder con el fin de obtener la lectura de velocidad (RPM). Se dispondrá de un servomotor del cual se tendrá la opción de controlar la posición del eje de dicho elemento.

Se contará con un sensor de temperatura LM35, el cual permitirá medir la temperatura del ambiente interior del módulo; junto con este sensor se dispondrá de un conjunto formado por una lámpara y un ventilador para control de temperatura.

El módulo pondrá a disposición del usuario 2 fuentes de alimentación de 12VDC, 2 fuentes de alimentación de 5VDC, 2 salidas tipo relé, 8 entradas y 8 salidas digitales, 2 entradas y 2 salidas analógicas de corriente, 2 entradas y 2 salidas analógicas de voltaje, 2 salidas tipo PWM. El estado y parámetros de estas entradas y salidas se controlarán desde una interfaz gráfica desarrollada en la plataforma Labview.

Este módulo también permitirá experimentar el comportamiento de un acelerómetro comercial mediante la animación de un objeto 3D. El diseño del objeto 3D se lo realizará en el software Solidworks, en Labview se podrá

visualizar los valores y las variaciones de las señales proporcionada por el acelerómetro, para ello se enlazará Labview con Solidworks.

El módulo contará con un medio de visualización de valores de los parámetros relacionados con los dispositivos presentes en el módulo, es decir un LCD, en el cual se podrá visualizar parámetros como velocidad del motor DC, temperatura del módulo, valor de las entradas y salidas analógicas y PWM. Así mismo, se enlazará con la HMI desarrollada en Labview mediante interfaz USB 2.0, para el envío y recepción de datos.

El presente proyecto servirá para la realización de diferentes prácticas de laboratorio para los estudiantes de Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional. Al ser este un módulo destinado a ser manipulado por estudiantes, contará con un manual de usuario para el manejo adecuado de los dispositivos y periféricos presentes en el módulo.

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

En el presente capítulo se describe el desarrollo del hardware del proyecto, en primer lugar se indican los dispositivos y circuitos empleados para obtener los voltajes requerido tanto para la parte de control como para la parte de potencia. Seguidamente se describen los dispositivos empleados y el diseño de circuitos de control y comunicación USB, con los elementos necesarios para su funcionamiento; en los dos casos se ha contemplado e incluido dispositivos de protección necesario para evitar daños en el módulo.

2.1 ESTRUCTURA DEL HARDWARE

En la figura 2.1 se muestra de manera gráfica cómo se hallan distribuidos los elementos dentro del hardware. Se cuenta con un microcontrolador ATXMEGA32A4 encargado del manejo de las entradas y salidas analógicas de voltaje y corriente, lectura de temperatura, control del ventilador, lámpara, servomotor y motor DC, manejo de las salidas tipo relé y tipo PWM, lectura de las señales del acelerómetro LSM303DLH. El microcontrolador ATXMEGA32A4 se comunica tanto con un microcontrolador ATMEGA8, como con un microcontrolador PIC18F2550 vía serial por el puerto USART; el PIC18F2550 es el encargado de gestionar la comunicación USB con el computador, además de controlar las entradas y salidas digitales, mientras que el ATMEGA8 se encarga únicamente del manejo del LCD.

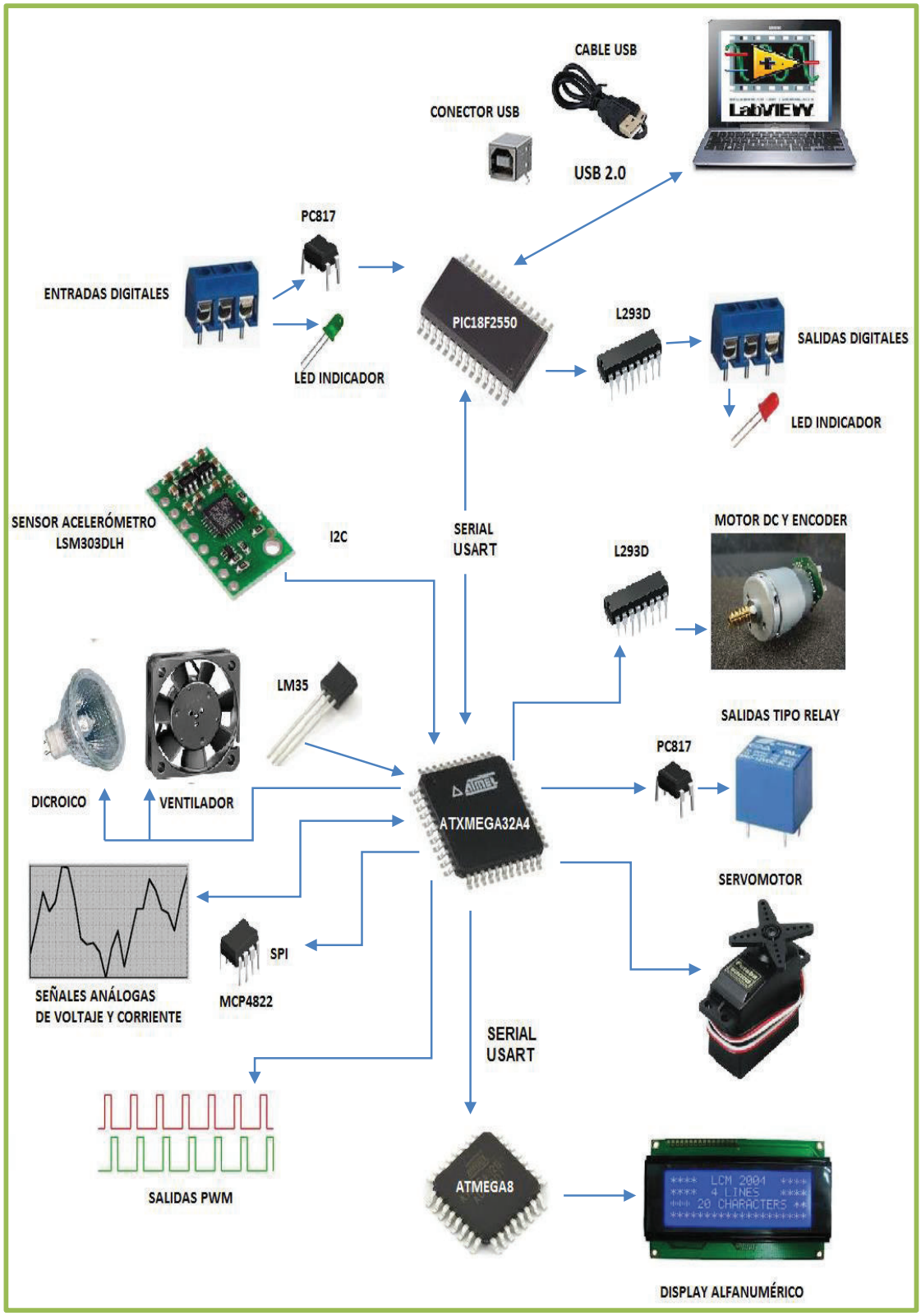


Figura 2.1. Distribución de Elementos de Hardware.

Los circuitos electrónicos del hardware del proyecto se han dividido en tres tarjetas electrónicas, en la tarjeta 1 se tienen los microncontroladores PIC18F2550 y ATXMEGA32A4, con los elementos necesarios para la comunicación USB y la comunicación serial USART entre los dos microcontroladores.

En la tarjeta 2 se tienen el resto de circuitos del módulo MESCI_USB a excepción del circuito para manejo del LCD, que se ha implementado en la tarjeta 3.

2.2 FUENTES DE ALIMENTACIÓN

2.2.1 ADAPTADOR DE VOLTAJE 12 VDC A 2 A

Se utiliza un adaptador comercial de voltaje, cuyo voltaje de entrada puede estar en el rango de 100 a 240 VAC 60 Hz, proporciona un voltaje de salida 12 VDC y una corriente máxima de 2 A. Con este elemento se obtiene el voltaje VCC1 (12 VDC) usado para: la alimentación del módulo regulador reductor de voltaje, la alimentación del integrado AD822, la alimentación de los relés y para alimentar al motor DC. En la figura 2.2 se muestra una imagen del adaptador de voltaje.

Figura 2.2. Adaptador de Voltaje 12 VDC.

2.2.2 FUENTE DE 5VDC

Para obtener la fuente de 5 VDC se utiliza un módulo regulador reductor de voltaje DC-DC (LM2596 DC-DC STEP-DOWN), construido con el integrado LM2596. El voltaje de entrada puede estar en el rango de (4.5 – 35) VDC y el voltaje de salida es regulable en el rango de (1.25 – 30) VDC, con una corriente de salida máxima de 2 A.

En este caso el voltaje de entrada esVCC1 (12 VDC)y se regula para obtener el voltaje de salida de VCC (5 VDC); el esquema del circuito se presenta en la figura 2.3.

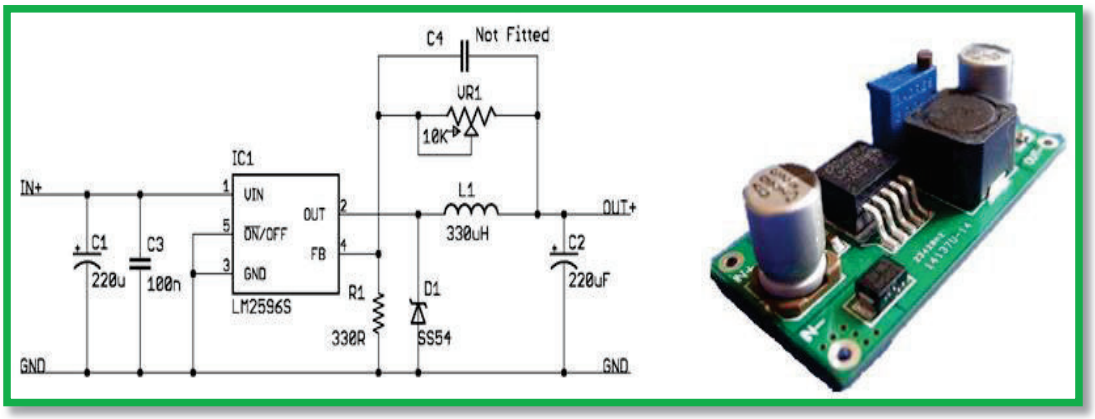


Figura 2.3. Regulador Reductor de Voltaje LM2596**.**

2.2.3 FUENTE DE 3.3 VDC

Para obtener el voltaje de 3.3 VDC se utiliza un regulador de voltaje AMS117-3.3 que tiene un voltaje de entrada de 5 VDC y proporciona un voltaje de salida de 3.3 VDC y una corriente máxima de 0.8 A; en conjunto con el regulador de voltaje se utilizan filtros capacitivos, tal como se observa en la figura 2.4.

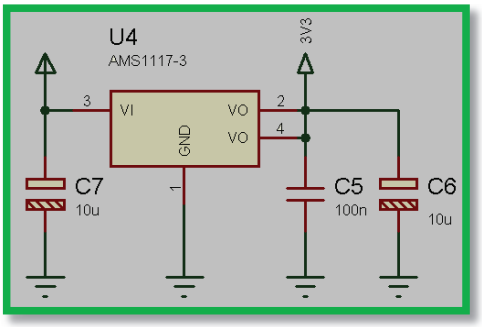


Figura 2.4. Circuito Fuente de Voltaje 3.3 VDC.

El voltaje de 120 VAC necesario para la lámpara se lo obtiene mediante un cable de poder que se conecta a la red de distribución y un interruptor localizado en una de las paredes del módulo.

2.3 MICROCONTROLADORES DEL MÓDULO MESCI_USB

2.3.1 MICROCONTROLADOR PIC18F2550

Este microcontrolador se seleccionó principalmente por disponer de comunicación USB2.0 de alta velocidad, poder trabajar hasta 48 MHz y contar con un sistema de prescaler para la configuración del módulo USB. Adicionalmente dispone de recursos típicos en microcontroladores como los que se indican a continuación.

Recursos:

- Módulo de Interfaz USB 2.0
- 10 Canales ADC de 10 bits.
- 4 Timers (Timer 0 a Timer 3). 1 de 8 bits y 3 de 16 bits.
- 2 Módulos de captura/comparación/PWM.
- Interfaces de comunicación EUSART, SPI, I2C.
- 20 Fuentes de interrupción (3 externas).
- Resistencias de pull-ups programables en el puerto B.
- Función de MCLR opcional.

En la figura 2.5 se muestra la distribución de pines del microcontrolador PIC18F2550.

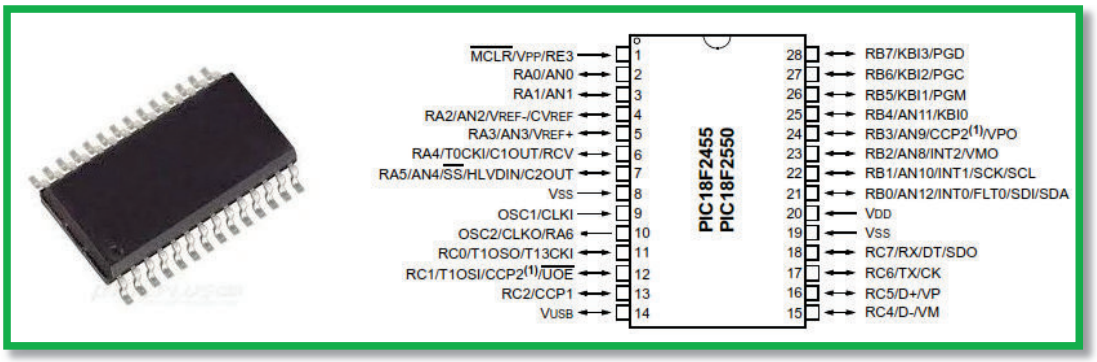


Figura 2.5. Microcontrolador PIC18F2550.

Este microcontrolador se encarga del manejo de las entradas y salidas digitales, se comunica con el microcontrolador ATXMEGA32A4 vía serial USART y con el computador (Labview) mediante USB.

En la tabla 2.1 se indica los recursos utilizados del microcontrolador PIC18F2550.

Tabla 2.1. Recursos Utilizados del PIC18F2550.

RECURSOS UTILIZADOS DEL PIC 18F2550		
Nº	**PIN**	**APLICACIÓN**
1	RA0	ENTRADA DIGITAL 1
2	RA1	ENTRADA DIGITAL 2
3	RA2	ENTRADA DIGITAL 3
4	RA3	ENTRADA DIGITAL 4
5	RA4	ENTRADA DIGITAL 5
6	RA5	ENTRADA DIGITAL 6
7	OSC1	CRISTAL OSCILADOR (16MHz).
8	OSC2	CRISTAL OSCILADOR (16MHz).
9	RB0	SALIDA DIGITAL 1
10	RB1	SALIDA DIGITAL 2

11	RB2	SALIDA DIGITAL 3
12	RB3	SALIDA DIGITAL 4
13	RB4	SALIDA DIGITAL 5
14	RB5	SALIDA DIGITAL 6
15	RB6	SALIDA DIGITAL 7
16	RB7	SALIDA DIGITAL8
17	RC0	ENTRADA DIGITAL 7
18	RC1	ENTRADA DIGITAL 8
19	RC2	LED TESTIGO COMUNICACIÓN USB (Indica el funcionamiento correcto de la comunicación USB.)
20	RC4	COMUNICACIÓN USB (D-)
21	RC5	COMUNICACIÓN USB (D+)
22	RC6	COMUNICACIÓN SERIAL (TX)
23	RC7	COMUNICACIÓN SERIAL (RX)

2.3.2 MICROCONTROLADOR ATXMEGA32A4

Este microcontrolador tiene una velocidad de procesamiento de hasta 32 MHz con oscilador interno o externo, los recursos con los que cuenta son:

Recursos:

- 5 Timers/Counters de 16 bits (Comparador, Captura o PWM).
- 5 Puertos USART.
- 2 Puertos I2C.
- 2 Puertos SPI.
- 12 Canales ADC de 12 Bits.
- 2 Canales DAC de 12 Bits.
- 2 Comparadores Analógicos.
- Contador en Tiempo Real RTC de 16 Bits con oscilador independiente.
- Interrupciones externas en todos los pines E/S de propósito general.

- Interfaz de programación, prueba y depuración avanzada (PDI).
- Reloj Interno/Externo con PLL.
- Generación de interrupciones externas INT0 o INT1 en todos los pines.

En la figura 2.6 se muestra la distribución de pines del microcontrolador ATXMEGA32A4.

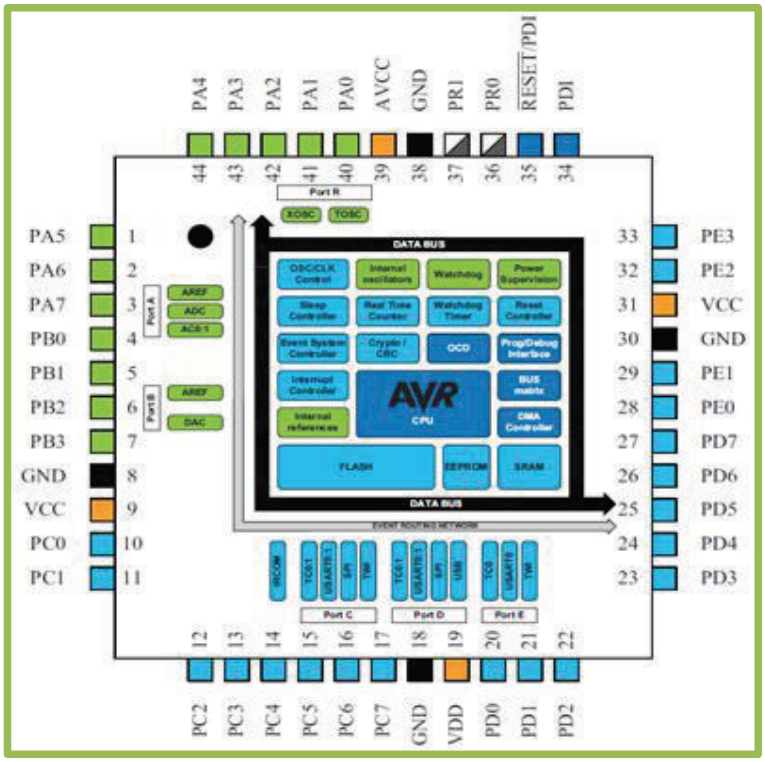


Figura 2.6. Microcontrolador ATXMEGA32A4, Tomado de [11].

Este microcontrolador se comunica vía serial USART con el PIC18F2550, del cual recibe los datos con los cuales gestiona las salidas analógicas tanto de corriente como de voltaje, las salidas tipo relé y tipo PWM, el control de los dispositivos que conforman el sistema para control de temperatura, control de velocidad del motor DC y control de posicionamiento del servomotor. Gestiona la comunicación con el acelerómetro LSM303DLH. También se comunica con el ATMEGA8 para el envío de datos a mostrarse en el LCD.A la vez envía hacia el PIC18F2550 los datos de las entradas analógicas, el dato de velocidad del motor DC, el dato de temperatura en el interior del módulo y los datos del acelerómetro.

En la tabla 2.2 se indica los recursos utilizados del microcontrolador ATXMEGA32A4.

Tabla 2.2. Recursos Utilizados del ATXMEGA32A4.

RECURSOS UTILIZADOS DEL ATXMEGA32A4.			
Nº	**PIN**	**APLICACIÓN**	**OBSERVACIÓN**
1	PA0	ENTRADA ANALÓGICA 3	Entrada1 de corriente (4 - 20 mA)
2	PA1	ENTRADA ANALÓGICA 4	Entrada 2 de corriente (4 - 20 mA)
3	PA2	ENTRADA ANALÓGICA 1	Entrada 1 de voltaje (0 – 5 VDC)
4	PA3	ENTRADA ANALÓGICA 2	Entrada 2 de voltaje (0 – 5 VDC)
5	PA4	ENTRADA ANALÓGICA 5	Señal sensor LM35 (Temperatura)
6	PA5	CONTROL VENTILADOR	ON/OFF Ventilador
7	PA7	SEÑAL DE CRUCE POR CERO	Control de fase lámpara
8	PB2	SALIDA ANALÓGICA 1	Salida 1 de corriente (4 - 20 mA)
9	PB3	SALIDA ANALÓGICA 2	Salida 2 de corriente (4 - 20 mA)
10	PC0	COMUNICACIÓN I2C (SDA)	Acelerómetro LSM303DLH
11	PC1	COMUNICACIÓN I2C (SCL)	Acelerómetro LSM303DLH
12	PC2	COMUNICACIÓN SERIAL (RX)	PIC18F2550 ⟷ ATXMEGA32A4. (BaudRate: 115200)
13	PC3	COMUNICACIÓN SERIAL (TX)	
14	PC4	COMUNICACIÓN SPI (CHIP SELECTOR)	Salidas de Voltaje (MCP4822)
15	PC5	COMUNICACIÓN SPI (DATOS)	Salidas de Voltaje (MCP4822)
16	PC7	COMUNICACIÓN SPI (SEÑAL DE RELOJ)	Salidas de Voltaje (MCP4822)
17	PD0	COMUNICACIÓN SERIAL (TX)	Manejo Display Alfanumérico.
18	PD2	SALIDA TIPO PWM 1	Frecuencia variable en rango de 500 Hz a 10 KHz.
19	PD3	SALIDA TIPO PWM 2	
20	PD4	CONTROL MOTOR DC	Señal PWM
21	PD5	SEÑAL DE DISPARO	Control de fase lámpara

22	PD6	SEÑAL 1 ENCODER MOTOR DC	32 Pulsos por revolución.
23	PE0	SALIDA TIPO RELÉ 1	
24	PE1	SALIDA TIPO RELÉ 2	
25	PE2	CONTROL SERVOMOTOR	Señal PWM
26	PE3	SENTIDO DE GIRO MOTOR DC	

2.3.3 MICROCONTROLADOR ATMEGA8

Recursos:

- 3 Timers/Counters (2 de 8 bits y 1 de 16 bits).
- 3 Canales PWM.
- Módulo conversor analógico digital de 10 bits (8 Canales)
- Puerto serial USART.
- Interfaz de comunicación SPI.
- Interfaz de comunicación I2C.
- Contador en tiempo real (RTC), con oscilador independiente.

Este microcontrolador se encarga exclusivamente del manejo del display alfanumérico LCD que se encuentra colocado en el módulo; recibe los datos a mostrarse en el LCD desde el ATXMEGA32A4.

En la tabla 2.3 se indica los recursos utilizados del microcontrolador ATMEGA8.

Tabla 2.3. Recursos Utilizados del ATMEGA8.

RECURSOS UTILIZADOS DEL ATMEGA8			
Nº	**PIN**	**APLICACIÓN**	**OBSERVACIÓN**
1	PB1	ENCENDIDO BACKLINE	
2	PD0	COMUNICACIÓN SERIAL (RX)	ATXMEGA32A4 ⟶ ATMEGA 8
3	PD2	LÍNEA DE DATOS D7	Bus de datos a 4 bits.
4	PD3	LÍNEA DE DATOS D6	

5	PD4	LÍNEA DE DATOS D5	
6	PD5	LÍNEA DE DATOS D4	
7	PD6	ENABLE DE LCD	
8	PD7	CONTROL RS (DATO/COMANDO) DE LCD	

2.4 CIRCUITO DE COMUNICACIÓN USB2.0 Y COMUNICACIÓN SERIAL USART

2.4.1 DISEÑO DEL CIRCUITOCOMUNICACIÓN USB 2.0 Y COMUNICACIÓN SERIAL USART

Para la comunicación USB se requiere que el microcontrolador (PIC18F2550) cuente con un cristal externo, para este caso se tiene un cristal de 16MHz con sus respectivos capacitores cerámicos de 22uF, que proporcionan estabilidad al oscilador. Un capacitor electrolítico cuyo valor puede ser de 1 a 100 uF conectado al pin VUSB; en este caso se optó por un capacitor de 10 uF. Una resistencia conectado al pin VPP, que es el pin master clear reset (MCLR) del PIC. El valor de esta resistencia por recomendación del fabricante debe ser mayor a 1 KΩ y menor a 40 KΩ; en este caso se ha optado por una resistencia de 10 KΩ. En este circuito se cuenta con dos diodos leds y sus respectivas resistencias, uno de ellos se enciende cuando el cable USB ha sido conectado, mientras que el otro diodo led denominado led testigo conectado en el pin RC2 titilará indicando que la comunicación USB se está llevando a cabo correctamente y dejará de hacerlo cuando por alguna razón se pierda la comunicación USB. El esquema del circuito se muestra en la figura 2.7.

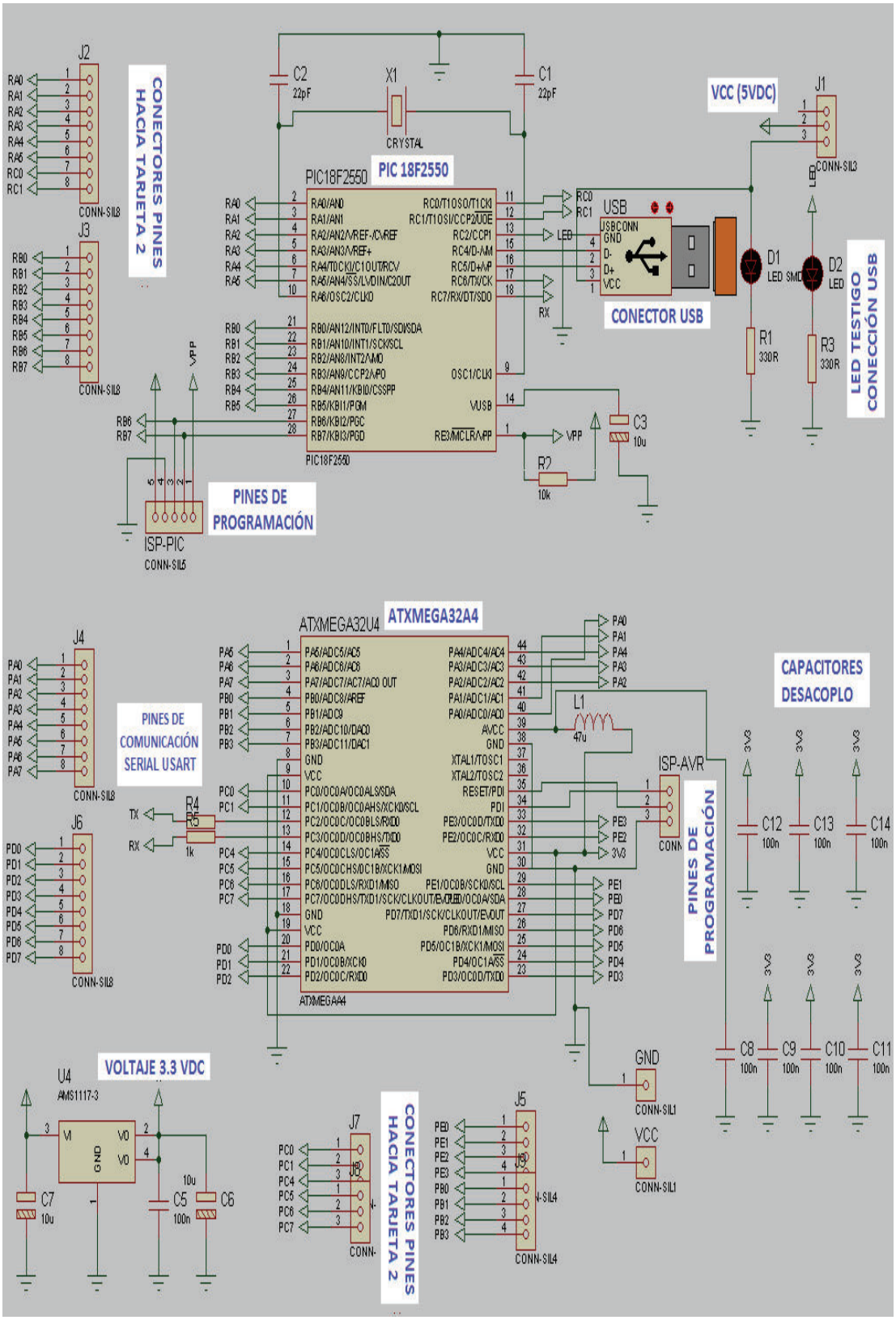


Figura 2.7. Circuito Comunicación USB2.0 y Serial USART (Tarjeta 1).

2.5 CIRCUITO PARA SENSOR DE TEMPERATURA LM35

2.5.1 SENSOR DE TEMPERATURA LM35

Este dispositivo integrado proporciona una variación lineal de voltaje ante el cambio de temperatura (10 mV/ºC). Abarca un rango de temperatura desde -55ºC hasta los 150ºC; se lo puede polarizar con voltajes de 4 a 30 VDC y presenta una baja impedancia de salida.

2.5.2 CIRCUITO PARA LECTURA DE TEMPERATURA

Se ha polarizado al LM35 con 5VDC, acompañado de un seguidor de voltaje, tal como se observa en la figura 2.8. La señal de voltaje que proporciona este circuito ingresa hacia el módulo Conversor Analógico Digital del ATXMEGA32A4 a través del pin PA4.

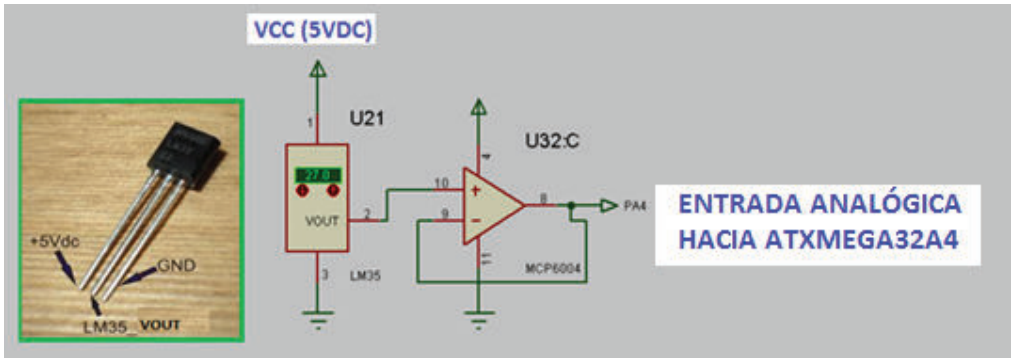


Figura 2.8. Sensor de Temperatura LM35.

2.6 CIRCUITO PARA CONTROL DEL SERVOMOTOR

Un servomotor es un dispositivo electromecánico que tiene la capacidad de ubicarse en una posición establecida dentro de su rango de operación y mantenerse en dicha posición bajo ciertas condiciones. Un servomotor está constituido por un pequeño motor DC y un mecanismo de ruedas dentadas que cumplen la función de caja reductora, lo que le brinda una potencia considerable.

Los servomotores generalmente se alimentan con voltajes en el rango de 4 a 6VDC, presentan un cable de conexión de tres hilos: rojo (VCC); negro (GND); blanco, amarillo o naranja (SEÑAL).

2.6.1 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR

Para que el servomotor mantenga su posición, debe estar alimentado y recibir continuamente el tren de pulsos adecuado para cada posición a través de su hilo de señal, la duración de esta señal en nivel alto (duty cycle) establece la posición en la cual se ubica el eje del servomotor. La frecuencia de la señal PWM puede estar en el rango de 50 a 100 Hz, esto implica periodos de 10 a 20 ms y con un ciclo de trabajo entre el 6% al 15%. Estos valores no son generales para todos los servomotores ya que estos valores pueden cambiar dependiendo del tipo y marca del servomotor.

En este caso se utiliza un servomotor marca HITEC HS-311(figura 2.9), el cual para su funcionamiento requieren de una señal PWM con una frecuencia de 50 Hz que implica un periodo de 20 ms. Entonces sí el ciclo de trabajo (duty cycle) es 1.5 ms. el servo se posicionará en el centro; sí el ciclo de trabajo se reduce a 0.9 ms. el servo se coloca a 0 grados; mientras que sí el ciclo de trabajo es de 2.1 ms el servo avanza hasta el otro extremo, es decir 180 grados, tal como se observa en la figura 2.10. Para valores intermedios el servo se colocará en posiciones intermedias. No se requiere de ningún circuito especial para el funcionamiento del servomotor, es por ello que simplemente se tiene la polarización a 5 VDC y la señal PWM se la envía a través del pin PE2 del ATXMEGA32A4.

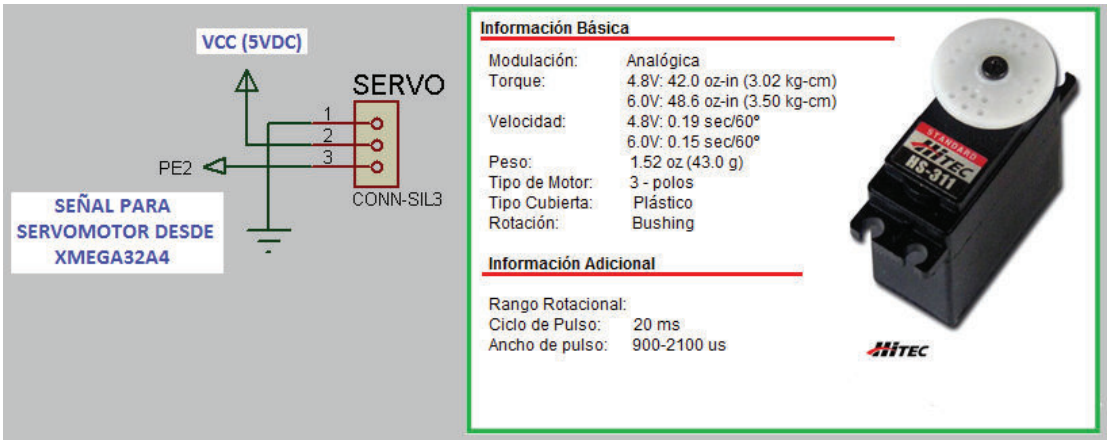


Figura 2.9. Servomotor HITEC HS-311.

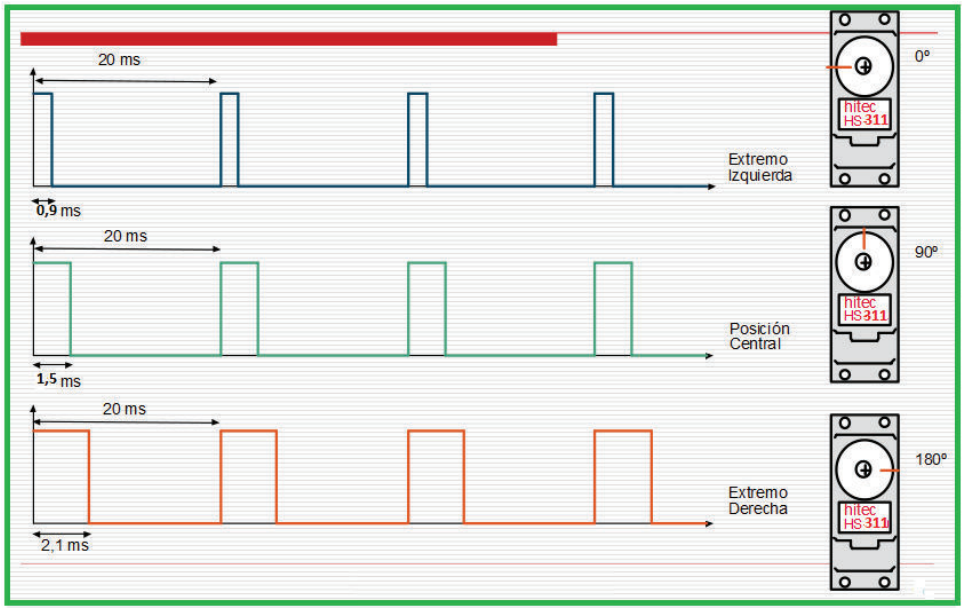


Figura 2.10. Periodo y Ciclo de Trabajo del Servomotor HITEC HS-311.

2.7 CIRCUITO PARA ACELERÓMETRO LSM303DLH

2.7.1 SENSOR LSM303DLH

El sensor LSM303DLH es un pequeño integrado, el cual combina un acelerómetro y magnetómetro en los tres ejes en un sólo dispositivo. La lectura de datos del acelerómetro y del magnetómetro se realiza a través de interfaz I2C de manera

independiente, esto permite direccionar o activar únicamente el acelerómetro, únicamente el magnetómetro o sí la aplicación lo requiere los dos.

Especificaciones y Distribución de Pines:

- Voltaje de Operación: 2.6 a 5.5 VDC.
- Suministro de corriente: 10 mA.
- Formato de salida I2C: 12 Bits de datos ajustados a la izquierda.
- Sensibilidad: Acelerómetro: ±2, ±4, o ±8 g (gravedades).
  Magnetómetro: ±1.3, ±1.9, ±2.5, ±4.0, ±4.7, ±5.6, o ±8.1Gauss.
- Este dispositivo trae consigo dos reguladores de voltaje de 1.8 y 3 VDC.

La tabla 2.4 indica la distribución de pines del sensor LSM303DLH.

Tabla 2.4. Distribución de Pines Sensor LSM303DLH.

Nº	PIN	DESCRIPCIÓN
1	VIN	Voltaje de alimentación VCC (5VDC).
2	GND	Conexión a tierra de la fuente de alimentación.
3	1V8	Salida de voltaje regulado 1.8 VDC
4	3V	Salida de voltaje regulado 3.0 VDC
5	SCL	Línea de reloj interfaz I2C.
6	SDA	Línea de datos interfaz I2C.
7	DRDY	Indicador de datos de magnetómetro listo.
8	INT1	Interrupción inercial 1.
9	INT2	Interrupción inercial 2.

En cuanto a requerimientos de hardware para la conexión de este dispositivo se requiere una fuente de voltaje en el rango especificado, en este caso se alimentó con 5 VDC. No se requiere resistencias de pull-up del bus I2C ya que este dispositivo cuenta con sus propias resistencias de pull-up. Los pines de conexión de este dispositivo se muestran en la figura 2.11.

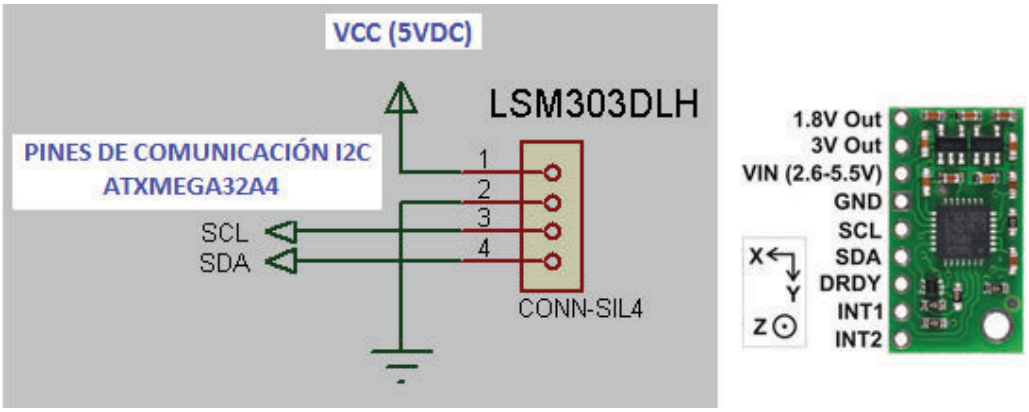


Figura 2.11. Sensor Acelerómetro LSM303DLH.

2.8 CIRCUITO PARA ENTRADAS DIGITALES

Se cuenta con ocho entradas digitales, por lo tanto se tendrá ocho circuitos similares al mostrado en la figura 2.12. Las entradas digitales deben ser de 5 V, cada una de las cuales cuenta con un diodo zener (BZXB84C3V3), que establece un voltaje constante de 3.3 V en la base del transistor y por ende una corriente constante que atraviesa por el diodo del opto-transistor (PC817); en la resistencia R3 se tiene la diferencia de voltaje (VIN_DIGITAL - VZENER), en la salida del optoacoplador (PC817) una resistencia de 1KΩ limita la corriente que atraviesa por el transistor, la compuerta inversora (74HC14) se ha colocado con el propósito de reflejar el estado lógico de la entrada hacia la salida; ya que si no se contase con este elemento el estado lógico reflejado a la entrada del microcontrolador sería inverso al estado lógico en la entrada (bornera); finalmente el diodo LED con su respectiva resistencia constituye un elemento indicador visual del estado de la entrada digital.

2.8.1 DISEÑO CIRCUITO DE ENTRADAS DIGITALES

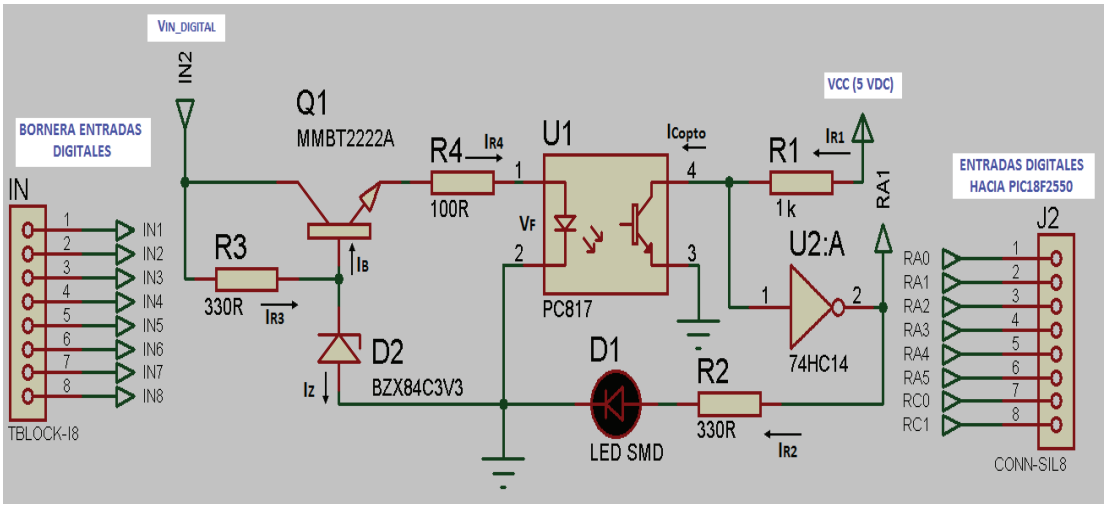


Figura 2.12. Circuito para Entradas Digitales.

Consideraciones de Diseño:

Diodo Zener: $V_Z = 3.3\ V;\ I_{Zmáx} = 76\ mA$

Transistor NPN: $V_{BE} = 0.6\ V;\ V_{CE(sat)} = 300\ mV;\ I_{Cmáx} = 600\ mA$

Optotransistor PC817: $V_F = 1.2\ V;\ I_{Fmáx} = 50\ mA;\ I_{Cmáx} = 50\ mA;\ V_{CE(sat)} = 0.2\ V$

Diodo Led Verde: $V_{Led} = 2.4\ V;\ I_{Led} = 10\ mA$

Cálculo de R1:

$$V_{R1} = R1 * I_{R1} \quad (2.1)$$

$$I_{R1} \cong I_{C(opto)} \quad (2.2)$$

$$V_{R1} = V_{CC} - V_{CE(sat)} = R1 * I_{R1} = R1 * I_{C(opto)} \quad (2.3)$$

Para: Ic(opto)=5 mA.

$$R1 = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{I_{C\ (opto)}} = \frac{(5 - 0.2)V}{5\ mA} = 960\ \Omega \ \rightarrow\ R1 = 1\ K\Omega$$

$$Sí\ R1 = 1\ K\Omega \ \rightarrow\ I_{R1} = I_{C(opto)} = \frac{(5 - 0.2)V}{1\ K\Omega} = 4.8\ mA$$

Cálculo de R2:

$$V_{CC} = V_{R2} + V_{Led} \rightarrow V_{CC} = (I_{Led} * R2) + V_{Led} \quad (2.4)$$

$$R2 = \frac{V_{CC} - V_{Led}}{I_{Led}} = \frac{(5 - 2.4)V}{10\ mA} = 260\ \Omega \quad \rightarrow \quad R2 = 270\ \Omega$$

En este caso el valor de la resistencia R2 debería ser de 270 Ω, se optó por colocar resistencias de 330 Ω dado que no se pudo conseguir resistencias SMD de 270 Ω.

Cálculo de R3:

$$V_{IN_DIGITAL} = V_{R3} + V_Z \quad (2.5)$$

$$I_{R3} = I_Z + I_B \quad \text{como } I_B \ll I_Z \rightarrow I_{R3} \cong I_Z \quad (2.6)$$

$$V_{R3} = R3 * I_{R3} \quad \rightarrow \quad V_{IN_{DIGITAL}} = (R3 * I_{R3}) + V_Z \quad \rightarrow R3 = \frac{V_{IN_DIGITAL} - V_Z}{I_{R3}}$$

$$\text{como: } I_{R3} \cong I_Z \quad \rightarrow \quad R3 = \frac{V_{IN_DIGITAL} - V_Z}{I_Z}$$

Para: Iz= 5mA y $V_{IN_DIGITAL}$= 5 V.

$$R3 = \frac{V_{IN_DIGITAL} - V_Z}{I_Z} = \frac{(5 - 3.3)\ V}{5\ mA} = 340\ \Omega \quad \rightarrow \quad R3 = 330\ \Omega$$

Cálculo de R4:

$$I_E = I_F = I_{R4} \quad (2.7)$$

$$V_Z = V_{BE} + V_{R4} + V_F \quad (2.8)$$

$$V_Z = V_{BE} + (I_F * R4) + V_F \quad (2.9)$$

Para: I_F = 20 mA.

$$R4 = \frac{V_Z - V_{BE} - V_F}{I_F} R4 = \frac{(3.3 - 0.6 - 1.2)V}{20\ mA} = 75\ \Omega \quad \rightarrow \quad R4 = 82\ \Omega$$

El valor de la resistencia R4 debería ser de 82 Ω, se colocó resistencias de 100 Ω dado que no se pudo conseguir resistencias SMD de 82 Ω.

2.9 CIRCUITO PARA SALIDAS DIGITALES

Las salidas digitales son manejadas por medio de un driver L293D, como se observa en la figura 2.13; esto permitirá seleccionar el voltaje de las salidas entre 5 o 12 VDC ya que se dispone de un jumper. Al seleccionar las salidas a 12 VDC se puede manejar cargas como: motores (ON/OFF), relés, o solenoides con una corriente de hasta 600 mA, cada una de las salidas digitales cuenta con su respectiva resistencia y diodo LED para indicar el estado de las salidas digitales.

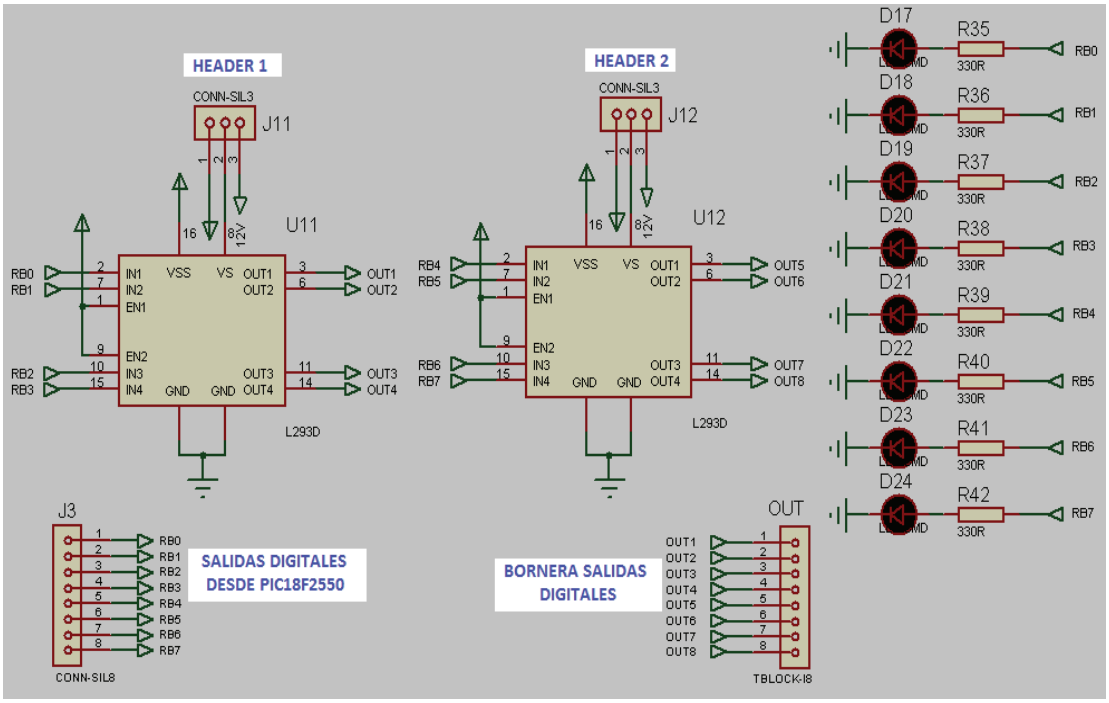


Figura 2.13. Circuito para Salidas Digitales.

Consideraciones de Diseño:

Diodo Led Rojo: $V_{Led} = 1.8\ V;\quad I_{Led} = 10\ mA$

Voltaje de salida digital PIC18F2550: $V_{OUT} = 5\ V$

Cálculo de la resistencia de Led: Como todas las resistencias son del mismo valor, para el diseño simplemente se considera como R.

$$V_{OUT} = V_R + V_{Led} \rightarrow V_{OUT} = (R * I_{Led}) + V_{Led} \qquad (2.10)$$

$$R = \frac{V_{OUT} - V_{Led}}{I_{Led}}$$

Para: $V_{OUT} = 5\ V \quad R = \frac{(5 - 1.8)\ V}{10\ mA} = 320\ \Omega \quad \rightarrow R = 330\ \Omega$

2.10 CIRCUITO PARA SALIDAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE

Las salidas analógicas de voltaje se obtienen con un Conversor Digital Analógico (MCP4822), conectado al ATXMEGA32A4 el cual envía valores digitales entre 0 y 4095. El MCP4822 convierte este valor digital a un valor analógico en el rango de 0 a 2.046 V; luego este voltaje es amplificado utilizando un amplificador operacional (AD822) en configuración no inversor para obtener una señal de voltaje de 0 a 5 VDC; el esquema del circuito se muestra en la figura 2.14.

2.10.1 CONVERSOR DIGITAL ANALÓGICO MCP4822

Este dispositivo convierte valores digitales (0 - 4095) recibidos por la interfaz SPI a valores analógicos de voltaje (0 – 2.046V). Se polariza con voltajes en el rango de (2.7 – 5.5) VDC y dado que dispone de dos canales de salida es posible generar dos señales de voltaje.

Características y distribución de pines:

- 12 Bits de resolución.
- Interfaz de comunicación serial SPI.
- Ganancia de salida seleccionable por 1 o por 2.
- Voltaje interno de referencia de 2.048 V.
- Fuente de alimentación simple en rango (2.7 – 5.5) VDC.
- Temperatura de operación de -40ºC a +125ºC.

Tabla 2.5. Distribución de Pines MCP4822.

Nº	PIN	DESCRIPCIÓN
1	VDD	Voltaje de Polarización
2	CS	Selección de Dispositivo
3	SCK	Señal de Reloj
4	SDI	Dato de Entrada Serial
5	LDAC	Entrada de Sincronización
6	VOUTB	Salida Analógica 1
7	AVSS	Tierra Analógica
8	VOUTA	Salida Analógica 2

2.10.2 AMPLIFICADOR OPERACIONAL AD822

Este dispositivo se emplea para amplificar la señal de salida analógica de voltaje generada por el MCP4822. Se lo puede polarizar con una fuente en el rango de (5 - 30 VDC) o con dos fuentes de alimentación de (± 2.5 V a ± 15 V). En este caso se ha polarizado con una sola fuente de 12 VDC.

2.10.3 DISEÑO CIRCUITO SALIDAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE

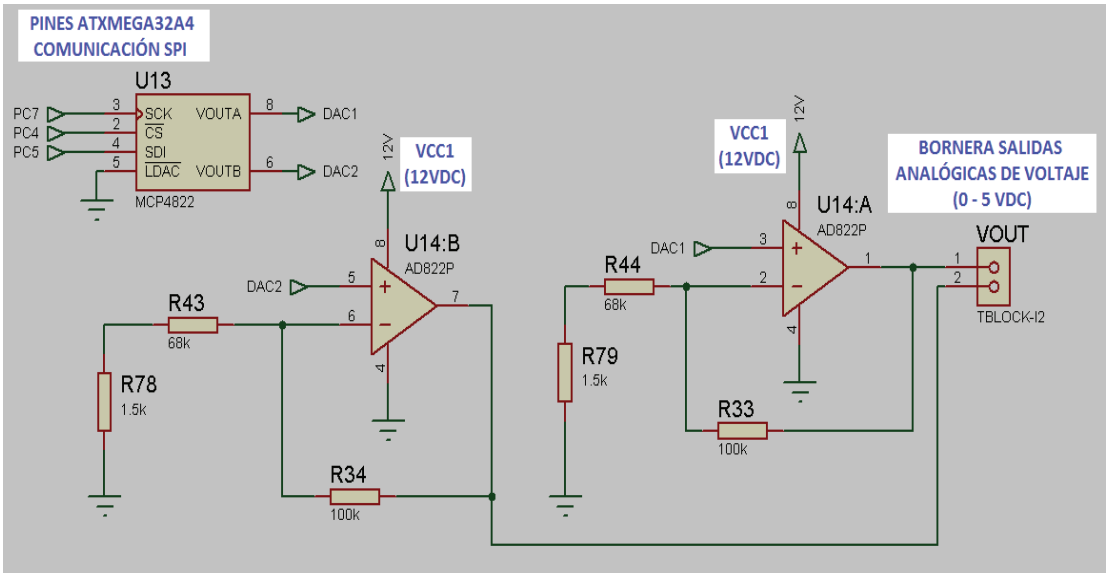


Figura 2.14. Circuito para Salidas Analógicas de Voltaje.

Consideraciones de diseño:

El voltaje que proporciona el integrado MCP4822 está en el rango de (0 - 2.046) VDC, este voltaje ingresa al amplificador no inversor para obtener un voltaje de salida en el rango de (0 - 5) VDC; por tanto la ganancia del amplificador es la siguiente:

$$G = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \rightarrow G = \frac{5\ VDC}{2.046\ VDC} = 2.44$$

Para el amplificador en modo no inversor la ganancia está determinada por la relación:

$$G = \left(\frac{RA}{RB} + 1\right) \quad (2.11)$$

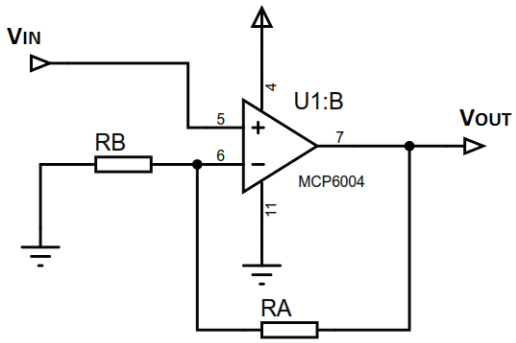


Figura 2.15. Amplificador No Inversor.

Para: RA=100 KΩ

$$RB = \frac{RA}{1.44} = \frac{100\ K\Omega}{1.44} = 69.44\ K\Omega \rightarrow RB = 68\ K\Omega + 1.5\ K\Omega = 69.5\ K\Omega$$

Un valor muy cercano al calculado se obtiene mediante dos resistencias en serie una de 68 KΩ y otra de 1.5 KΩ, por tanto: R33=100 KΩ, R4=68 KΩ, R79=1.5 KΩ.

2.11 CIRCUITO PARA SALIDAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE

El módulo pone a disposición dos salidas analógicas de corriente 4 - 20 mA, por ende se tiene dos circuitos similares al mostrado en la figura 2.16.

Este circuito tiene la función de convertir una señal de voltaje VDC a una señal de corriente (4 - 20) mA. Está diseñado en base al amplificador operacional (OPA4244EA) en configuración sumador y seguidor de voltaje, un transistor PNP (MMBT2907).

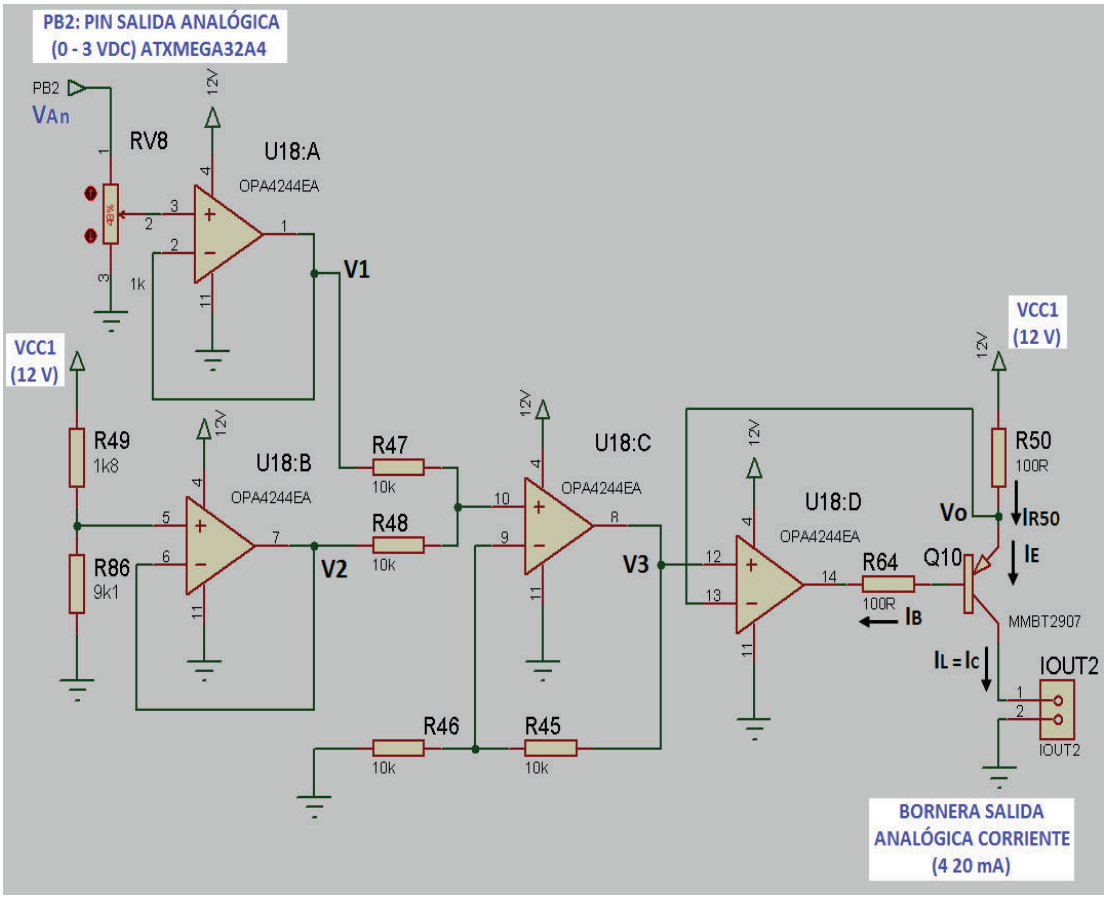


Figura 2.16. Circuito Salidas Analógicas de Corriente.

Consideraciones de Diseño:

Transistor PNP: $V_{BEmín} = -1.3V;\ V_{CE(sat)} = -0.4V\ ;\ \ I_{Cmáx} = 800\ mA$

Resistencia de carga: $RL = 250\ \Omega$

Voltaje de salida del conversor digital analogo ATXMEGA32A4: $VAn = (0 - 3\ VDC)$

$$I_E = I_B + I_C \quad \text{como } I_B \ll I_C \text{ se puede considerar } I_E \cong I_C = I_L$$

$$I_L = I_C = I_E = I_{R50} \ \rightarrow \ \text{Salida de corriente } 4 - 20\ mA$$

$$V_{CC1} = V_{R50} + V_O \tag{2.12}$$

$$V_{R50} = V_{CC1} - V_O = R50 * I_{R50} \tag{2.13}$$

Con lo cual se requiere que Vo cumpla las siguientes condiciones:

Para: I_{R50} = 20 mA y R50 = 100 Ω.

$V_{R50} = 100\ \Omega * 20\ \text{mA} = 2\ \text{V}$

$V_O = V_{CC1} - V_{R50} = 12\ \text{V} - 2\ \text{V} = 10\ \text{V}$

Para: I_{R50} = 4 mA y R50 = 100 Ω.

$V_{R50} = 100\ \Omega * 4\ \text{mA} = 0.4\ \text{V}$

$V_O = V_{CC1} - V_{R50} = 12\ \text{V} - 0.4\ \text{V} \rightarrow V_O = 11.6\ \text{V}$

Para el caso de un amplificador en configuración sumador no inversor:

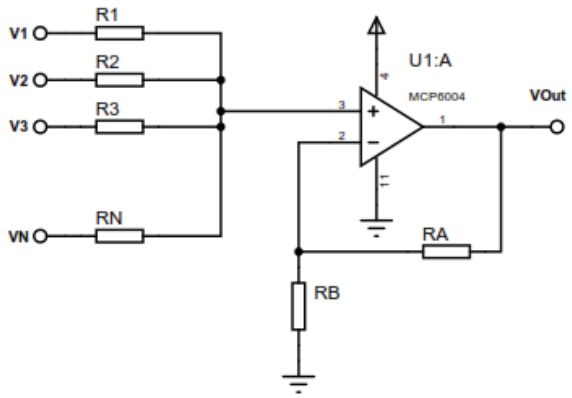


Figura 2.17. Amplificador en Configuración Sumador no Inversor.

El voltaje de salida se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Si } R1 = R2 = R3 = RN \rightarrow VOut = \left(\frac{RA}{RB} + 1\right)\left(\frac{V1+V2+V3+ \ldots\ldots VN}{N}\right) \tag{2.14}$$

Donde N es el número de voltajes a sumarse.

Para el caso RA=RB y sí se tiene únicamente 2 voltajes a sumar, entonces:

$$VOut = (V1 + V2) \tag{2.15}$$

En este caso se considera R45=R46=R47=R48=10 KΩ.

$$\mathrm{V3} = \mathrm{V1} + \mathrm{V2} \quad \rightarrow \quad \mathrm{Vo} = \mathrm{V3} = \mathrm{V1} + \mathrm{V2}$$

$$\mathrm{V1} + \mathrm{V2} = 10\ \mathrm{V} \tag{2.16}$$

$$\mathrm{V1} + \mathrm{V2} = 11.6\ \mathrm{V} \tag{2.17}$$

El voltaje V1 depende del voltaje de salida del conversor digital análogo (VAn).

Cuando el voltaje VAn = 0 V, el voltaje V1 = 0 V entonces el voltaje V2 debe ser fijo y de 10V (ecuación 2.16), este voltaje se obtiene mediante un divisor de voltaje.

Sí V2 es fijo e igual a 10 V, entonces V1 = 1.6 V (ecuación 2.17), dado que el voltaje VAn máximo es de 3 V, se requiere un divisor de voltaje que en este caso se implementa por medio de un potenciómetro RV8=10KΩ.

Cálculo de R49 y R86:

$$\mathrm{V_{R86}} = \frac{\mathrm{R86}}{\mathrm{R86+R49}} * V_{CC1} \tag{2.18}$$

Para: R49 = 1.8 KΩ, V_{R86} = 10 V, V_{CC1}=12 V.

$$\mathrm{R86} = \frac{\mathrm{V_{R86}}}{\mathrm{V_{IN}} - \mathrm{V_{R86}}} * \mathrm{R49} \rightarrow \quad \mathrm{R86} = \frac{10\ \mathrm{V}}{(12-10)\mathrm{V}} * 1.8\ \mathrm{K\Omega} = 9\ \mathrm{K\Omega} \quad \rightarrow \quad \mathrm{R86} = 9.1\ \mathrm{K\Omega}$$

El valor de la resistencia R64 se recomienda un valor de 100 Ω, para evitar oscilaciones en la corriente I_L.

Cálculo de la Resistencia de Carga Máxima:

$$\mathrm{V_{RL}} = \mathrm{I_L} * \mathrm{RL} \tag{2.19}$$

$$\mathrm{V_{CC1}} = \mathrm{V_{R50}} + \mathrm{V_{EC}} + \mathrm{V_{RL}} \tag{2.20}$$

$$\mathrm{V_{CC1}} = \mathrm{I_L} * \mathrm{R50} + \mathrm{V_{EC}} + \mathrm{I_L} * \mathrm{RL}$$

$$\mathrm{RL} = \frac{\mathrm{V_{CC1}} - \mathrm{V_{EC}} - \mathrm{I_L} * \mathrm{R50}}{\mathrm{I_L}}$$

Para: I_L = 20 mA, $V_{EC(sat)}$=0.4 V

$$\mathrm{RL_{máx}} = \frac{12 - 0.4 - (0.02 * 100)}{0.02} = 480\ \Omega \quad \rightarrow \mathrm{RL_{máx}} = 470\ \Omega$$

2.12 CIRCUITO DE ENTRADAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE

El voltaje de las entradas analógicas pueden ser de 0 - 5 VDC, el circuito se ha implementado en base a un divisor de voltaje que permite regular el voltaje que ingresa al módulo conversor analógico digital del ATXMEGA32A4 (0 - 2 VDC). En conjunto con este divisor de voltaje se tiene un amplificador operacional (MCP6004) en configuración de seguidor de voltaje, un diodo zener de 2.4 V y una resistencia para protección del pin de entrada del microcontrolador, el esquema del circuito se muestra en la figura 2.18.

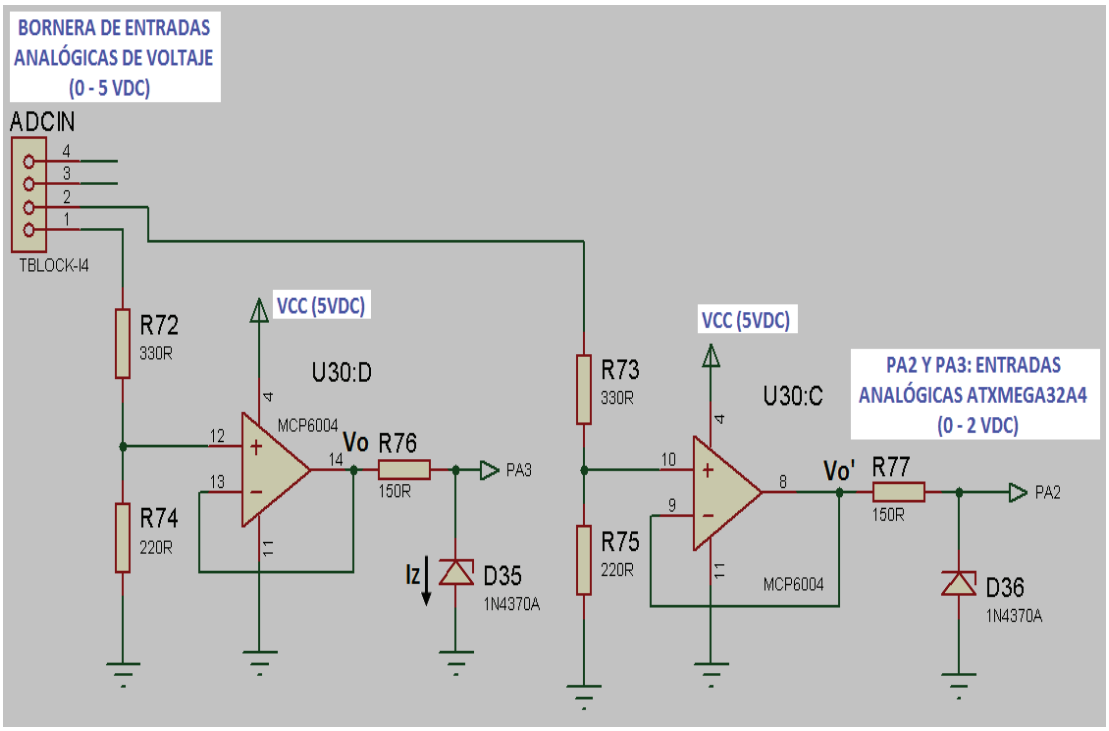


Figura 2.18. Circuito para Entradas Analógicas de Voltaje.

Consideraciones de Diseño:

Voltaje analógico de entrada: $\mathrm{V_{IN}} = (\,0 - 5\ \mathrm{VDC})$

Voltaje de entrada módulo ADC del DigItal ATXMEGA32A4 : $0 - 2$ VDC

Diodo Zener 1N4370A : $V_Z = 2.4\ V$; $I_{Z(máx)} = 150\ mA$.

Para el divisor de voltaje:

$$V_{R74} = \frac{R74}{R74+R72} * V_{IN} \quad (2.21)$$

Para: R72= 330 Ω, V_{R74}= 2V y V_{IN}= 5V.

$$R74 = \frac{V_{R74}}{V_{IN} - V_{R74}} * R72 \ \rightarrow \ R74 = \frac{2\ V}{(5-2)V} * 330\ \Omega \ \rightarrow \ R74 = 220\ \Omega$$

Sí por cualquier circunstancia ingresa un voltaje mayor a los 5 V por las borneras de las entradas analógicas de voltaje, el voltaje a la salida del amplificador operacional Vo será mayor a 2 V; el voltaje máximo de Vo es de 5 V que es cuando el operacional se satura.

Se han colocado un diodo zener de 2.4 V y una resistencia R76 para proteger el pin del microcontrolador. Sí Vo supera 2.4 V, entonces el zener trabaja y establece un voltaje Vz = 2.4 V a la entrada del pin del microcontrolador y en R76 existe una caída de tensión; para voltajes menores a 2.4 V el zener no trabaja y se comporta como un interruptor abierto. La resistencia R76 sirve para limitar la corriente de zener.

Calculo de R76:

Para: Iz = 20 mA y Vo = 5VDC.

$$V_O = V_{R76} + V_Z \ \rightarrow \ V_{R76} = V_O - V_Z \quad (2.22)$$

$$V_{R76} = R76 * I_{R76} \qquad \text{como } I_{R76} = I_Z \ \rightarrow \ R76 = \frac{V_O - V_Z}{I_Z} \quad (2.23)$$

$$R76 = \frac{(5-2.4)\ V}{20\ mA} = 130\ \Omega \ \rightarrow \ R76 = 150\ \Omega$$

2.13 CIRCUITO PARA ENTRADAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE

Dado que las entradas del módulo ADC del microcontrolador trabajan en función del voltaje que ingresa en los pines, es necesario convertir de señal de corriente a voltaje. El esquema del circuito se muestra en la figura 2.19.

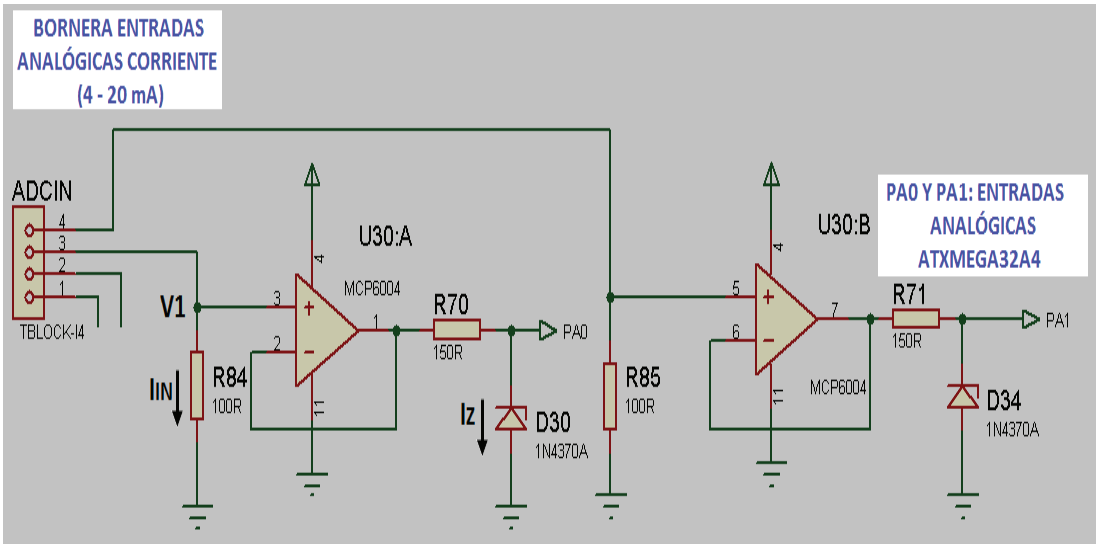


Figura 2.19. Circuito para Entradas Analógicas de Corriente.

Consideraciones de Diseño:

Para convertir la señal de corriente a voltaje simplemente utilizamos una resistencia R84 = 100 Ω, con lo cual se tendrá lo siguiente:

$$V1 = I_{IN} * R84 \qquad (2.24)$$

Para: $I_{IN} = 4\ mA$ $\quad V1 = 4\ mA * 100\ \Omega = 0.4\ V$

Para: $I_{IN} = 20\ mA$ $\quad V1 = 20\ mA * 100\ \Omega = 2\ V$

Es decir el que V1 varía entre 0.4 y 2 V, este valor de voltaje ingresa hacia el módulo conversor analógico digital del microcontrolador ATXMEGA32A4.

Se ha colocado un diodo zener de 2.4 V y una resistencia R70 para proteger al pin del microcontrolador en el caso que se ingrese una corriente mayor a los 20 mA en las borneras de las entradas analógicas de corriente. El zener trabaja

cuando se ingrese una corriente mayor a 24 mA ya que en ese caso se tendrá un voltaje V1 mayor a 2.4 V; para dimensionar R70 se utiliza el mismo criterio empleado para dimensionar R76 en las entradas analógicas de voltaje, por tanto R70 =150 Ω.

2.14 CIRCUITO PARA SALIDAS TIPO RELÉ

Las salidas tipo relé se encuentran optoacopladas por medio del optotransistor (PC817), en conjunto con una resistencia de 100 Ω para limitar la corriente que pasa por diodo del PC817; del lado del transistor se tiene otra resistencia R58 que permite establecer la corriente que ingresa por la base del transistor (MMBT2222A) provocando que éste entre en saturación y cierre la bobina del relé. Además se cuenta con un elemento de protección para la bobina del relé el cual es el diodo (1N4007), un diodo LED con su respectiva resistencia para indicar el estado del relé y una bornera en la cual se tienen los contactos: común, normalmente abierto (NA) y normalmente cerrado (NC). Dado que se dispondrá de dos salidas tipo relé, se tendrán dos circuitos similares al mostrado en la figura 2.20.

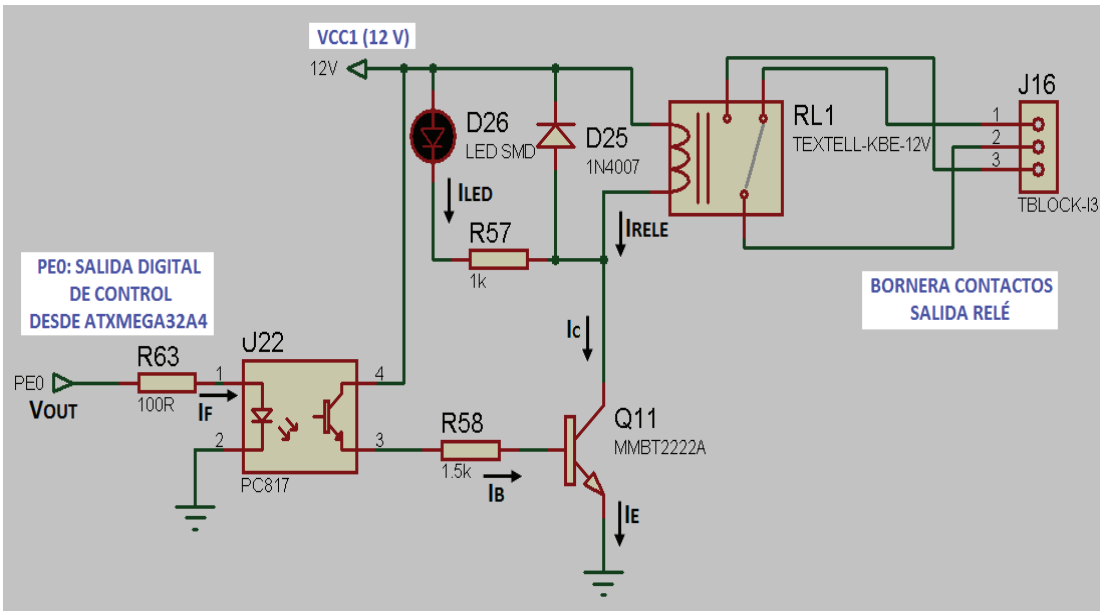


Figura 2.20. Circuito Salida Tipo Relé.

Consideraciones de Diseño:

Transistor NPN: $V_{BEmín} = 0.6\ V$; $V_{BEmáx} = 1.2\ V$; $V_{CE} = 300\ mV$; $I_{Cmáx} = 600\ mA$

Optotransistor PC817: $V_F = 1.2\ V$; $I_{Fmáx} = 50\ mA$; $I_{Cmáx} = 50\ mA$; $V_{CE(sat)} = 0.2\ V$

Diodo Led Azúl: $V_{Led} = 2.8\ V$; $I_{Led} = 10\ mA$

Relé SRU 12VDC SLC: $P = 0.36\ W$; $Rbobina = 400\Omega$

Voltaje de salida digital ATXMEGA32A4: $V_{OUT} = 3.3\ V$

Cálculo de R63:

$$V_{OUT} = V_{R63} + V_F \rightarrow V_{OUT} = (I_F * R63) + V_F \quad (2.25)$$

$$R63 = \frac{V_{OUT} - V_F}{I_F}$$

Para: I_F = 20 mA.

$$R63 = \frac{V_{OUT} - V_F}{I_F} = \frac{(3.3 - 1.2)\ V}{20\ mA} = 105\ \Omega \quad \rightarrow R63 = 100\ \Omega$$

Cálculo de R58:

Se determina la corriente que requiere la bobina del relé:

$$P = V * I \rightarrow I_{Rele} = \frac{P}{V} = \frac{0.36\ W}{12\ V} = 30\ mA \quad (2.26)$$

$$I_{C\ (sat)} = I_{Rele} + I_{Led} = 40\ mA \rightarrow I_B = \frac{I_C(sat)}{\beta sat} \quad (2.27)$$

$$I_B = \frac{40\ mA}{10} = 4\ mA$$

Para asegurar la saturación se considera: $I_{B\ (sat)} = 2 * I_B$ $I_{B\ (sat)} = 8$ mA.

$$V_{CC1} = V_{CE(sat)opto} + (I_{R58} * R58) + V_{BE}$$

$$R58 = \frac{V_{CC1} - V_{CE(sat)opto} - V_{BE}}{I_{R58}}$$

Como $I_{R58} = I_B$:

$$R58 = \frac{V_{CC1} - V_{CEopto} - V_{BE}}{I_B} = \frac{(12 - 0.2 - 0.6)V}{8\ mA} = 1.4\ K\Omega \quad \rightarrow \quad R58 = 1.5\ K\Omega$$

Cálculo de R57*:*

$$V_{CC1} = V_{Led} + V_{R57} + V_{CE(sat)} \tag{2.28}$$

$$V_{CC1} = V_{Led} + (I_{Led} * R57) + V_{CE(sat)} \quad \rightarrow \ R57 = \frac{(VCC1 - V_{Led} - V_{CE\ (sat)})}{I_{Led}}$$

Para: $I_{Led} = 10\ mA$: $R57 = \frac{(12 - 2.8 - 0.3)V}{10\ mA} = 890\Omega \ \rightarrow R57 = 910\ \Omega$

Se colocó R57=1 KΩ ya que no se pudo conseguir resistencias SMD de 910 Ω.

2.15 CIRCUITO PARA CONTROL DE LA LÁMPARA

Se ha diseñado e implementado un circuito de control de fase directo para regular el voltaje de alimentación a la lámpara. Para ello se requiere tanto la señal de disparo, que en este caso corresponde al PIN PD5 del ATXMEGA32A4, que mediante un optoacoplador (MOC3020) activa y desactiva al TRIAC (Q7015L5); como también la señal de cruce por cero correspondiente al PIN PA7, cuyo circuito está diseñado en base a un puente de diodos, un optoacoplador (4N25) y una compuerta inversora (74HC14) con Schmitt-Trigger para mejorar la señal de cruce por cero. La señal de cruce por cero activa uno de los timers del ATXMEGA32A4; el esquema del circuito se muestra en la figura 2.21.

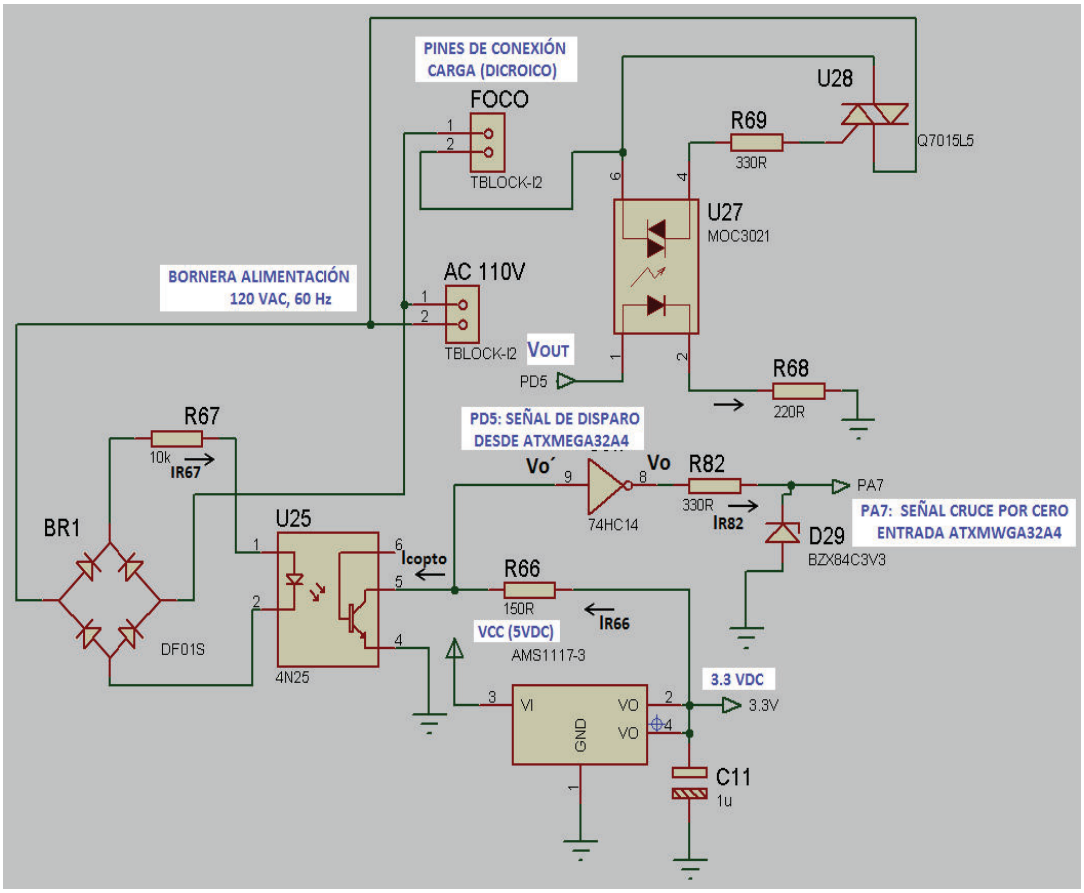


Figura 2.21. Circuito Control de Fase para Lámpara.

Consideraciones de diseño:

Opto 4N25: $V_F = 1.3\ V;\ \ I_{Fmáx} = 60\ mA;\ \ V_{Rmáx} = 5\ V;\ V_{CE(sat)} = 0.5\ V;\ I_C = 50\ mA$

MOC3020: $\ V_F = 1.2\ V;\ \ I_{Fmáx} = 60\ mA;\ I_{TSM} = 1\ A;\ V_{Rmáx} = 3\ V;\ V_{TM} = 1.4\ V$

TRIAC Q7015L5: $\ I_{T(RMS)} = 15\ A;\ \ I_{GT} = 50\ mA;\ I_{GTM} = 2A;\ V_{GTmáx} = 2.5\ V$

Diodo Zener: $\ V_Z = 3.3\ V;\ \ I_{Zmáx} = 76\ mA$

Cálculo de R67:

Voltaje a la salida del puente de diodos:

$$V_{SR} = \left(V_L * \sqrt{2}\right) - 2V_D \qquad (2.29)$$

$$V_{SR} = \left(120 * \sqrt{2}\right) - 1.2 = 168.5\ V$$

$$V_{SR} = V_{R67} + V_F \tag{2.30}$$

$$V_{SR=}(I_{R67} * R67) + V_F \quad como \quad I_{R67} = I_F \rightarrow \quad R67 = \frac{V_{SR} - V_F}{I_F}$$

Para: I_F = 20 mA.

$$R67 = \frac{V_{SR} - V_F}{I_F} = \frac{(168.5 - 1.3)\ V}{20\ mA} = 8.36\ K\Omega \quad \rightarrow \quad R67 = 8.2\ K\Omega$$

Se optó por una resistencia de 10 KΩ, ya que no se pudo conseguir resistencias SMD de 8.2KΩ con lo cual se tiene lo siguiente:

$$Para: R67 = 10\ K\Omega \quad I_{R67} = I_F = \frac{(168.5 - 1.3)\ V}{10\ K\Omega} = 16.72\ mA$$

Cálculo de R66:

$$I_{R66} \cong I_{Copto} V_{R66} = V_{CC2} - V_{CEsat} = I_{R66} * R66 \quad \rightarrow R66 = \frac{V_{CC2} - V_{CE(sat)}}{I_{C(opto)}}$$

Para: $I_{C(opto)}$ = 20 mA

$$R66 = \frac{(3.3 - 0.5)V}{20\ mA} = 140\ \Omega \quad \rightarrow R66 = 150\ \Omega$$

Cálculo de R68:

$$V_{OUT=}V_{R68} + V_F V_{DISP=}(I_{R68} * R68) + V_F \quad como: \quad I_{R68} = I_F \rightarrow \quad R68 = \frac{V_{OUT} - V_F}{I_F}$$

Para: I_{F1} = 10mA, V_{OUT} = 3.3 V.

$$R68 = \frac{V_{OUT} - V_F}{I_{F1}} = \frac{(3.3 - 1.2)V}{10\ mA} = 210\ \Omega \quad \rightarrow \quad R68 = 220\ \Omega.$$

La resistencia R82 y el diodo zener localizados a la salida de la compuerta inversora permite proteger al pin PA7 ya que establece un voltaje de 3.3 V a la entrada del pinPA7 (señal de cruce por cero). La compuerta se ha polarizado con VCC = 5 V, por tanto se tendrá Vo = 5 V cuando la entrada Vo´ = 0 V.

Cálculo de R82:

$$V_{R82} = I_{R82} * R82 = V_O - V_Z \rightarrow R82 = \frac{Vo - V_Z}{I_{R82}} = \frac{Vo - V_Z}{I_Z}$$

Para: I_Z = 5 mA.

$$R82 = \frac{(5 - 3.3)\ VDC}{5\ mA} = 340\ \Omega \rightarrow \quad R82 = 330\ \Omega$$

Cálculo de R69:

Se requiere un voltaje mínimo entre los terminales positivo y negativo del TRIAC, cuyo valor en promedio es para cuando wt=10º.

$$V_T = 120\ \sin(wt) \tag{2.31}$$

Para: $wt = 10^0 V_T = 120\ \sin(10^0) = 20.83\ V$

$$V_T = V_{TM} + V_{R69} + V_{GT} \tag{2.32}$$

$$V_T = V_{TM} + (I_{GT} * R69) + V_{GT}$$

Dónde: VTM es el pico de voltaje en el MOC3020 y VGT es el voltaje en la compuerta del TRIAC.

$$R69 = \frac{V_T - V_{TM} - V_{GT}}{I_{GT}} \quad R69 = \frac{(20.83 - 1.4 - 2.5)V}{50\ mA} = 338\ \Omega \quad \rightarrow R69 = 330\ \Omega$$

2.16 CIRCUITO PARA CONTROL DE MOTOR DC Y VENTILADOR

El ventilador tendrá un control tipo ON-OFF y para ello se utiliza una de las entradas del circuito integrado L293D (puente H), para activar al ventilador se utiliza el pin PA5. Para el caso del motor se cuenta con una compuerta inversora (74HC14) que permite controlar el sentido de giro del motor a través del pin PE3 y la velocidad se controla por medio de una señal PWM generada en el pin PD4. A través de los pines PD6 y PD7 se recibe la señal del encoder del motor, todos estos pines corresponden al ATXMEGA32A4; el esquema del circuito se muestra en la figura 2.23.

2.16.1 DRIVER L293D (PUENTE H)

El circuito integrado L293 (B-E-D) es utilizado para el control de motores DC de pequeña potencia, motores bipolares de pasos, relés y cargas inductivas en general (figura 2.22). Tiene la capacidad manejar cargas con voltaje de alimentación de 4.5 a 30 VDC y corrientes de hasta 1 A (600 mA en el caso del L293D).

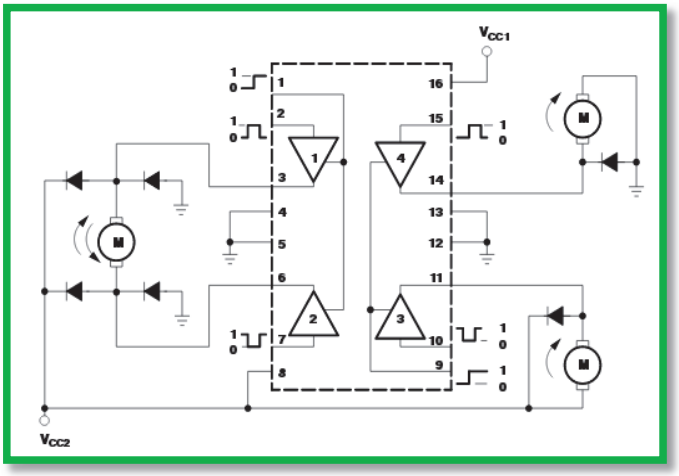


Figura 2.22. Disposición de circuitos Integrado L293D, Tomado de [15].

Tabla 2.6. Distribución de Pines Integrado L293D.

Nº	PIN	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
1	EN1	Habilitación circuitos 1 y 2	Señal PWM
2	IN1	Entrada circuito1	Giro Horario
3	OUT1	Salida circuito 1	Motor DC
4,5,12,13	GND	Conexión a GND	
6	OUT2	Salida circuito 2	Motor DC
7	IN2	Entrada circuito2	Giro Anti-horario
8	VS (VCC1)	Voltaje alimentación carga (4.5 -30) VDC	12 VDC
9	EN2	Habilitación circuitos 3 y 4	5VDC
10	IN3	Entrada circuito 3	
11	OUT3	Salida circuito 3	Ventilador
16	VSS (VCC)	Voltaje de alimentación (4.5 -7) VDC	5 VDC

En ese caso la señal de habilitación se controla por medio de una señal PWM. Las entradas de habilitación permiten controlar con facilidad el circuito, permitiendo la regulación de velocidad del motor.

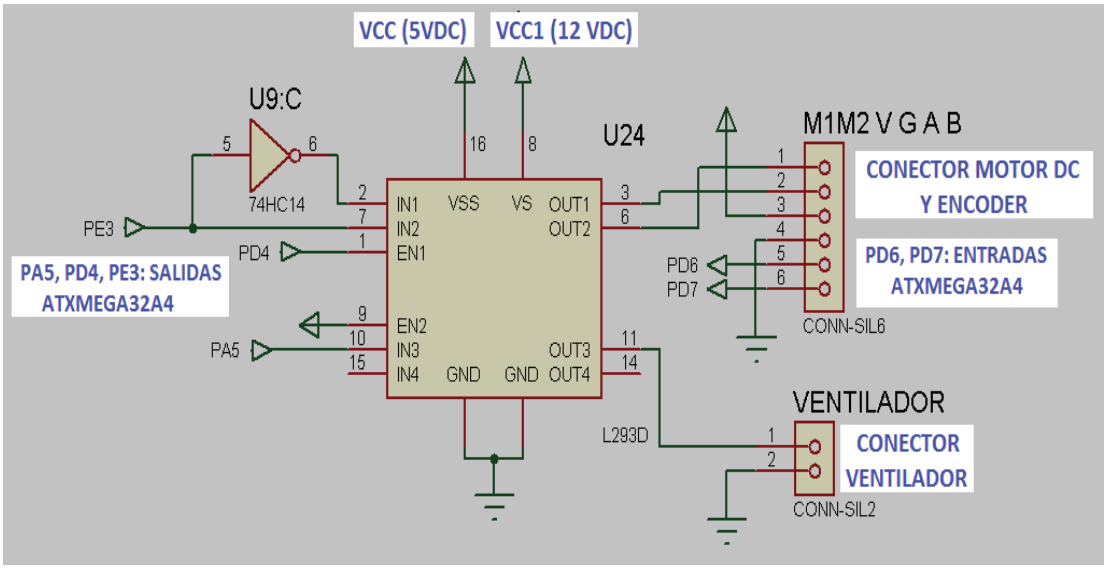


Figura 2.23. Circuito para Control Motor DC y Ventilador.

2.17 CIRCUITO PARA MANEJO DEL LCD 16X4

El LCD 16X4 se lo maneja utilizando comunicación serial USART entre el microcontrolador ATXMEGA32A4 y un microcontrolador ATMEGA8, empleándose únicamente el pin PD0 para dicha comunicación.

2.17.1 LCD 16 X 4

Este dispositivo está constituido básicamente de una pantalla de cristal líquido y un circuito microprocesado especializado para este dispositivo, permite mostrar caracteres en forma de mensajes para informar al usuario del estado de parámetros internos, datos y/o requerimientos de configuración de un proceso de monitoreo y control.

Tabla 2.7. Distribución de Pines Display Alfanumérico.

Nº	PIN	FUNCIÓN
1	VSS	Conexión a Tierra
2	VDD	Alimentación 5VDC
3	Vo	Voltaje de Ajuste Contraste
4	R/S	Selección de Dato/Comando
5	R/W	Lectura/escritura
6	E	Habilitador
7 AL 14	D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7	Líneas de datos
15	A	Alimentación Backlight
16	K	GND de Backlight

2.17.2 CIRCUITO PARA MANEJO DEL LCD

Este circuito cuenta con un conector para la comunicación serial, el ATMEGA8 recibe desde el ATXMEGA32A4 el texto o mensaje a mostrar en el display alfanumérico a través del pin PD0 que es el pin de recepción serial. Se tiene un potenciómetro para ajuste del contraste, por medio del pin PB1 se activa el encendido del backline; el esquema del circuito se muestra en la figura 2.24.

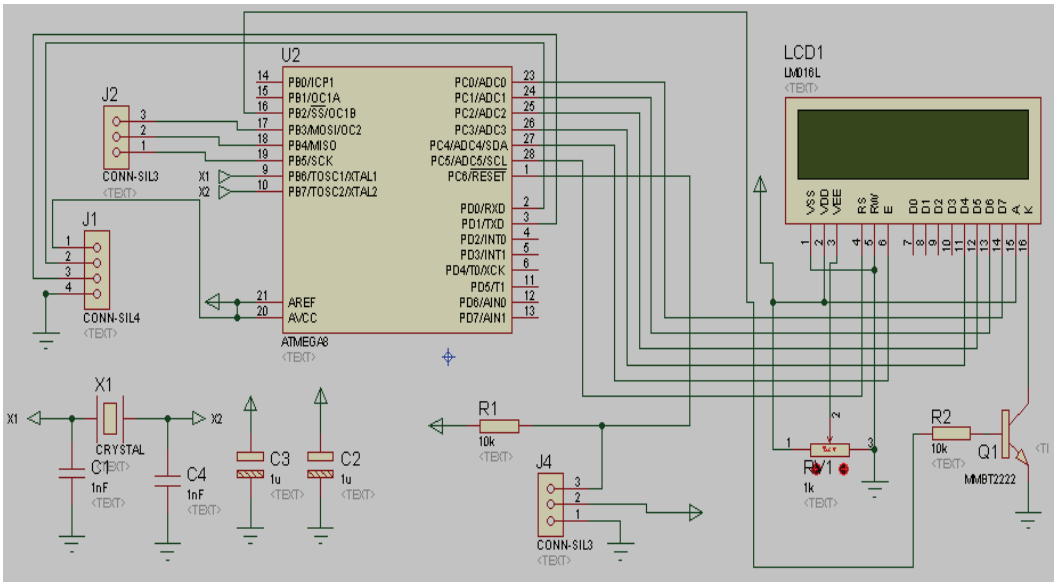


Figura 2.24. Circuito para Manejo de LCD.

2.18 CIRCUITO PARA SALIDAS TIPO PWM

Las salidas PWM son generadas por los pines PD2 y PD3 del ATXMEGA324A, se utiliza el integrado LM293D para establecer el nivel de voltaje de la señal PWM entre 5 o 12 VDC ya que la señal PWM generada por los pines del microcontrolador tiene un nivel de voltaje de 3 V; el esquema del circuito se muestra en la figura 2.25.

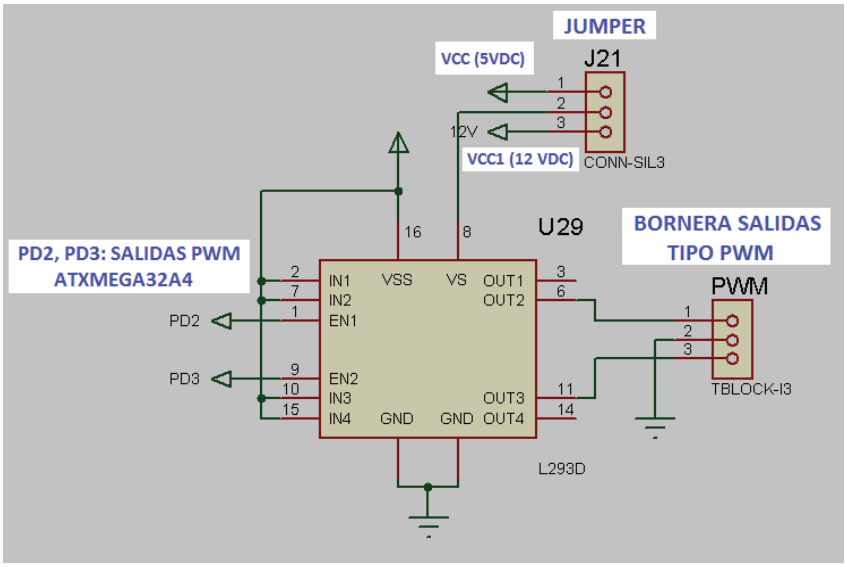


Figura 2.25. Circuito Para Salidas PWM.

2.19 CAPACITORES DE DESACOPLO Y CIRCUITOS EXTRAS

2.19.1 CAPACITORES DE DESACOPLO

Los capacitores de desacoplo cumplen la función de filtros y minimizan los efectos del ruido tanto a alta como a baja frecuencia, estos capacitores deben ir conectados en la polarización o alimentación los circuitos integrados como el LDC, LM35, microcontrolador, etc. El valor de estos capacitores típicamente es de0.1 uF para capacitores cerámicos y de 1uF para capacitores de tantalio. En este caso se han colocado capacitores de dichos valores.

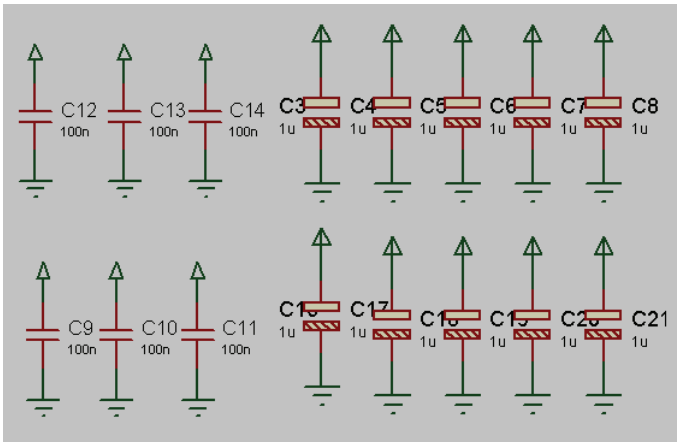


Figura 2.26. Capacitores de Desacoplo.

2.19.2 CIRCUITOS EXTRAS

Como parte de los circuitos extras se tiene el circuito de voltaje de referencia externo de 2 VDC para el Módulo Conversor Analógico Digital del ATXMEGA32A4, el zócalo donde se acopla el módulo LM2596 DC- DC y el conector e interruptor para VCC1 (12 VDC). Estos se muestran en la figura 2.27.

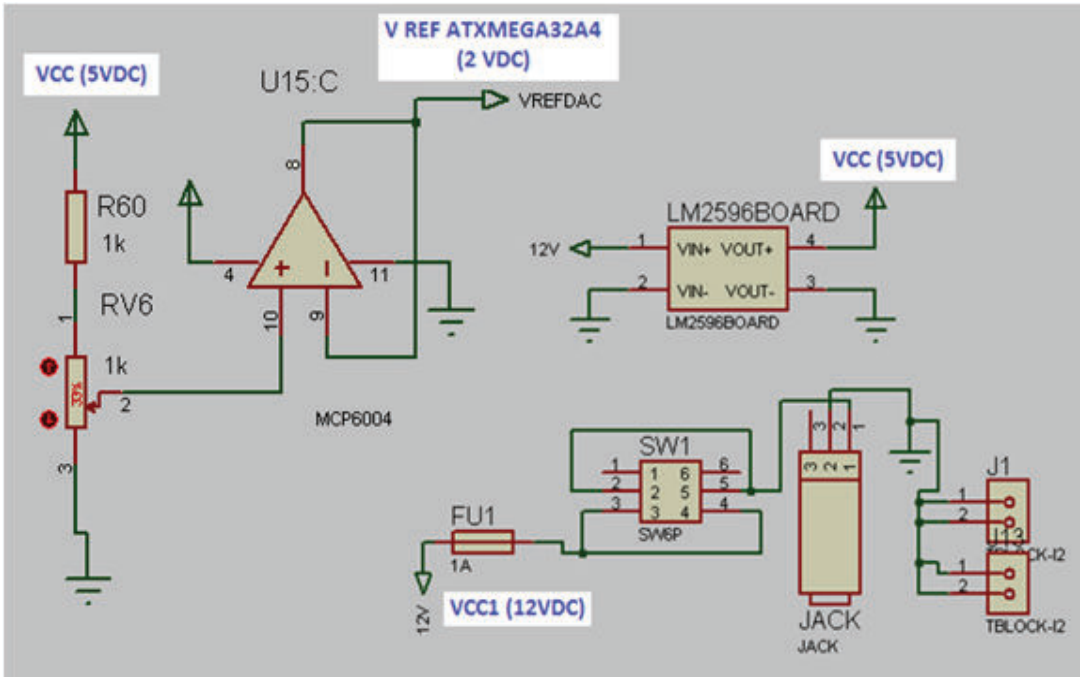


Figura 2.27. Circuitos Extras.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE SOPORTE

El software de respaldo del presente proyecto se desarrolló empleando varias herramientas. Para el microcontrolador PIC18F2550 se utilizó las instrucciones del lenguaje C y para ello se empleó el software PCWHD que es un compilador C de CCS. Para el ATXMEGA32A4 y ATMEGA8 se utilizó las instrucciones del lenguaje Basic y para ello se empleó el compilador Bascom-AVR de MCS Electronics. Para la interfaz gráfica se hizo uso de la plataforma gráfica Labview de National Instruments NI; finalmente el objeto sólido cuya animación se controla con los datos provenientes del acelerómetro se lo desarrolló con el software Solidworks.

3.1 COMPILADOR PCWHD

El compilador PCWHD se utilizó para programar al PIC18F2550, se empleó este compilador principalmente por disponer de la librería para la comunicación USB.

3.1.1 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO

Para crear el proyecto se inició desarrollando un archivo de código fuente, haciendo clic izquierdo sobre el ícono de carpeta ubicado en la esquina superior izquierda. Se desplegarán varias opciones, se debe seleccionar New y se presentarán las opciones que se pueden observar en la figura 3.1. Seleccionar Source File y proporcionar un nombre y la ubicación del nuevo archivo, inmediatamente se creará una ventana en blanco para la edición del código fuente.

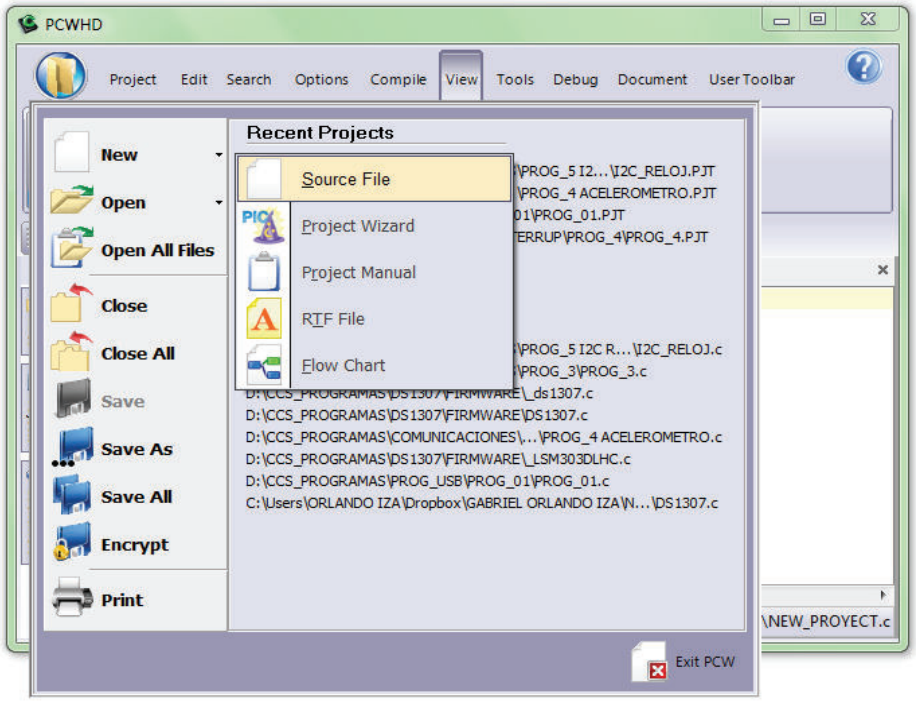


Figura 3.1. Creación de un Nuevo Proyecto en el Compilador PCWHD.

Dentro de la edición del archivo de código fuente es necesario incluir el fichero para la comunicación USB referente a los descriptores (usb_desc_cdc.h), este fichero se encuentra en: Disco Local (C:)\Archivos de Programas\PICC\Drivers. Este ha sido modificado tanto el nombre como parte del código; para poder realizar modificaciones a este fichero es necesario copiarlo a la misma ubicación dónde se creó el archivo código fuente. Una vez que se ha modificado el fichero referente a los descriptores y se ha editado el código fuente se procede a crear un nuevo proyecto con la opción Project Manual, se incluyen los dos archivos y se crea el nuevo proyecto. Una vez creado el proyecto se puede realizar la compilación y depuración del código fuente.

3.2 BASCOM – AVR

Es usado para generar el código de los programas tanto del ATXMEGA32A4 como del ATMEGA8, con lenguaje de programación Basic, ofrece las prestaciones de una herramienta IDE.

3.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROGRAMAS

La lógica de los programas cargados en los microcontroladores se indica a continuación mediante diagramas de flujo.

3.3.1 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL

Una vez que el proceso de enumeración o reconocimiento del módulo como dispositivo USB se ha realizado correctamente, entonces se puede enviar datos desde el computador hacia el PIC18F2550; éste captura los datos, y analiza sí los datos han cambiado entonces se envía los datos hacia el ATXMEGA32A4. El ATXMEGA32A4 captura los datos, ejecuta las subrutinas de control y envía de regreso los datos de las entradas analógicas, temperatura, velocidad del motor y datos del acelerómetro hacia el PIC18F2550, finalmente se direcciona los datos en los respectivos buffers y se envía hacia el computador; el diagrama de flujo se indica en la figura 3.2.

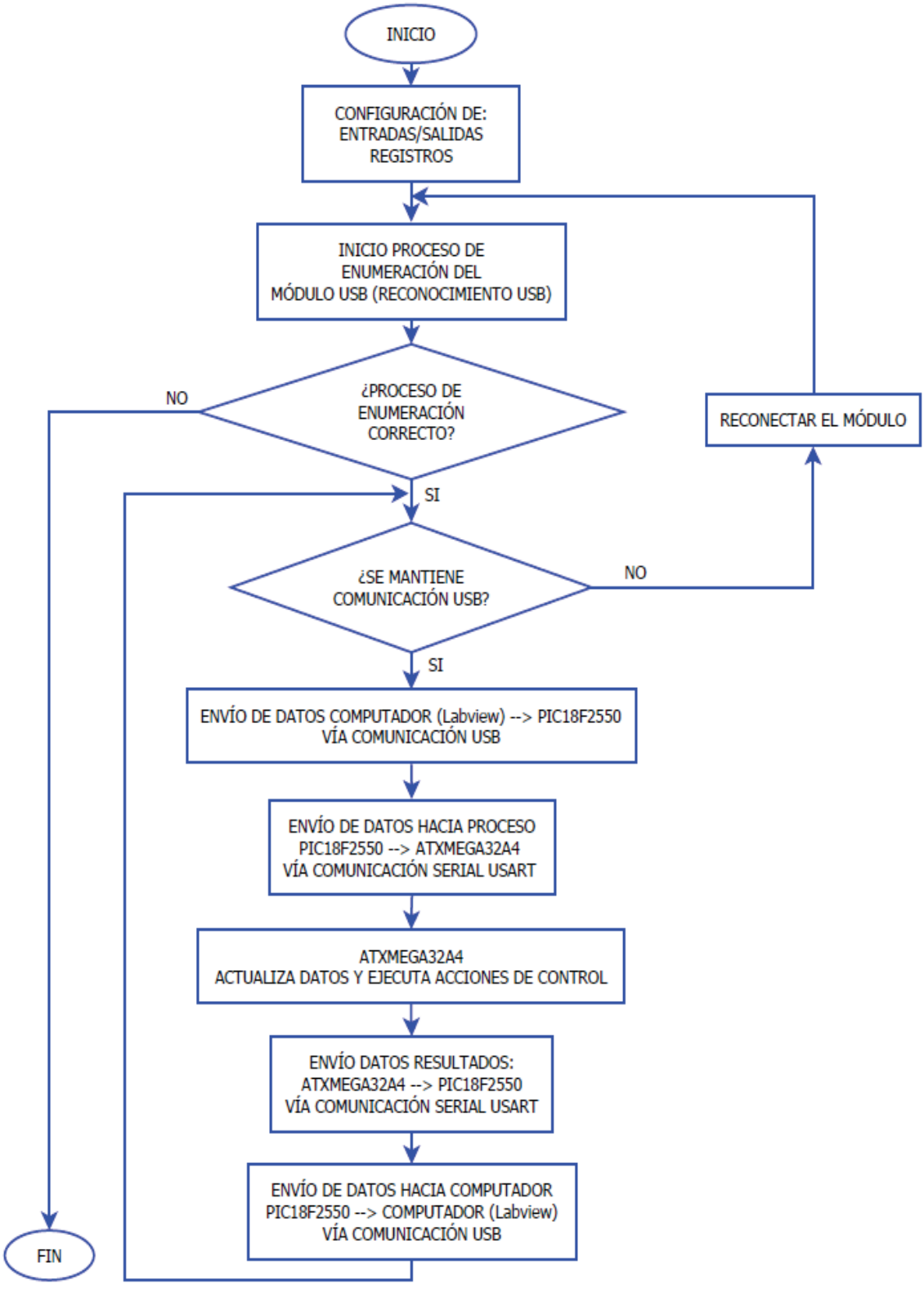


Figura 3.2. Diagrama de Flujo General.

3.3.2 DIAGRAMA DE FLUJO COMUNICACIÓN USB Y COMUNICACIÓN SERIAL USART ENTRE EL PIC18F2550 Y ATXMEGA32A4

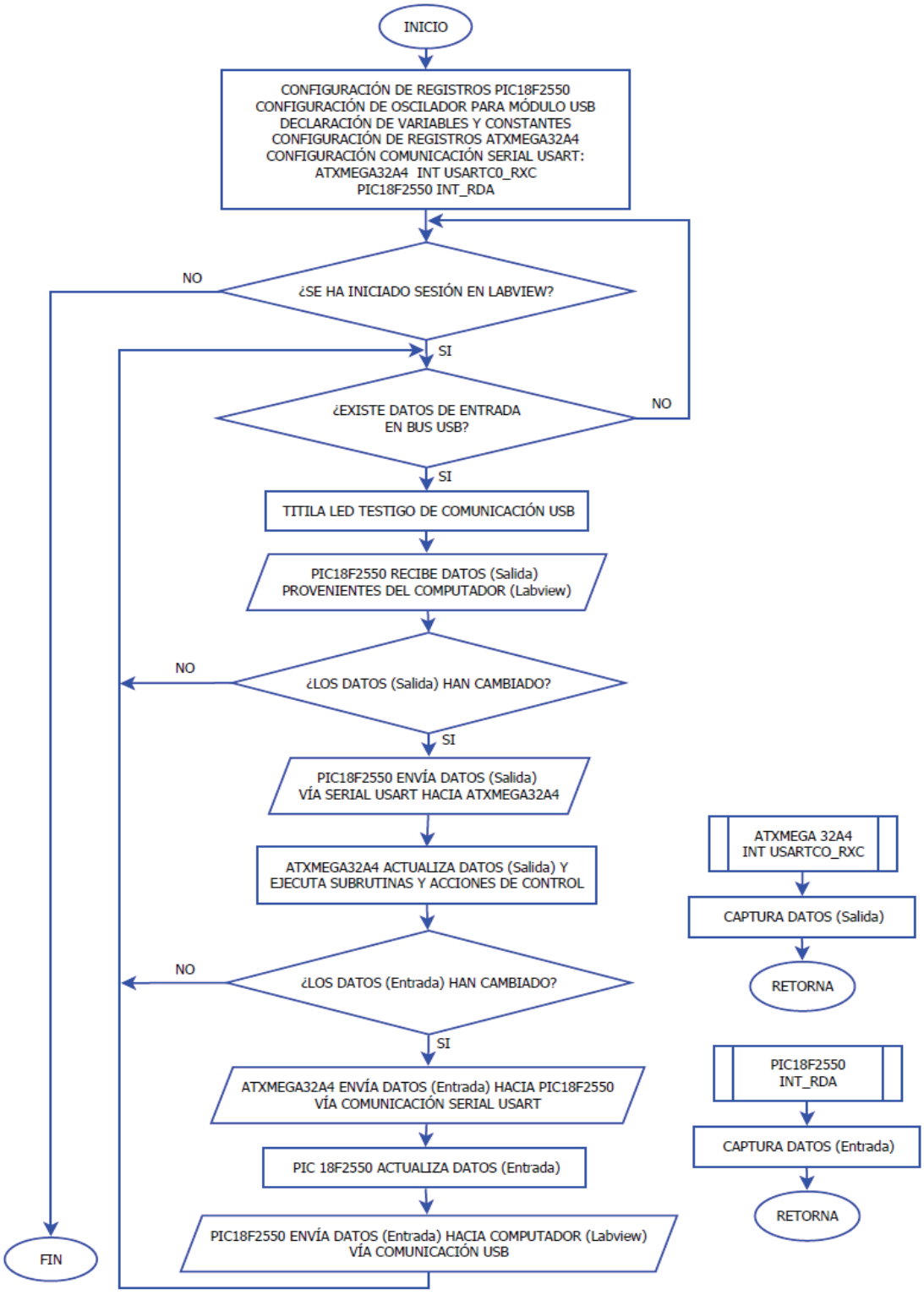


Figura 3.3. Diagrama de Flujo Comunicación USB y Comunicación Serial USART.

3.3.3 DIAGRAMA DE FLUJO ENTRADAS/SALIDAS DIGITALES

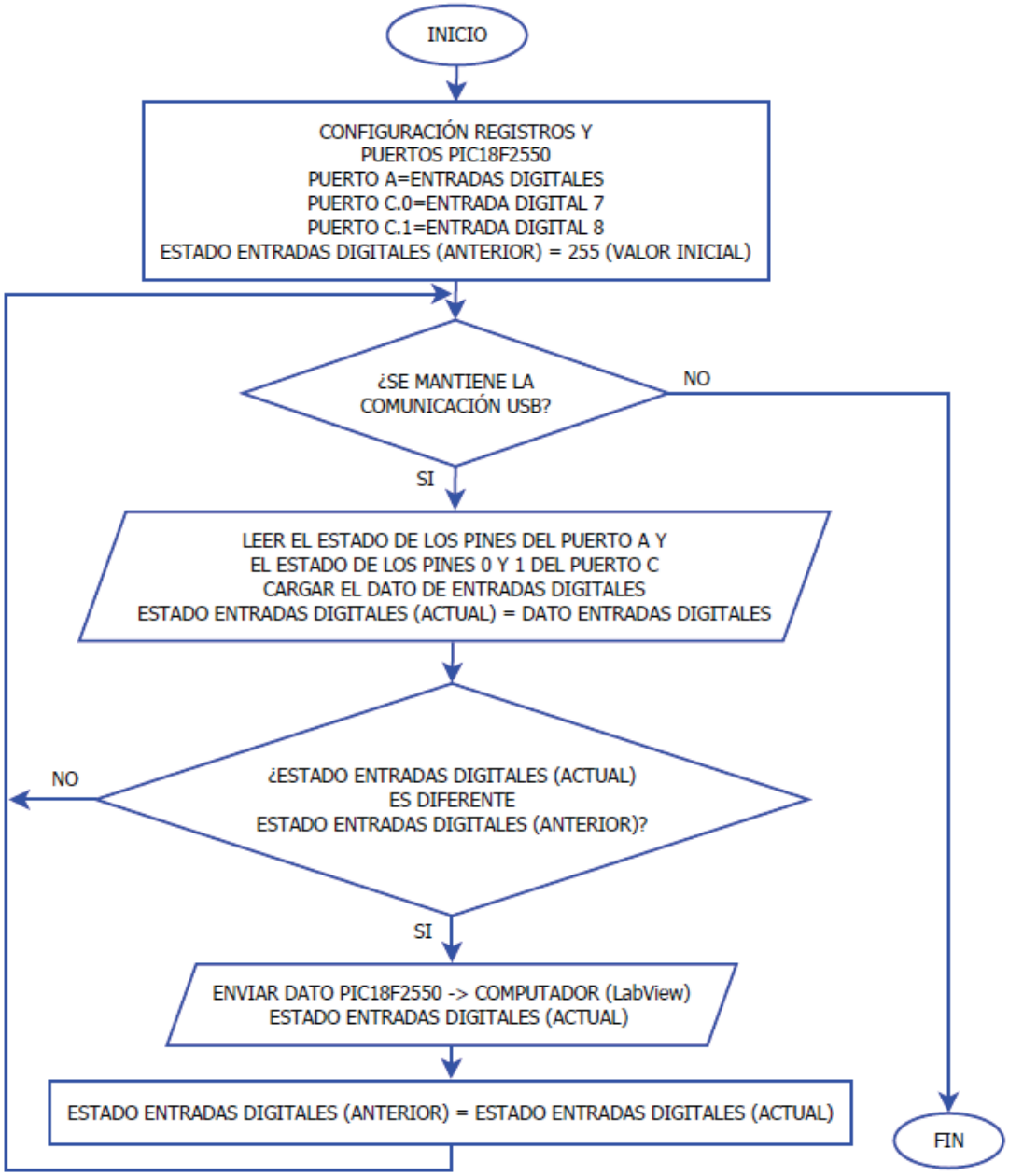


Figura 3.4. Diagrama de Flujo de Entradas Digitales.

Para las entradas digitales se utilizan los 6 pines el puerto A y los pines C0 y C1 del puerto C del PIC18F2550. Sí el estado de las entradas digitales cambia entonces se envía el estado actual de las entradas digitales hacia la interfaz de Labview.

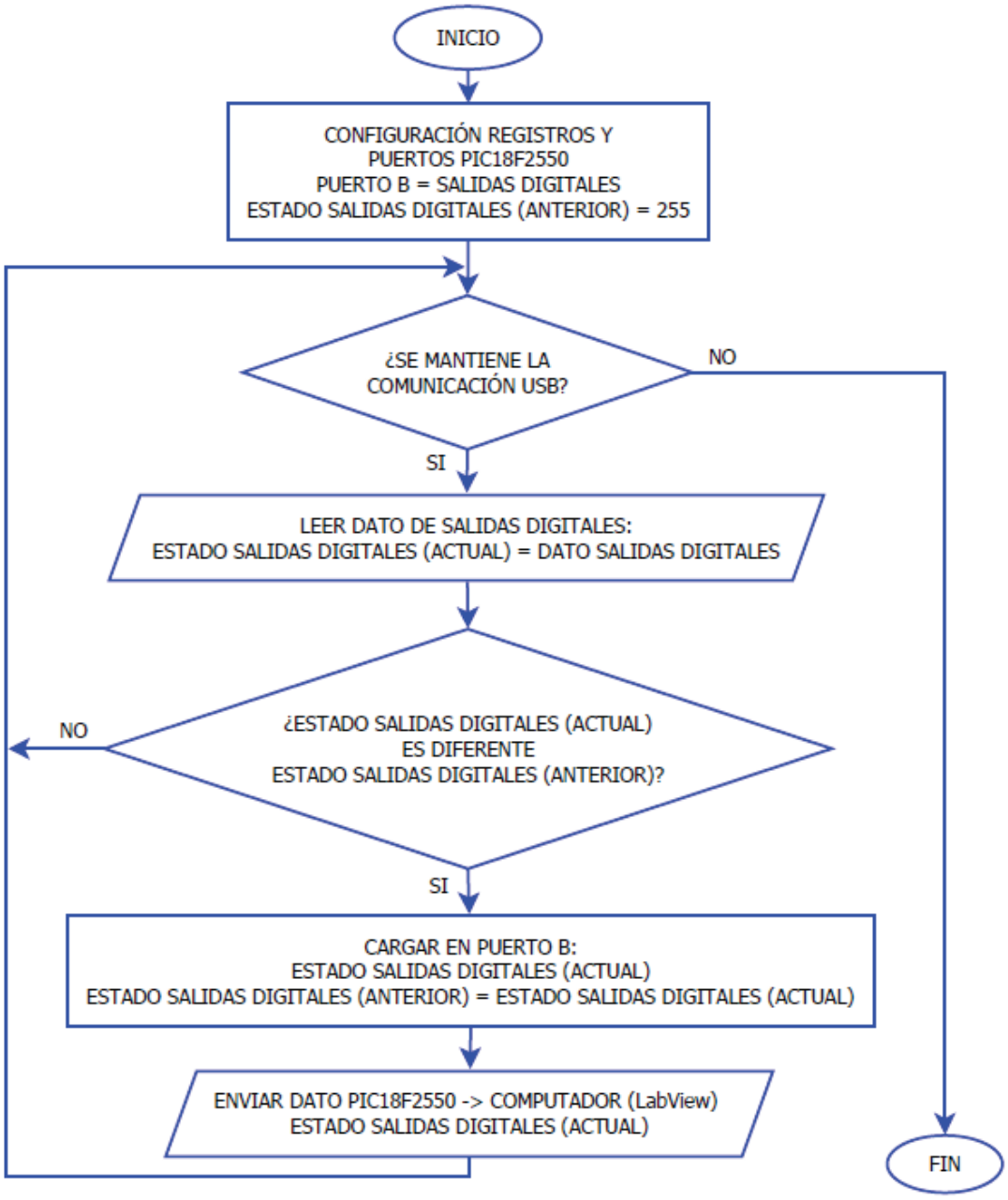


Figura 3.5. Diagrama de Flujo de Salidas Digitales.

Para las salidas digitales se utiliza el puerto B del PIC18F2550; sí el dato del estado de las salidas digitales recibido desde la interfaz de Labview cambia, entonces se carga el nuevo estado de las salidas digitales en el puerto B.

3.3.4 DIAGRAMA DE FLUJO SALIDAS ANALÓGICAS

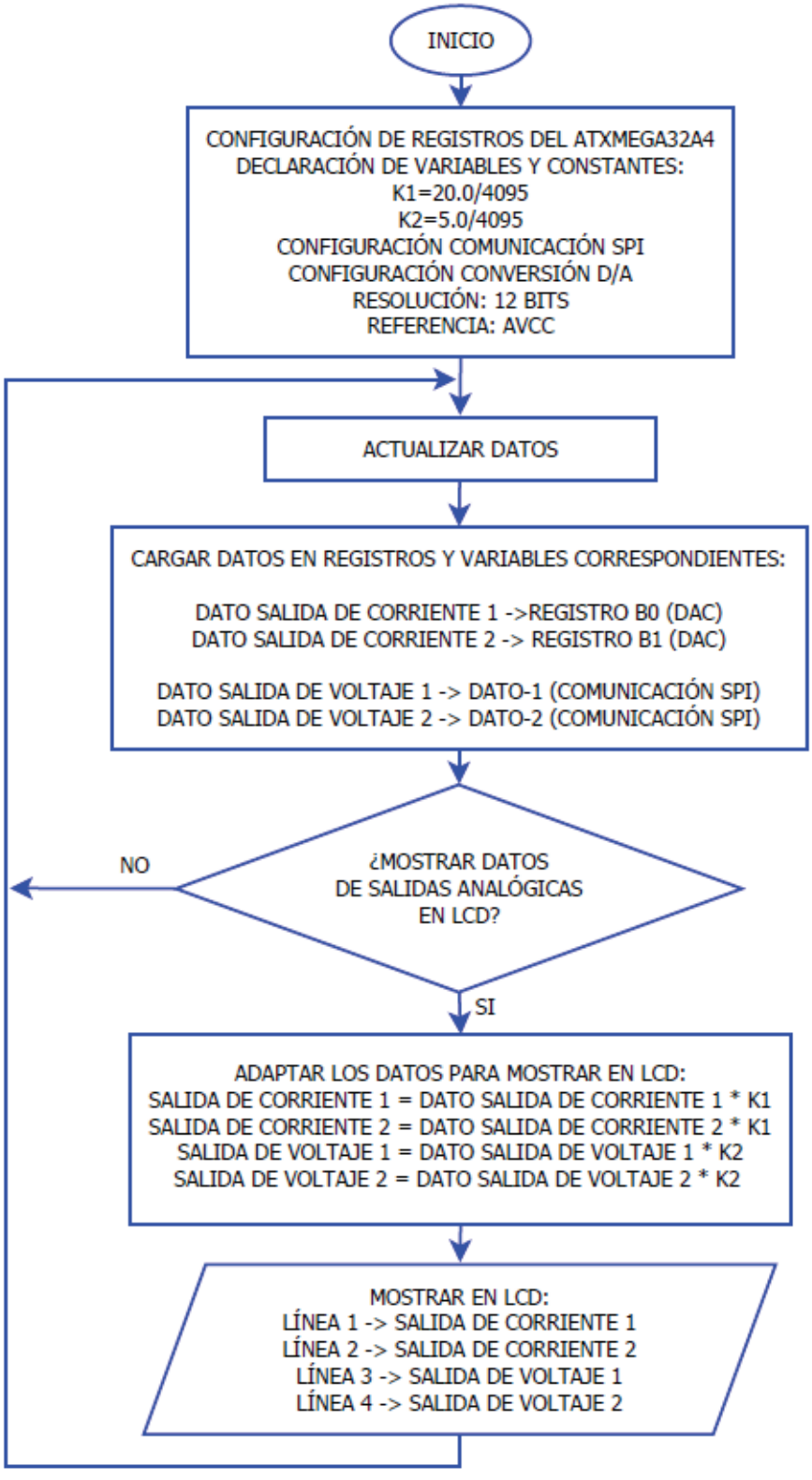


Figura 3.6. Diagrama de Flujo de Salidas Analógicas.

Los datos para las salidas de corriente se cargan directamente en los registros relacionados con el módulo conversor digital analógico (DACB0 y DACB1) del ATXMEGA32A4, mientras que para las salidas de voltaje se envían vía SPI los datos (DATO_1 y DATO_2) hacia el conversor digital analógico MCP4822. Dado que los conversores son de 12 bits, los datos digitales tanto para las salidas de corriente como las de voltaje estarán en el rango de 0 a 4095. Para mostrar los datos en el display LCD se han definido dos constantes K1 (20.0/4095) y K2 (5.0/4095) que permiten adaptar los datos a los correspondientes valores de corriente (4 - 20 mA) y de voltaje (0 - 5 VDC).

3.3.5 DIAGRAMA DE FLUJO ENTRADAS ANALÓGICAS

La lectura de las entradas analógicas de corriente se las realiza por medio de los canales analógicos PA0 y PA1, mientras que para las entradas de voltaje se utilizan los canales PA2 y PA3; se realizan 20 lecturas y se obtiene el promedio de dichas lecturas, sí el promedio de las 20 lecturas ha cambiado entonces estos valores son enviados hacia el PIC18F2550 vía serial. Para mostrar en el LCD se han multiplicado por las constantes K1 (20.0/4095) y K2 (5.0/4095) para adaptarlas a los niveles de corriente (4 – 20 mA) y voltaje (0 – 5 VDC) respectivamente. Ya que el módulo conversor analógico digital del ATXMEGA32A4 es de 12 bits, los valores de las lecturas analógicas estarán entre 0 a 4095. El diagrama de flujo se indica en la figura 3.7.

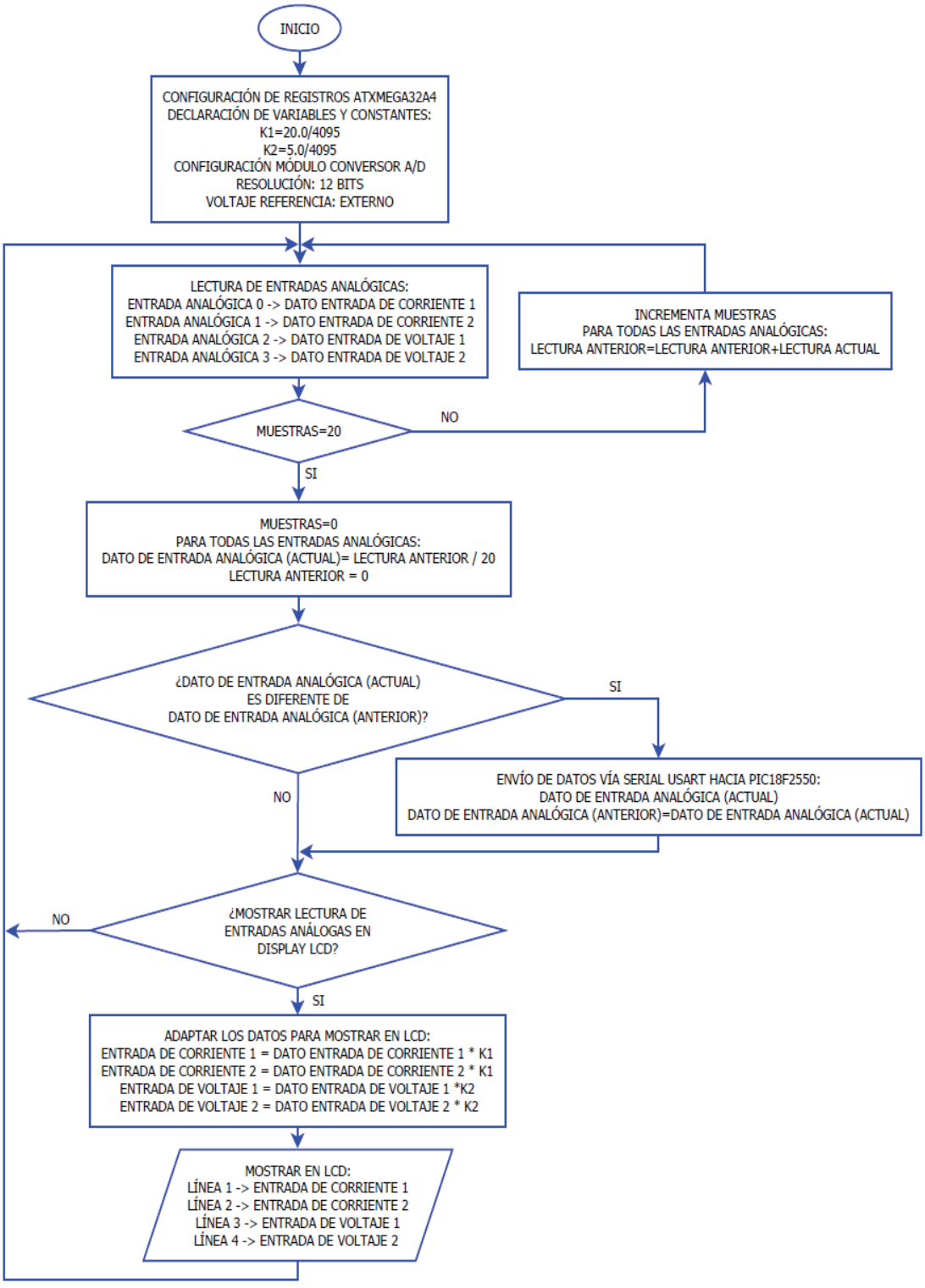


Figura 3.7. Diagrama de Flujo Entradas Analógicas.

3.3.6 DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE VELOCIDAD MOTOR DC

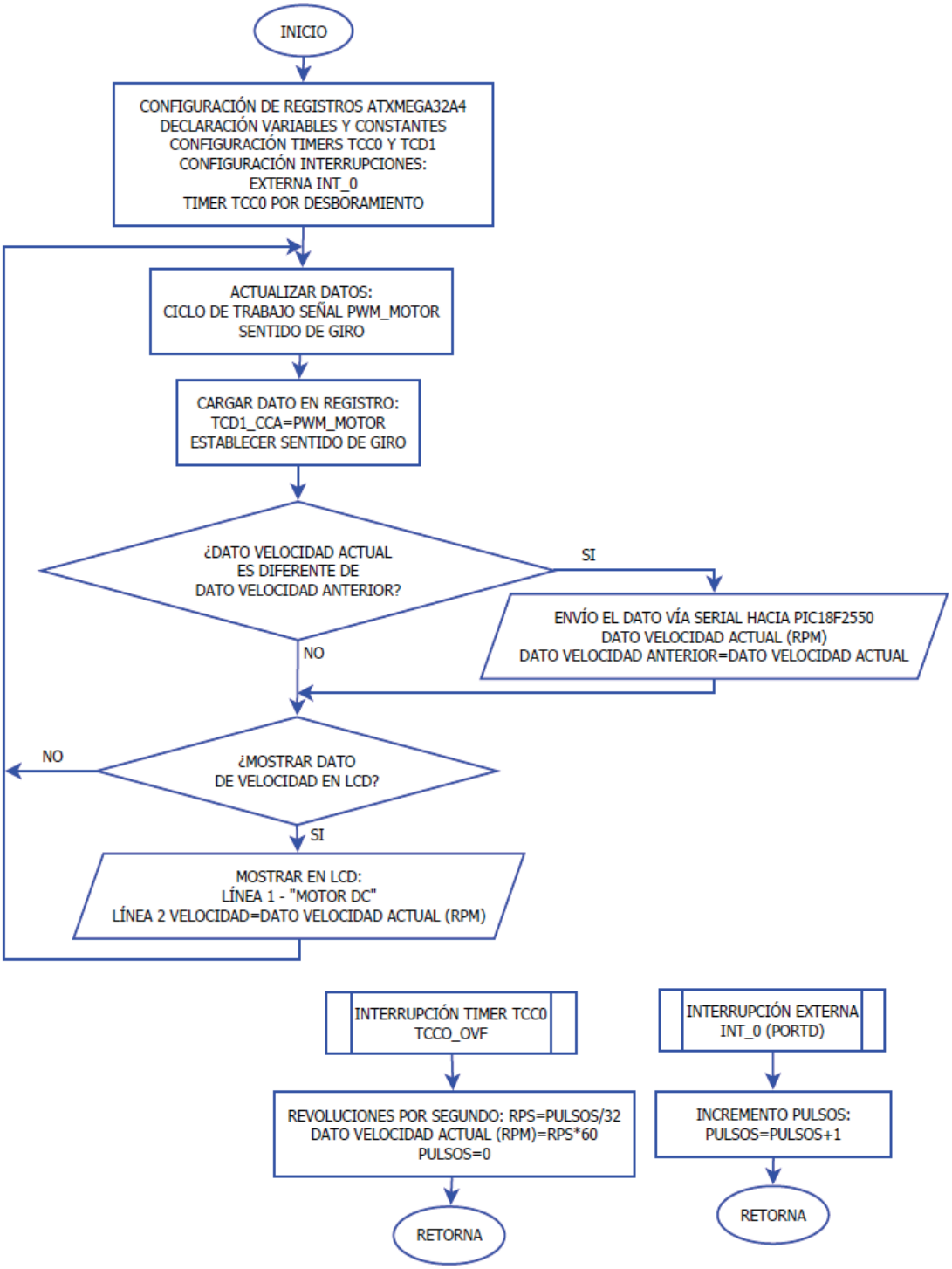


Figura 3.8. Diagrama de Flujo Control de Motor DC.

Para generar la señal PWM de control para el motor DC se utiliza el timer TCD1 y se carga en el registro asociado a este (TCD1_CCA) un valor que puede estar en el rango de 0 a 65535. Para generar la interrupción cada segundo se utiliza el timer TCC0 y mediante la interrupción externa INT0 se cuentan los pulsos y por ende las revoluciones por segundo (RPS) y se lo adapta a (RPM) usando la siguiente fórmula:

$$Revoluciones\ por\ Segundo(RPS) = \frac{Número\ de\ Pulsos\ en\ un\ Segundo(PPS)}{Número\ de\ pulsos\ por\ Revolución(PPR)} \quad (3.1)$$

Dado que el encoder presenta 32 pulsos por revolución: PPR=32

$$RPS = \frac{PPS}{32}$$

Para obtener las RPM:

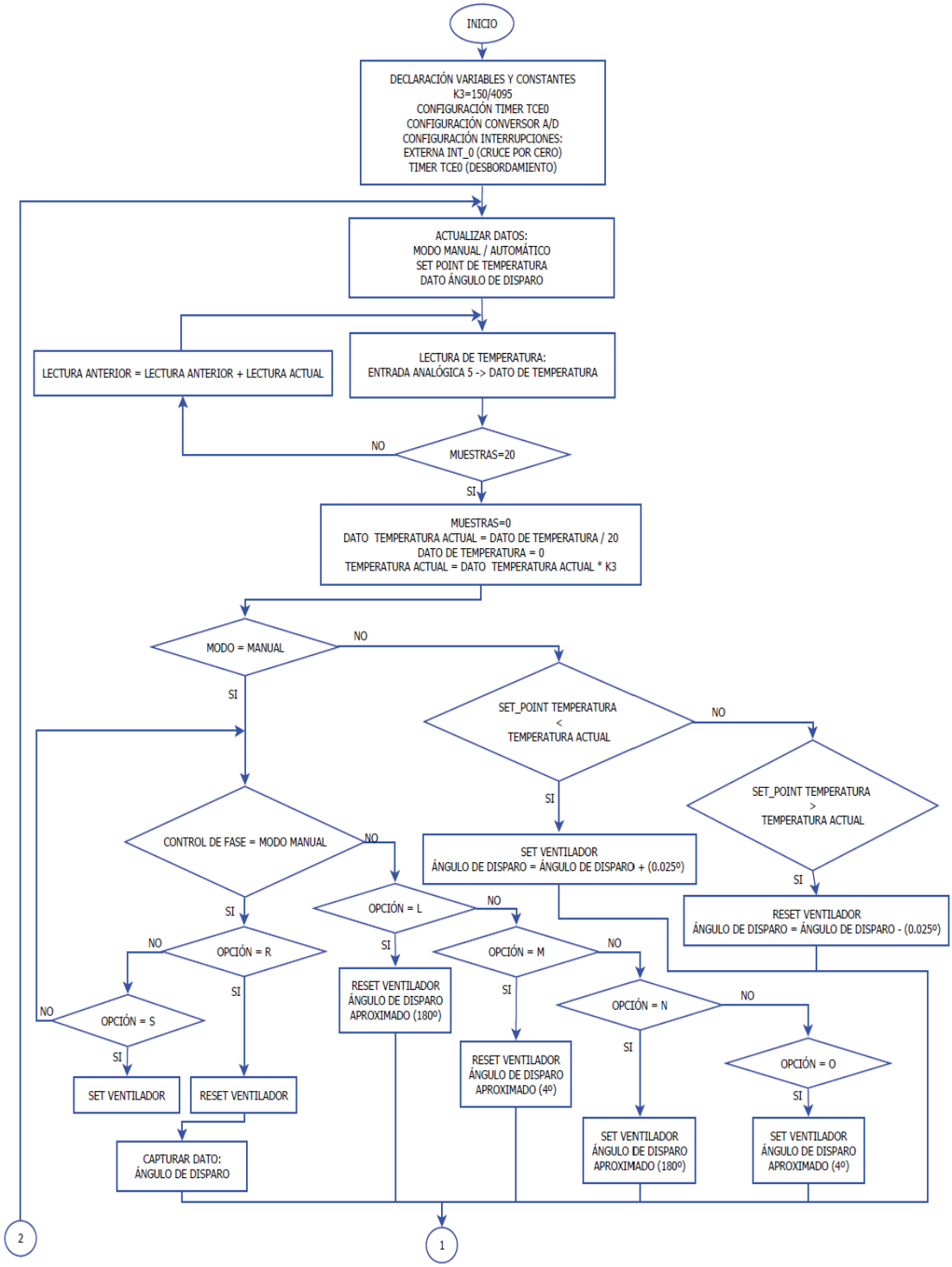
$$RPM = RPS * 60\ (segundos)$$

3.3.7 DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE TEMPERATURA

Para el control de temperatura se reciben los datos vía comunicación serial, se verifica sí se ha seleccionado el modo manual o automático y se actualizan los datos.

En el modo manual la opción S activa el ventilador mientras que la opción R desactiva el ventilador y se captura el dato para modificar el ángulo de disparo. Sí no se va a modificar el ángulo de disparo de la lámpara, se tienen las siguientes opciones: opción L desactiva tanto el ventilador como la lámpara, opción M mantiene desactivado el ventilador y activa la lámpara, opción N activa el ventilador y desactiva la lámpara, finalmente la opción O activa tanto el ventilador como la lámpara.

En el modo automático el ventilador se activa o desactiva automáticamente y el ángulo de disparo incrementa o disminuye dependiendo de los valores de set point de temperatura y la lectura de temperatura registrada. El diagrama de flujo se indica en la figura 3.9.


INICIO
DECLARACIÓN VARIABLES Y CONSTANTES
K3=150/4095
CONFIGURACIÓN TIMER TCE0
CONFIGURACIÓN CONVERSOR A/D
CONFIGURACIÓN INTERRUPCIONES:
EXTERNA INT_0 (CRUCE POR CERO)
TIMER TCE0 (DESBORDAMIENTO)
ACTUALIZAR DATOS:
MODO MANUAL / AUTOMÁTICO
SET POINT DE TEMPERATURA
DATO ÁNGULO DE DISPARO
LECTURA DE TEMPERATURA:
ENTRADA ANALÓGICA 5 -> DATO DE TEMPERATURA
LECTURA ANTERIOR = LECTURA ANTERIOR + LECTURA ACTUAL
NO
MUESTRAS=20
SI
MUESTRAS=0
DATO TEMPERATURA ACTUAL = DATO DE TEMPERATURA / 20
DATO DE TEMPERATURA = 0
TEMPERATURA ACTUAL = DATO TEMPERATURA ACTUAL * K3
MODO = MANUAL
NO
SI
SET_POINT TEMPERATURA
<
TEMPERATURA ACTUAL
NO
SI
SET_POINT TEMPERATURA
>
TEMPERATURA ACTUAL
SI
RESET VENTILADOR
ÁNGULO DE DISPARO = ÁNGULO DE DISPARO - (0.025º)
SET VENTILADOR
ÁNGULO DE DISPARO = ÁNGULO DE DISPARO + (0.025º)
CONTROL DE FASE = MODO MANUAL
NO
SI
OPCIÓN = L
NO
SI
RESET VENTILADOR
ÁNGULO DE DISPARO
APROXIMADO (180º)
OPCIÓN = M
NO
SI
RESET VENTILADOR
ÁNGULO DE DISPARO
APROXIMADO (4º)
OPCIÓN = N
NO
SI
SET VENTILADOR
ÁNGULO DE DISPARO
APROXIMADO (180º)
OPCIÓN = O
SI
SET VENTILADOR
ÁNGULO DE DISPARO
APROXIMADO (4º)
OPCIÓN = R
NO
SI
OPCIÓN = S
NO
SI
SET VENTILADOR
RESET VENTILADOR
CAPTURAR DATO:
ÁNGULO DE DISPARO
2
1

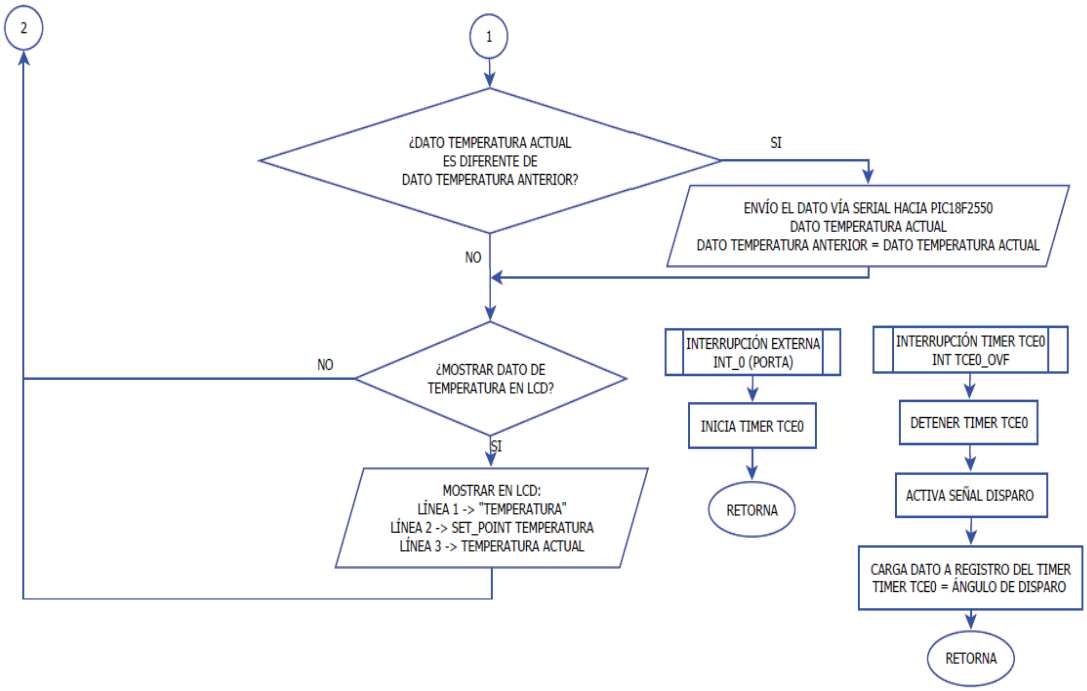


Figura 3.9. Diagrama de Flujo Control de Temperatura.

El sensor de temperatura envía una señal de voltaje que varía en 10 mV por cada grado centígrado. Para la lectura de temperatura se utiliza el canal analógico PA4, para su tratamiento en el microcontrolador se toman 20 lecturas y se obtiene el promedio, se multiplica por la constante K3 (150.0/4095) para obtener el dato de la temperatura actual, 150 dado que el sensor trabaja en el rango de 0 a 150ºC y 4095 ya que el conversor analógico digital es de 12 bits.

3.3.8 DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE POSICIONAMIENTO SERVOMOTOR

Para el manejo del servomotor se utiliza el timer TCC1 para generar la señal PWM que controla al servomotor. Se captura el dato y se carga al registro asociado a este timer; el dato debe estar en el rango de 9400 a 38000 para generar los ciclos de trabajo de la señal PWM. Para establecer la posición del eje del servomotor (0 – 180º) se utiliza la constante K5 (180/28600), así por ejemplo:

$$Valor\ \ cargado\ al\ registro\ del\ timer: \quad Servo = 20000$$

$$Dato\ de\ posición\ mostrado\ en\ LDC: \qquad Posición = (Servo - 9400) * K5 \quad (3.2)$$

$$Posición = (20000 - 9400) * \left(\frac{180}{28600}\right) = 66.7\ grados.$$

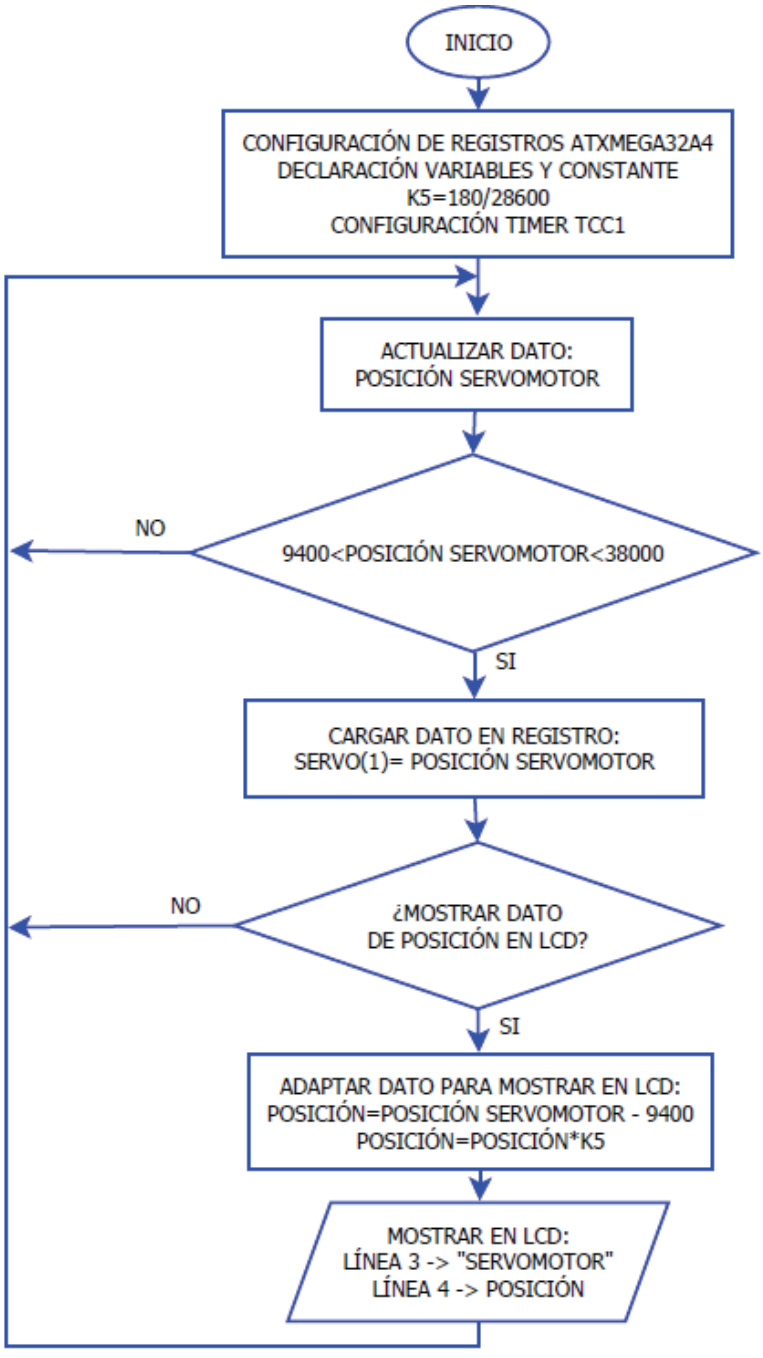


Figura 3.10. Diagrama de Flujo Control Servomotor.

3.3.9 DIAGRAMA DE FLUJO SALIDAS TIPO RELÉ

Para el manejo de las 2 salidas tipo relé se captura el dato (ESTADO RELÉS), cuyo valor pueden ser A, B, C o D; dependiendo del valor las salidas tipo relé cambiaran de estado de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Tabla de Estado de la Salidas Tipo Relé.

Nº	ESTADO SALIDA RELÉ 2	ESTADO SALIDA RELÉ 1	VALOR VARIABLE ESTADOS RELÉS
1	Desactivado	Desactivado	A
2	Desactivado	Activado	B
3	Activado	Desactivado	C
4	Activado	Activado	D

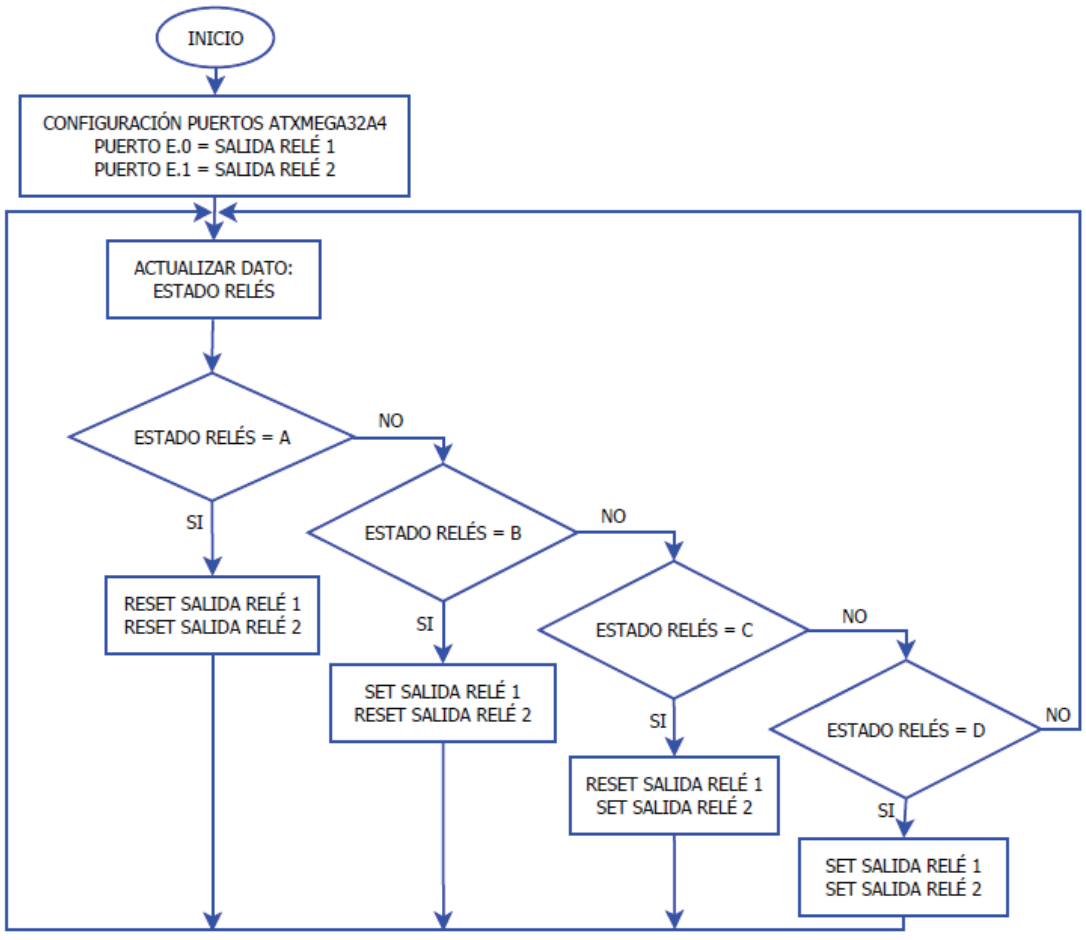


Figura 3.11. Diagrama de Flujo Salidas Tipo Relé.

3.3.10 DIAGRAMA DE FLUJO SALIDAS PWM

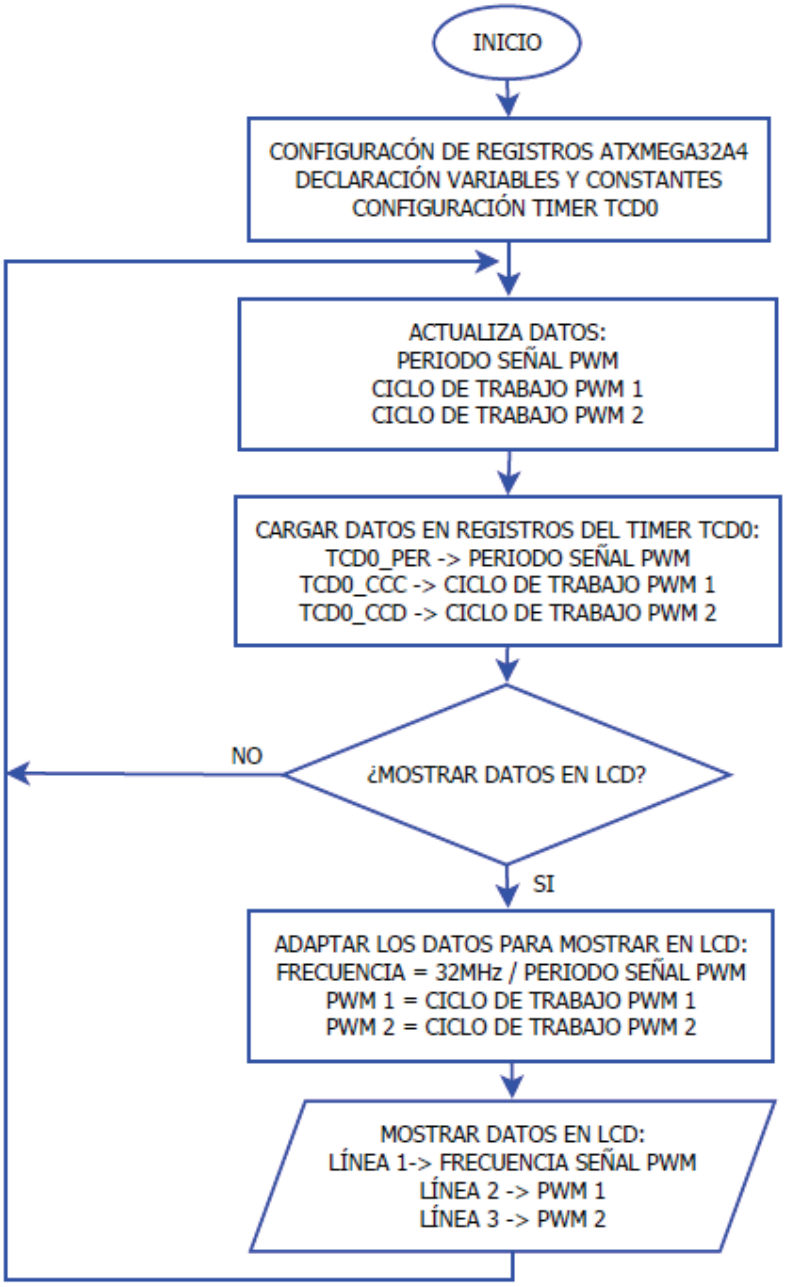


Figura 3.12. Diagrama de Flujo Salidas Tipo PWM.

Para las salidas tipo PWM se utiliza los registros del timer TCD0, el dato cargado para el registro (TCD0_PER) asociado al periodo (frecuencia) puede estar en el rango de 3200 a 64000, mientras que los datos cargados a los registros (TCD0_CCC y TCD0_CCD) para el ciclo de trabajo dependen directamente del valor cargado en el registro (TCD0_PER), bajo las siguientes consideraciones:

Frecuencia: $$f_{OSC} = 32\ MHz$$

$$f_{TIMER} = \frac{f_{OSC}}{Prescaler} \rightarrow f_{TIMER} = \frac{32\ MHz}{1} = 32\ MHz \quad (3.3)$$

$$f_{PWM} = \frac{f_{TIMER}}{TCD0_PER} \rightarrow f_{PWM} = \frac{32\ MHz}{TCD0_PER} \quad (3.4)$$

Ciclo de trabajo:

$$TCD0_CCD = \frac{TCD0_PER * PWM_DUTY}{100} \quad (3.5)$$

3.3.11 DIAGRAMA DE FLUJO MANEJO LCD

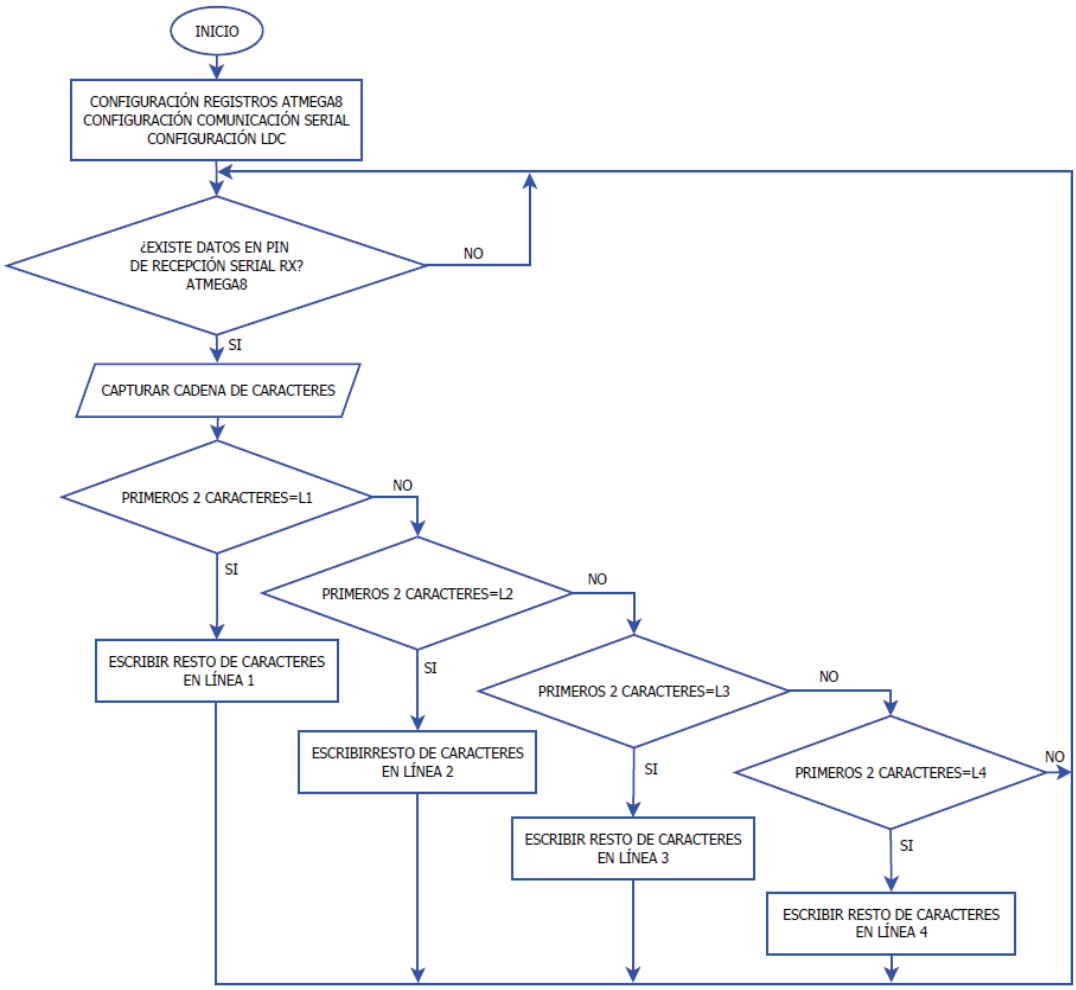


Figura 3.13. Diagrama de Flujo Manejo LCD.

Para el manejo del LCD el ATXMEGA32A4 envía los datos vía serial en forma de cadena de caracteres, el ATMEGA8 captura esta cadena de caracteres y compara los dos primeros caracteres con L1, L2, L3 o L4; descarta estos dos primeros caracteres y escribe el resto de la cadena en las líneas 1, 2, 3 o 4 del LCD según corresponda.

3.4 INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW

Para desarrollar la interfaz gráfica se utilizó Labview, entre las principales características se pueden mencionar las siguientes:

- Facilidad para manejo de interfaces de comunicación por medio de recursos como son: puerto serial, puerto paralelo, USB, GPIB, TCP/IP, Bluetooth.

- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones tales como: ActiveX, Matlab, Librerías de funciones DLL, AUTOCAD, SOLIDWORKS.

- Capacidad de adquisición y tratamiento de imágenes, control de movimiento, análisis de sistemas en tiempo real, procesado digital de señales.

Dentro del desarrollo de la interfaz una de las funciones más importantes que se empleó son las funciones de VISA tanto para abrir, leer y escribir en el dispositivo, construido en conjunto con funciones de arreglos y lazos de secuencia que permiten ordenar tanto los datos que se envían como los datos que se reciben.

En lo concerniente al panel frontal se ha hecho uso de un Tab Control para ordenar las opciones que pone a disposición el módulo MESCI_USB por medio de 8 ventanas o pestañas tal como se indican a continuación:

3.4.1 VENTANA DE PRESENTACIÓN

Es la ventana principal donde se encuentra un visualizador en el que se despliegan varias imágenes relacionadas con el módulo, una pestaña que permite abrir al dispositivo MESCI_USB_EPN como un recurso VISA, y un menú que permite iniciar sesión y mostrar los valores de parámetros del módulo en el LCD. Cabe indicar que en el LCD se mostrará únicamente una de las opciones, por lo que el usuario sólo deberá seleccionar una. En el caso que se seleccionen dos o más opciones se muestra únicamente la que se ha seleccionado primero. La ventana de presentación se indica en la figura 3.14.

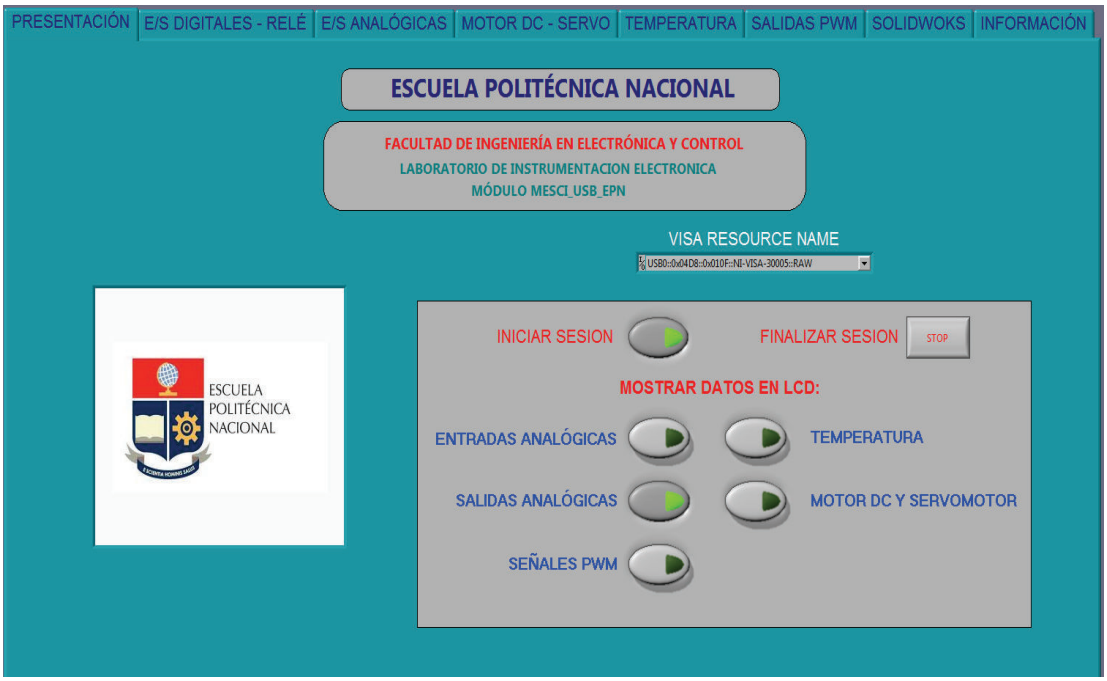


Figura 3.14. Ventana de Presentación.

3.4.2 VENTANA DE E/S DIGITALES Y TIPO RELÉ

En esta ventana se dispone de los controles e indicadores para el manejo tanto de las entradas y salidas digitales como de las salidas tipo relé, para el caso de las salidas digitales se dispone de controles tipo switch con sus respectivos indicadores de color rojo, para las entradas digitales se dispone de indicadores de

color verde, para las salidas tipo relé se cuenta con controles tipo switch que permitirán activar o desactivar las salidas tipo relé. Lo descrito anteriormente se puede observar en la figura 3.15.

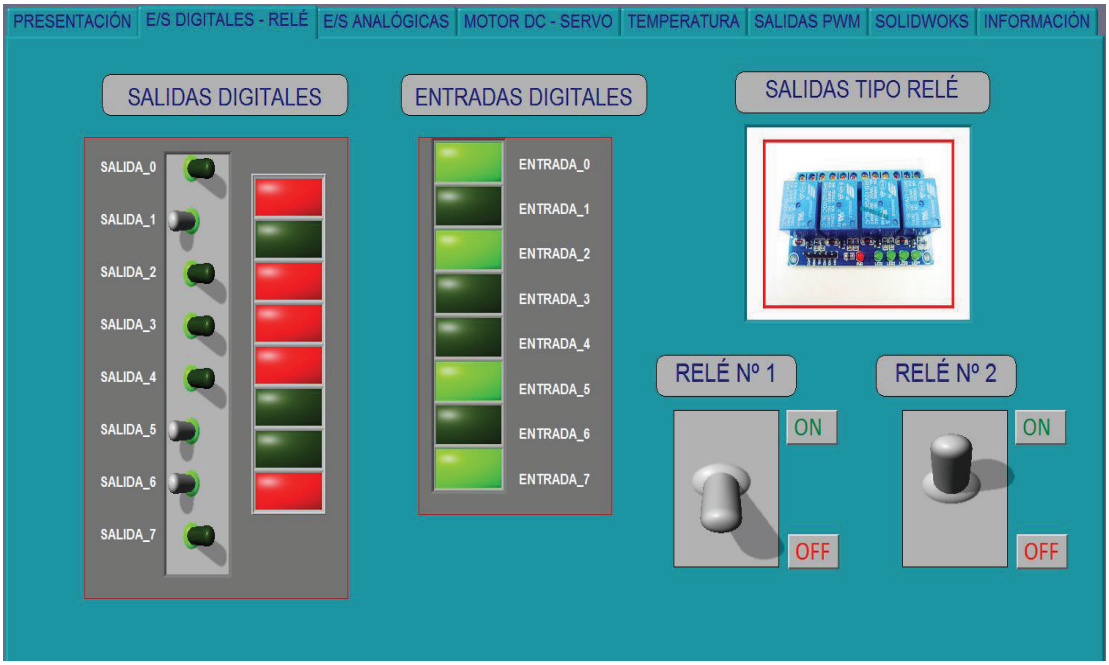


Figura 3.15. Ventana de E/S Digitales y Tipo Relé.

3.4.3 VENTANA DE ENTRADAS Y SALIDAS ANALÓGICAS

La ventana de entradas y salidas analógicas cuenta con controles tipo puntero deslizante para controlar el valor de las salidas tanto de voltaje como de corriente. Cuenta también con un indicador gráfico dónde se puede observar la variación tanto de las entradas como de las salidas en función del tiempo; para indicar el valor de las entradas se cuenta a más de indicadores numéricos con indicadores graduales. Los controles e indicadores para las señales de voltaje se hallan localizados en la parte superior y para las señales de corriente se hallan en la parte inferior tal como se aprecia en la figura 3.16.

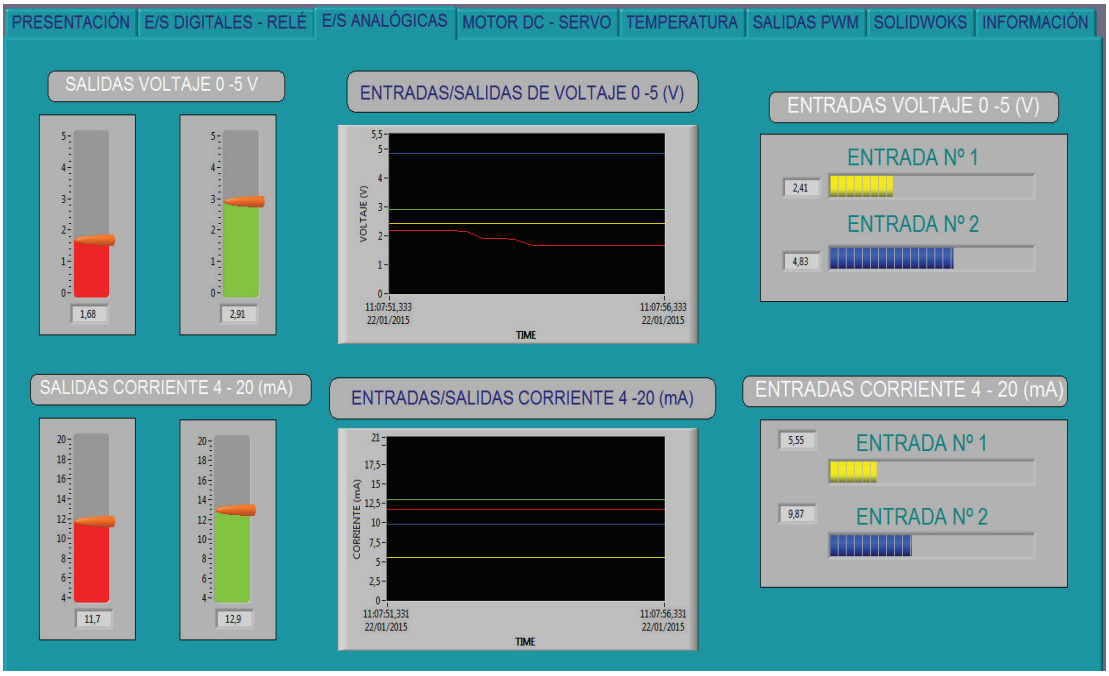


Figura 3.16. Ventana de Entradas/Salidas Analógicas.

3.4.4 VENTANA PARA CONTROL DE MOTOR DC Y SERVOMOTOR

En la ventana para control del motor DC se cuenta con controles tipo switch para controlar el encendido y apagado del motor, así como su sentido de giro. Para controlar la velocidad del motor se tiene un control tipo puntero deslizante que permite variar el ciclo de trabajo de la señal PWM que controla al motor; en conjunto con estos se tiene un indicador gráfico para mostrar la velocidad del motor.

Para el caso del servomotor se dispone de un control que permite variar la posición del eje del servomotor en un rango de 0 a 180 grados. Esto se puede observar en la figura 3.17.

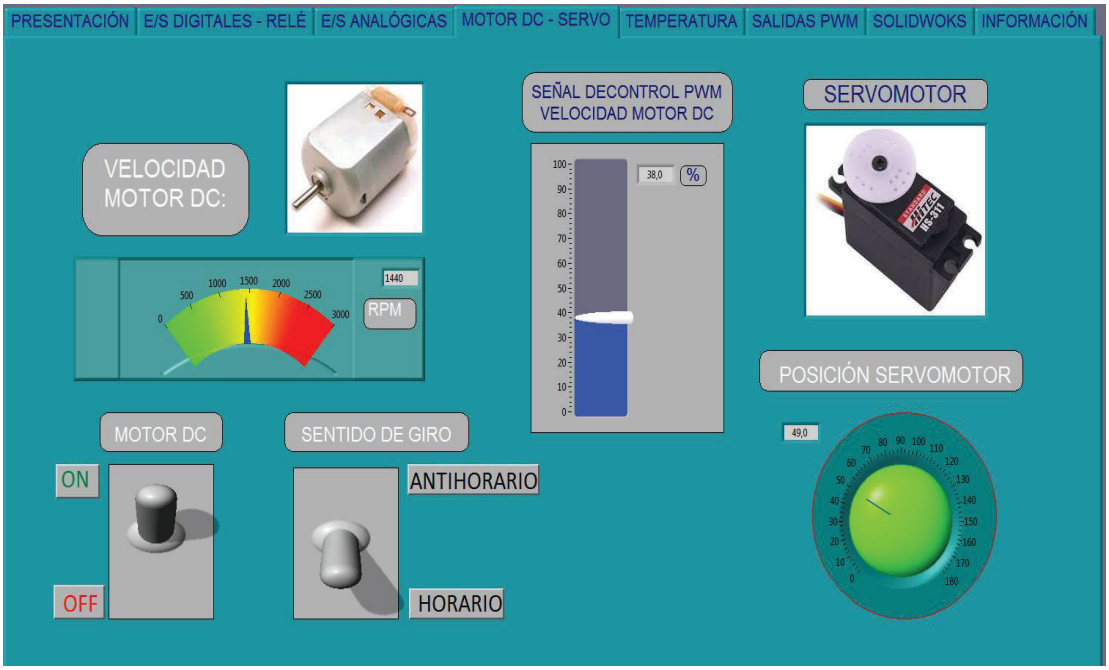


Figura 3.17. Ventana de Control Motor DC y Servomotor.

3.4.5 VENTANA PARA CONTROL DE TEMPERATURA

En la ventana para el control de temperatura se dispone de un control tipo puntero deslizante para establecer la temperatura que se desea en el interior del módulo, en conjunto con este se tiene un indicador de la temperatura medida. Se dispone de controles para el control manual tanto para el ventilador, la lámpara y el ángulo de disparo del control de fase que permite variar el voltaje que alimenta a la lámpara. Esto se observa en la figura 3.18.

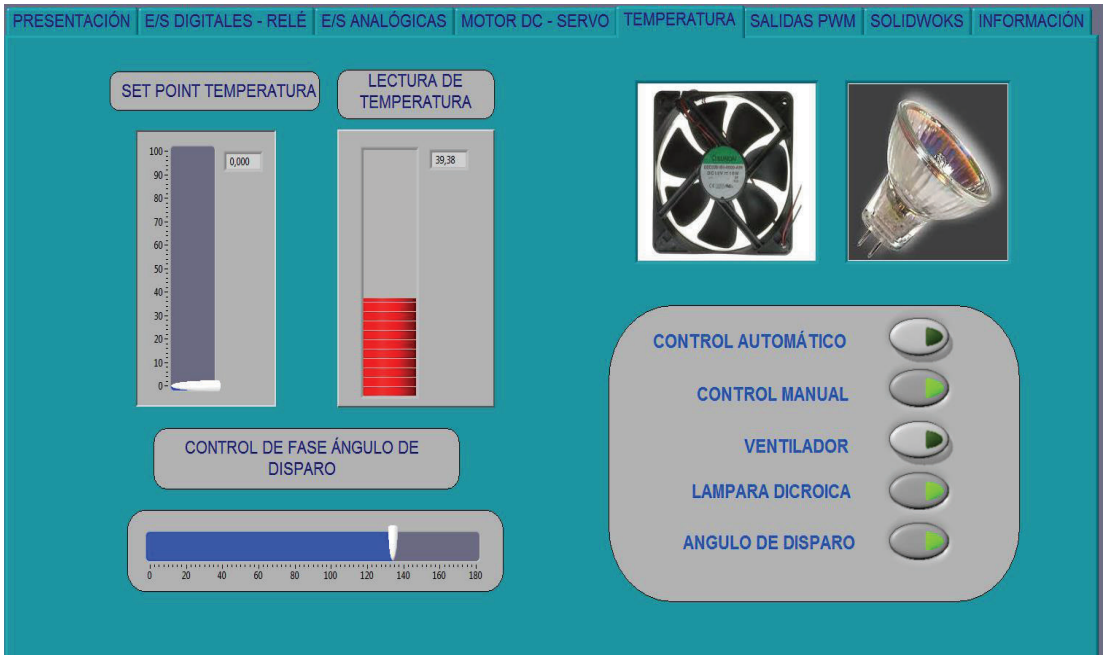


Figura 3.18. Ventana para Control de Temperatura.

3.4.6 VENTANA PARA CONTROL DE SALIDAS TIPO PWM

La ventana para el control de las salidas tipo PWM dispone de controles tipo puntero deslizante que permiten variar la frecuencia de las señales PWM en un rango de 500 Hz hasta 10 KHz; también se puede variar el ciclo de trabajo de las señales PWM y cuenta con un indicador visual, tal como se puede observar en la figura 3.19.

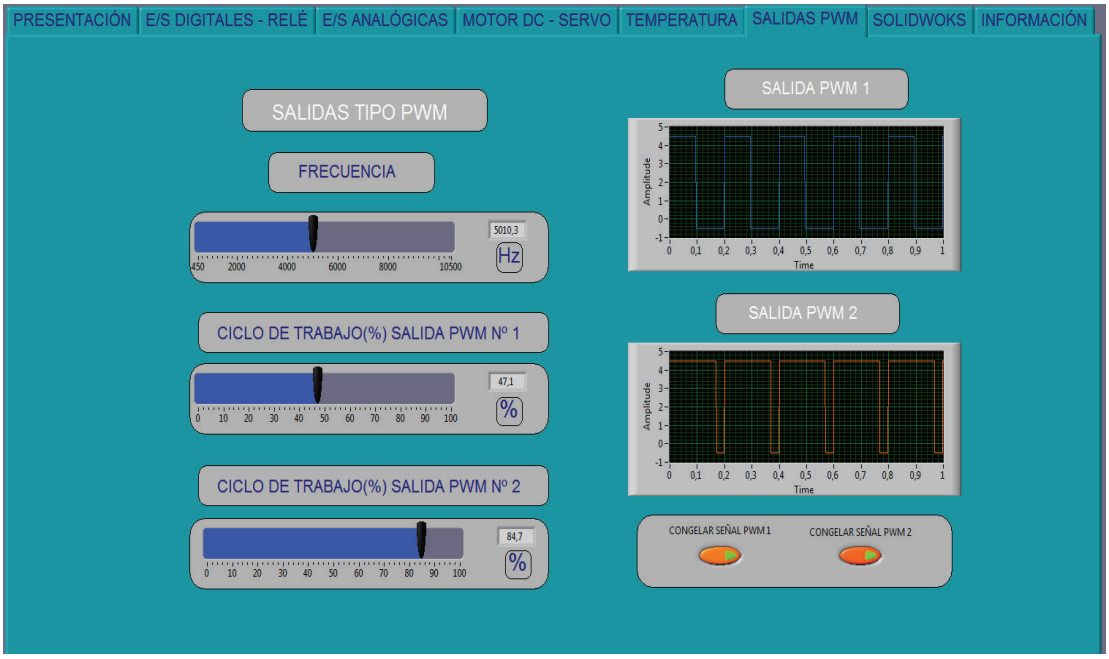


Figura 3.19. Ventana para Control de Salidas PWM.

3.4.7 VENTANA PARA CONTROL DE ENSAMBLE SOLIDWORKS

En esta ventana se presentan los controles para la ejecución de la simulación del objeto 3D, mediante el enlace entre Labview y Solidworks. Se muestran los valores provenientes del acelerómetro y se tiene la opción de realizar la simulación con los datos provenientes del acelerómetro o con datos generados en Labview. Esto se puede observar en la figura 3.20.

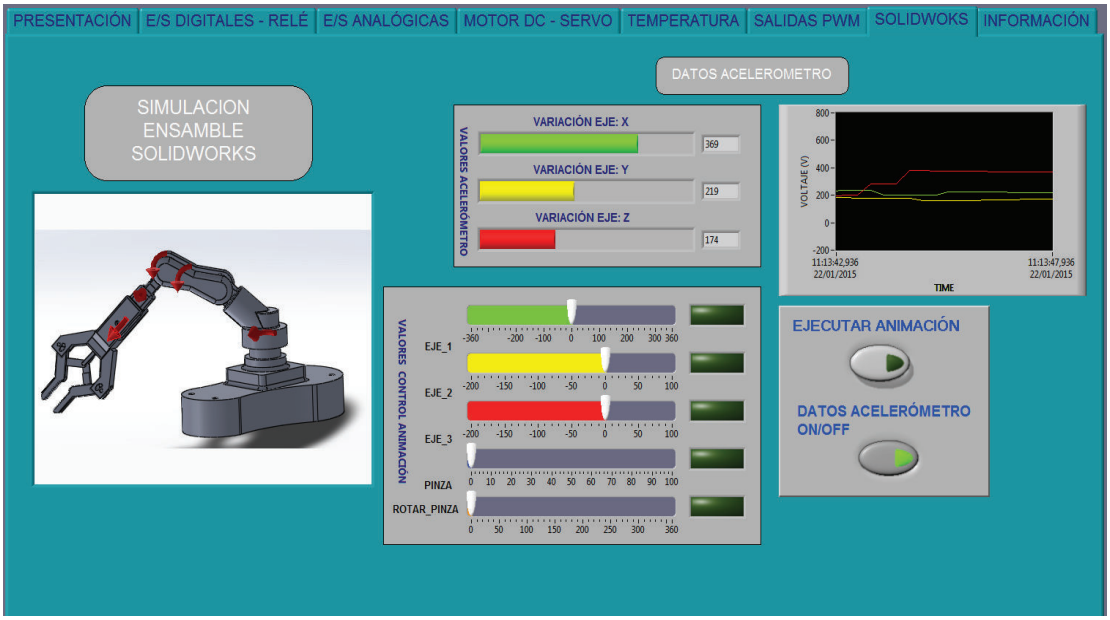


Figura 3.20. Ventana de Control de Ensamble Solidworks.

3.4.8 VENTANA DE INFORMACIÓN

En esta ventana se indican información y pautas generales para la correcta manipulación del módulo.

Figura 3.21. Ventana de Información.

3.5 NI VISA (CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO USB)

VISA Arquitectura de Software para Instrumentos Virtuales es un estándar que permite la configuración y programación para la solución de problemas de sistemas de instrumentación que comprende interfaces de comunicación GPIB, PXI, USB, Serial, Ethernet. NI VISA incluye librerías de software y servicios de configuración como es el caso del MAX (Measurement & Automation Explorer).

3.5.1 CONFIGURACIÓN DE NI-VISA PARA CONTROL DEL DISPOSITIVO USB

La comunicación a través del bus USB es una comunicación basada en mensajes; lo cual significa que un computador y un dispositivo USB se comunica enviando comandos y datos a través del bus en forma de textos. Se puede utilizar las funciones de lectura y escritura del NI-VISA para enviar dichos comandos a un instrumento y leer la respuesta del mismo.

Configuración de NI-VISA.

Existen tres pasos para la configuración del dispositivo USB y así utilizarlo con NI-VISA.

1. Generación archivo .inf
2. Instalación de archivo .inf
3. Prueba del dispositivo

3.5.2 GENERACIÓN DEL ARCHIVO .INF

Para comunicarse con el dispositivo por medio de las funciones NI-VISA se requiere que NI-VISA sea el controlador predeterminado para el dispositivo USB, y se debe generar el archivo .inf. Este archivo se genera automáticamente empleando la utilidad VISA Driver Development Wizard (DDW). El proceso para generar dicho archivo es el siguiente:

Abrir la utilidad DDW, para ello se selecciona Inicio\Todos los programas\National Instruments\VISA\Driver Development Wizard. Como se está creando el controlador para un dispositivo USB, seleccionar USB y presionar next. La figura 3.22 muestra la herramienta NI-VISA Driver Wizard.

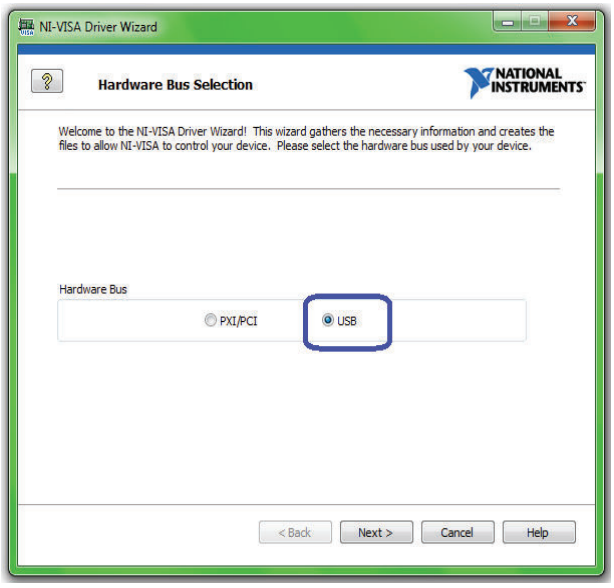


Figura 3.22. Paso 1 Selección como dispositivo USB.

A continuación aparece la ventana que se muestra en la figura 3.23, en la cual se selecciona Other y se continúa con el proceso.

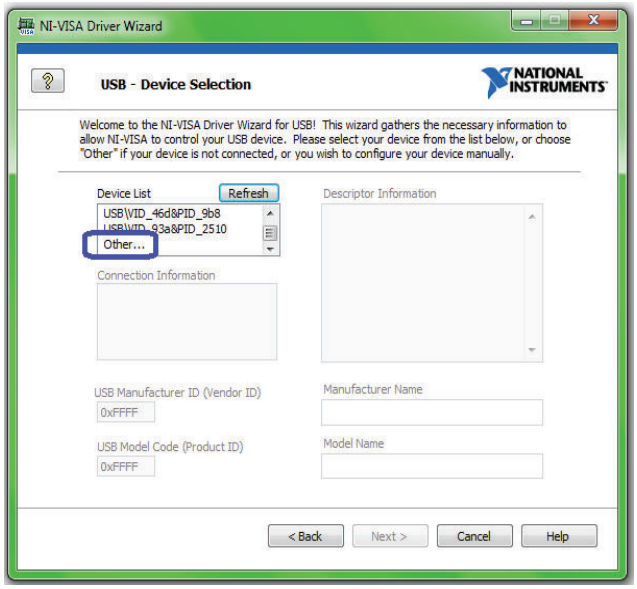


Figura 3.23. Paso 2 Generar otros VID y PID.

En la ventana que aparece en la figura 3.24 se coloca la información básica del dispositivo, información como el número de identificación del proveedor VID, número de identificación del producto PID, la compañía y el nombre del producto.

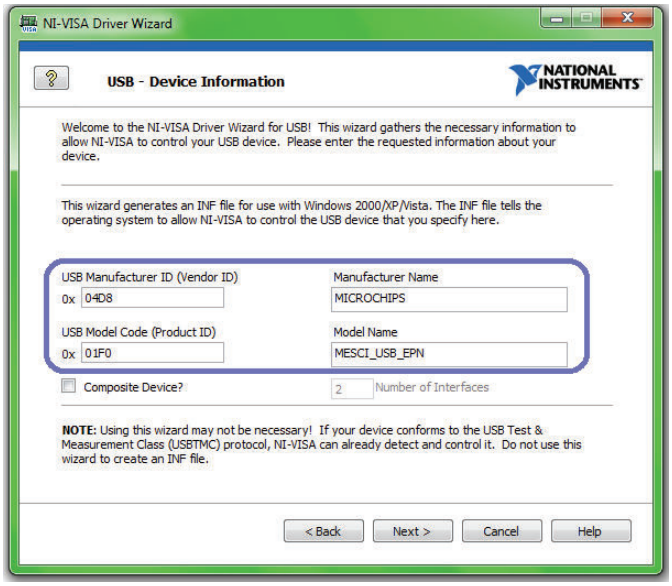


Figura 3.24. Paso 3 Propiedades para el Dispositivo.

Seguidamente se muestra la ventana de las propiedades del archivo .inf a generarse, en el cual se puede colocar el nombre y ubicación del archivo; es recomendable cambiar únicamente el nombre, la ubicación donde se creará el archivo conservar la que se proporciona por defecto, seleccionar next y como seguramente la carpeta NI-VISA no existe, entonces seleccionar crear dicha carpeta. Esto se indica en la figura 3.25.

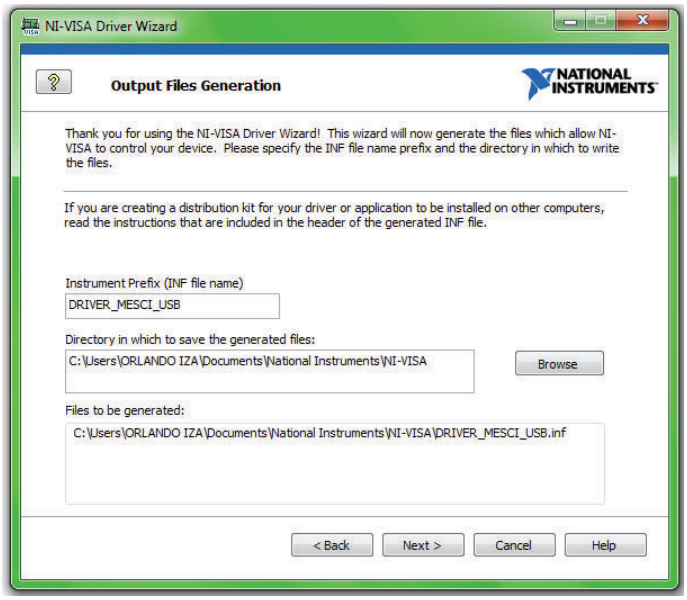


Figura 3.25. Paso 4 Ubicación dónde se generará el Archivo .inf

La ventana que aparece en la figura 3.26 proporciona varias opciones de instalación del driver generado. La selección que viene predeterminada es instalar la información de configuración en el sistema operativo y por lo general es la mejor opción. Seleccionar la opción que viene predeterminada y hacer clic en finish para terminar con el proceso de creación del driver.

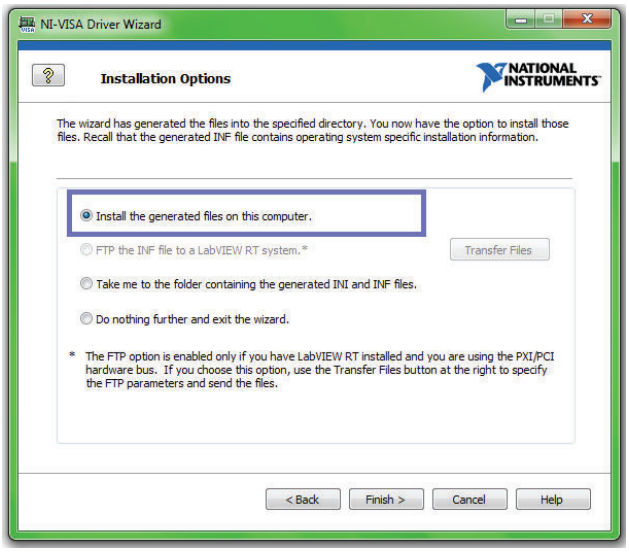


Figura 3.26. Paso 5 Instalación de Archivo .inf

Seguramente se presentará un conflicto con el tema de las seguridades del sistema operativo mencionando que “no se reconoce” o “que no se puede comprobar el editor del software para el controlador”. No prestar mayor atención y seleccionar la opción instalar este software de controlador de todas formas.

Finalmente el archivo .inf se habrá creado en el directorio indicado con las propiedades que se especificó anteriormente. Se puede verificar la creación del archivo .inf acudiendo al directorio donde se especificó crear; se verá que en realidad se han creado dos archivos .inf, uno de los cuales es para versiones de sistema operativo anterior a Windows Vista y el otro es para Windows Vista o Windows 7.

3.5.3 INSTALACIÓN DEL ARCHIVO .INF

La instalación de los archivo .inf generados es diferente para cada versión de Windows. Al utilizar el Driver Development Wizard para la creación del archivo .inf las instrucciones de instalación se incluyen en el encabezado de cada archivo .inf y se puede acceder a esta y mayor información detallada como los identificadores VID, PID, nombre del dispositivo, nombre del fabricante entre otras cosas gracias a que los archivos generados son archivos de texto ASCII y se los puede abrir utilizando un editor de texto.

En este caso se cuenta con Windows 7 y para instalar el driver generado basta con seleccionar el archivo, dar clic derecho y seleccionar instalar.

Para aquellos que trabajen con Windows XP se deberá copiar los archivos generados a la carpeta INF, generalmente ubicada en Disco Local (C:)\Windows\Inf. Hay que considerar que esta carpeta puede estar oculta, por lo que sería necesario cambiar las opciones de carpeta para poder verla. Una vez que se ha copiado los archivos generados, entonces se hará clic derecho sobre el archivo y seleccionará instalar.

Una vez realizado el proceso de instalación estará todo listo para conectar el dispositivo USB y esperar que el Sistema Operativo lo reconozca.

La primera vez que se conecte el dispositivo USB hacia el computador, se mostrará un mensaje de “nuevo hardware encontrado” y se iniciará el proceso automático de instalación del controlador. Si todo se ha realizado correctamente el dispositivo USB será reconocido por el computador y se puede proceder a utilizarlo.

3.6 ENLACE LABVIEW- SOLIDWORKS

El primer paso es crear en Solidworks un ensamble con las relaciones de posición y verificar que dentro de la opción de complementos se hallen activos los complementos Solidworks Motion y Solidworks Simulation.

Seguidamente se debe seleccionar la pestaña Estudio de movimiento y en las opciones del tipo de estudio seleccionar Análisis de movimiento, una vez realizado esto se puede agregar los motores que permitirán el movimiento a las piezas de nuestro ensamble. Al seleccionar un motor se puede configurar el tipo (lineal o rotatorio) y las entidades involucradas en el movimiento. Se debe proceder a guardar el ensamble. Una vez realizados los pasos anteriores en Labview se debe abrir un nuevo proyecto y agregar nuevo ensamble, para ello clic derecho en My Computer\New\ Solidworks Assembly, tal como se observa en la figura 3.27. Como primera opción aparecerá el ensamble recientemente creado; sí no es así, dirigirse a la ubicación y seleccionar el ensamble creado, a continuación se debe agregar los motores para cada uno de los ejes; para ello clic derecho en My Computer\New\NI SoftMotion Axis. Se debe añadir tantos ejes como motores se disponga para la simulación, para los motores se debe habilitar la opción Enable Drive on Transition to Active Mode, para ello clic derecho sobre cada motor y seleccionar Properties, se abrirá una ventana donde se puede habilitar esta opción.

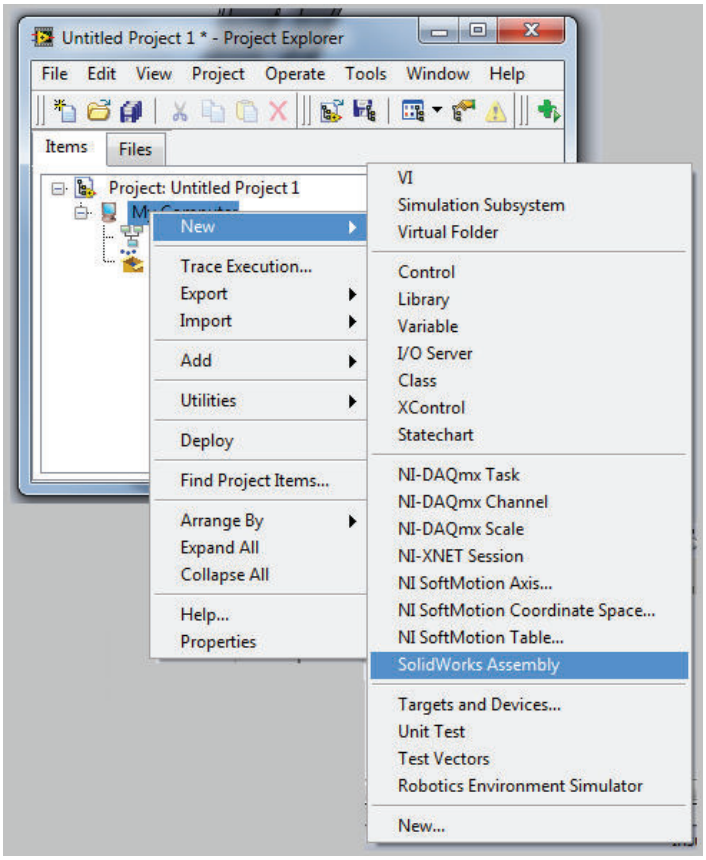


Figura 3.27. Cargar Ensamble al Proyecto.

También debe asegurarse que se halle habilitada la opción Start Scan Engine on Deploy, para ello clic derecho en My Computer\Properties\Scan Engine.

Otro punto muy importante es que el tamaño de paso máximo debe ser 0.001 segundos, para ello clic derecho en Ensamble\Properties y en la ventana que aparece configurar este valor tal como se puede observar en la figura 3.28

A continuación se procede a crear el VI en el cual se incluyen las funciones para el movimiento, presentes dentro del bloque de funciones Vision and Motion, el recurso de entrada para estas funciones es cada uno de los ejes. Para ello se selecciona los ejes y se los arrastra hacia el diagrama de bloques del VI. Guardar los cambios realizados tanto en el VI como en el proyecto.

Finalmente se selecciona My Computer, cada uno de los ejes y el ensamble, se da clic derecho y se selecciona Deploy. Lo más seguro es que aparezca una

advertencia; simplemente seleccionar la opción Aply y esta advertencia se solucionará, entonces el Proyecto y el VI estarán listos para ser probados. Antes de iniciar el VI es importante habilitar o iniciar la simulación, para ello clic derecho sobre el ensamble y seleccionar opción Start Simulation.

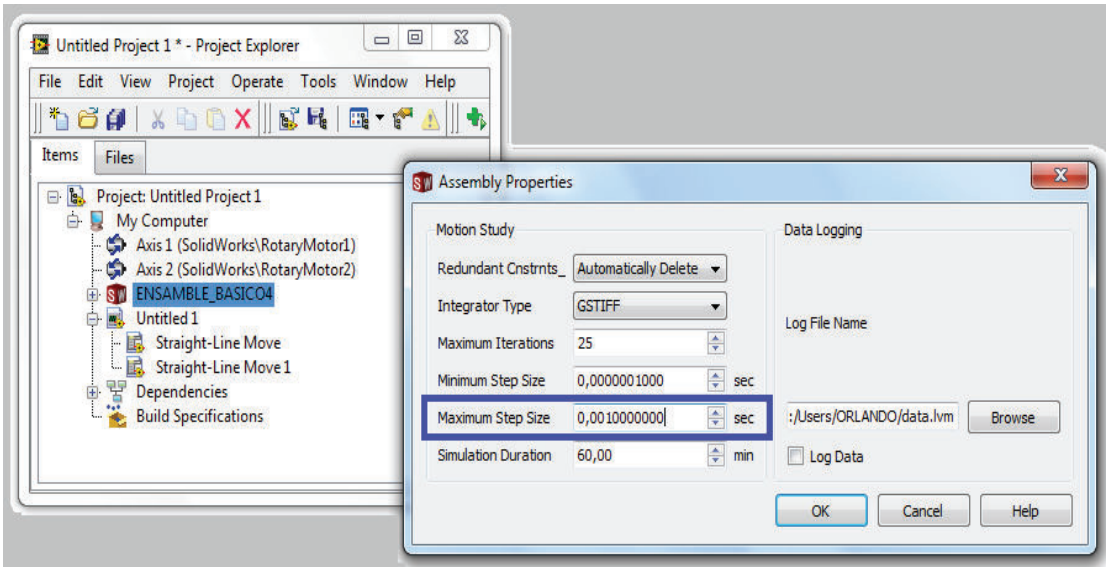


Figura 3.28. Configuración de Propiedades del Ensamble.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

El tema de pruebas y resultados es un punto muy importante, ya que permite constatar el cumplimiento o no de los objetivos planteados, brindando la posibilidad de identificar fallos o errores los cuales se deben ir solucionando conforme se desarrolla el proyecto.

En el proceso de desarrollo uno de los puntos de mayor prioridad es realizar las pruebas de la comunicación USB entre el módulo y la PC, luego de ello y con el desarrollo de una interfaz gráfica en Labview realizar las pruebas correspondientes a la transferencia de datos entre el módulo y la interfaz HMI (Labview). Las pruebas iníciales se realizó con un pequeño circuito, el mismo que se describe más adelante; en este circuito se tiene el microcontrolador PIC18F4550, el cual es el encargado de gestionar la comunicación USB; en conjunto con este se tiene elementos que van a permitir simular entradas y salidas digitales, entradas analógicas, salidas PWM. Cabe indicar que en la placa electrónica definitiva del módulo MESCI_USB, para gestionar la comunicación USB se empleó el microcontrolador PIC18F2550.

En una segunda etapa se realizó las pruebas con el módulo, es decir con todos los elementos montados en la placa, es en este punto dónde finalmente se podrá evaluar el cumplimiento total de los objetivos planteados.

4.1 PRUEBAS DE RECONOCIMIENTO DEL DISPOSITIVO USB

Existen varias formas de probar que el computador detectó a nuestro dispositivo como un dispositivo USB. Se lo puede hacer con: Administrador de Dispositivos, VISA Interactive Control o National Instruments Measurement & Automation Explorer; tal como se indica a continuación:

4.1.1 ADMINISTRADOR DE DISPOSITIVOS

Una primera forma de detectar el dispositivo es por medio del administrador de dispositivos como se observa en la figura 4.1. Al abrirlo y conectar el cable hacia nuestro módulo MESCI_USB, este aparece dentro de la categoría NI-VISA USB Devices. Con un clic derecho se pueden ver tanto el controlador como las propiedades que tiene nuestro dispositivo, propiedades tales como descripción del dispositivo (nombre), los identificadores de hardware (VID y PID), fabricante, entre otras; las mismas que se configuraron al crear el driver controlador de nuestro dispositivo.

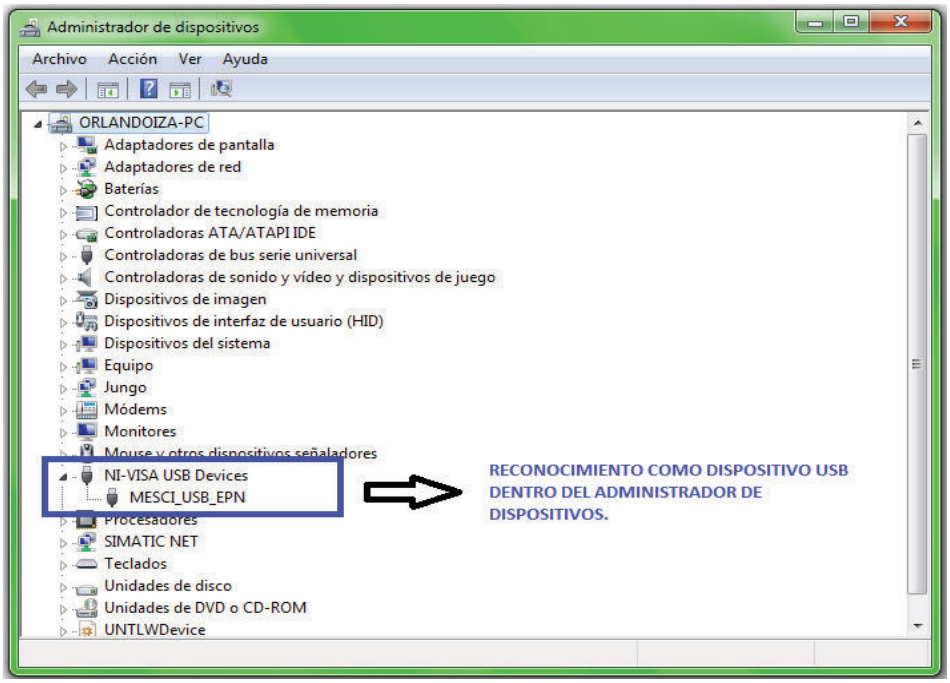


Figura 4.1. Reconocimiento del Dispositivo Bajo la categoría NI-VISA.

4.1.2 VISA INTERACTIVE CONTROL

Al abrir la herramienta VISA Interactive Control: Todos los programas\National Instruments\VISA\VISA Interactive Control, se abre la ventana de la figura 4.2, en la cual aparece nuestro dispositivo dentro de la categoría USB RAW Resources. En esta ventana no aparece el nombre o descripción de nuestro dispositivo, pero

si se puede visualizar los identificadores y el número serial del mismo. Al hacer doble clic sobre el identificador del dispositivo USB, aparece una ventana en la cual se puede observar con más detalle el resto de propiedades del mismo.

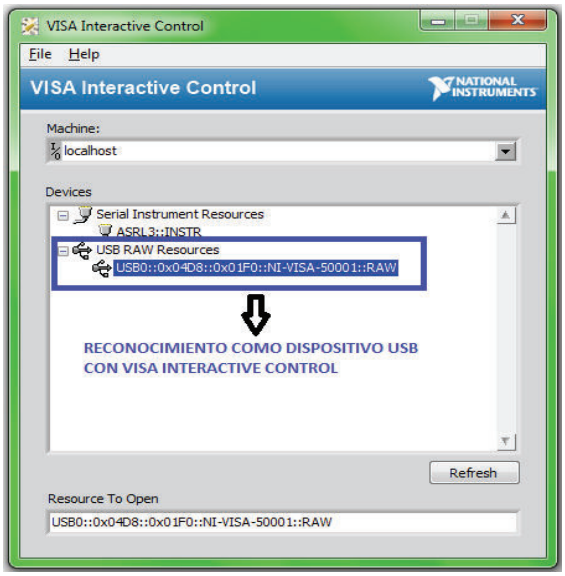


Figura 4.2. Reconocimiento del Dispositivo (VISA Interactive Control).

4.1.3 NATIONAL INSTRUMENTS MEASUREMENT & AUTOMATION EXPLORER (MAX)

Otra utilidad que se puede emplear para ver las propiedades de nuestro dispositivo USB y verificar que este ha sido reconocido por el Sistema Operativo es utilizar Measurement and Automation Explorer, el cual permite configurar el acceso hacia diferentes productos de National Instruments. Al seleccionar View\Refresh se actualiza la visualización de los dispositivos que se tiene y a los cuales se puede acceder por medio de esta herramienta. El dispositivo USB aparece bajo la categoría Devices and Interfaces, lo que significa que está instalado, configurado y listo para utilizarse con NI-VISA. De igual forma en la parte derecha se puede observar ciertas propiedades de nuestro dispositivo tales como: tipo de dispositivo, los identificadores VIP y PID, tal como observa en la figura 4.3.

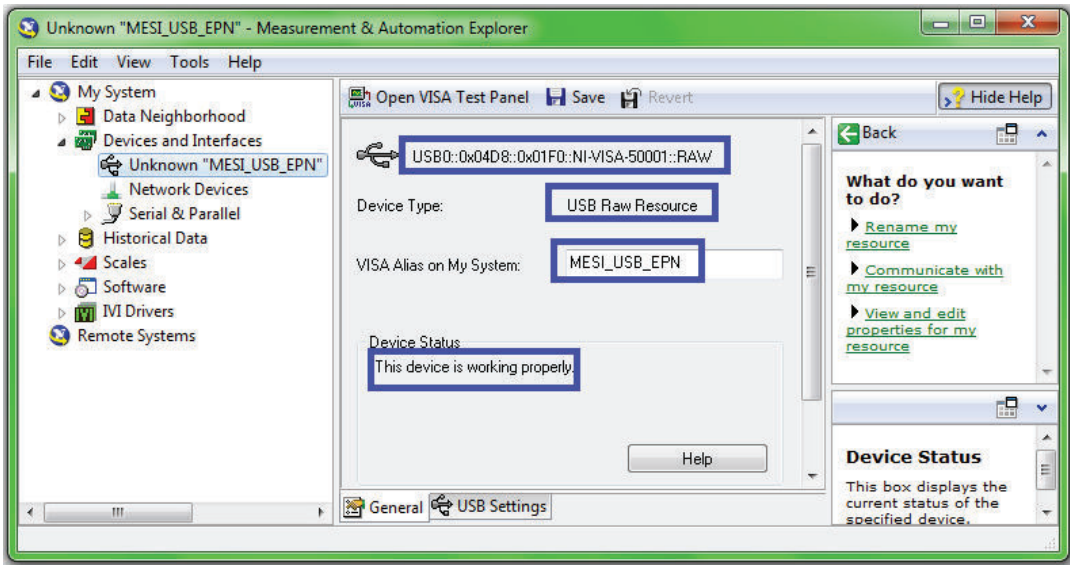


Figura 4.3. Verificación del Dispositivo con la herramienta MAX.

4.1.4 DISPOSITIVOS E IMPRESORAS

Otra forma de verificar si el dispositivo ha sido reconocido exitosamente por el computador es dirigiéndose hacia el Panel de control\Hardware y sonido\Dispositivos e impresoras y verificar que el dispositivo efectivamente ha sido reconocido como dispositivo USB. La ventana de dispositivos e impresoras se muestra en la figura 4.4.

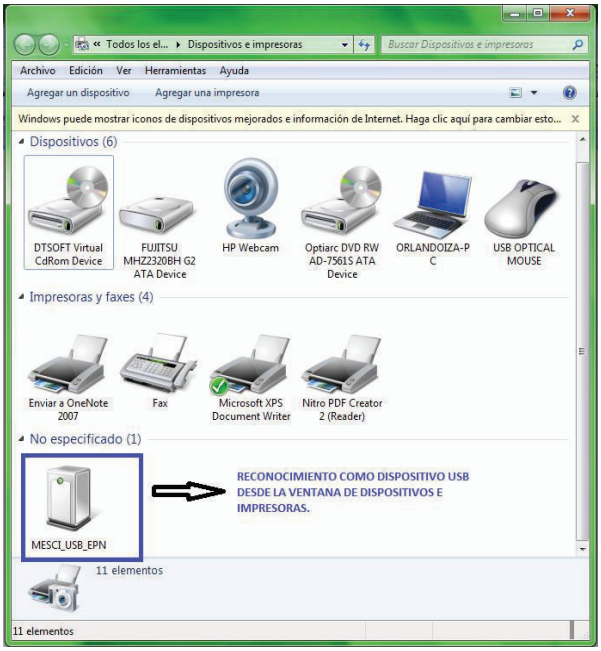


Figura 4.4. Verificación del Dispositivo dentro de Dispositivos e Impresoras.

4.1.5 QUITAR HARDWARE DE FORMA SEGURA

Dado que es un dispositivo USB, éste debe ser expulsado adecuadamente. Para ello se debe dirigir a la opción “quitar hardware en forma segura y expulsar el medio” dentro de la pestaña de íconos ocultos y seleccionar el dispositivo, tal como se muestra en la figura 4.5.

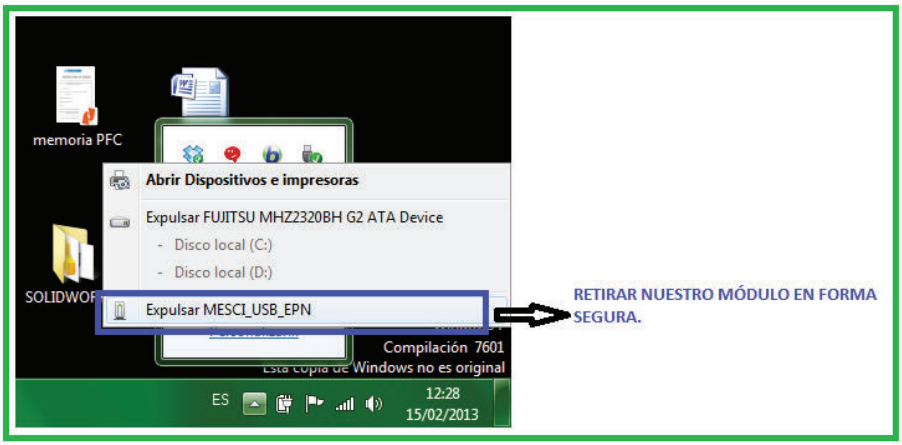


Figura 4.5. Expulsión segura del Dispositivo.

4.2 DISPOSITIVO USB Y LABVIEW

Una vez realizadas las pruebas de reconocimiento del dispositivo en el computador por parte del sistema operativo, es hora de que éste sea reconocido en Labview. Para ello se ha creado un VI (Virtual Instrument) que permite el reconocimiento del dispositivo USB, la lectura y escritura de datos por medio del bus USB.

Para visualizar si el reconocimiento del dispositivo USB funciona correctamente o si por el contrario existe algún error se debe abrir la diagrama de bloques del VI y activar la opción Highlight execution que mostrará el flujo de ejecución del VI. En éste se observa el flujo de información (datos), la interface USB mostrará una cadena de caracteres y valores numéricos, como se muestra en la figura 4.6.

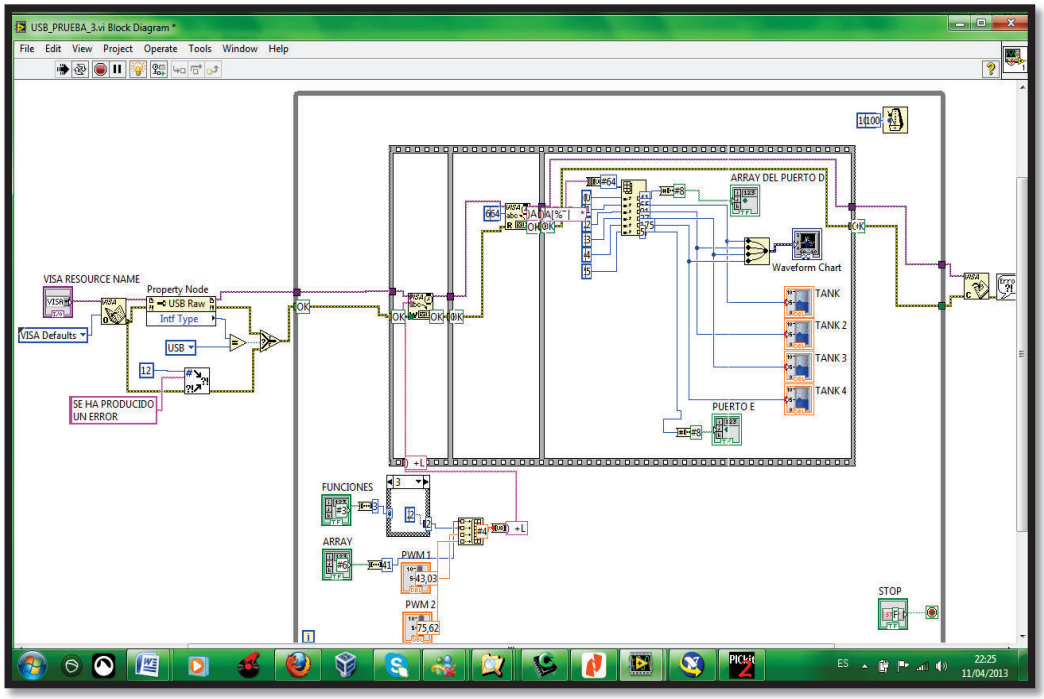


Figura 4.6. VI Inicial de Pruebas (Diagrama de Bloques).

Una vez que se ponga en modo RUN el VI creado, sí el dispositivo USB fue reconocido exitosamente se podrá proseguir con las pruebas y manipulación de los recursos del VI; de no ser éste el caso entonces el VI presentará un mensaje de error.

4.2.1 INTERFAZ INICIAL DE PRUEBAS

El VI inicial para las pruebas cuenta con elementos que permiten: control de opciones para el manejo de la información mostrada en el LCD, control y visualización del estado de entradas y salidas digitales (Dipswitchs y leds), visualización de entradas analógicas (Waveform Chart) y control de salidas tipo PWM, tal como se aprecia en la figura 4.7.

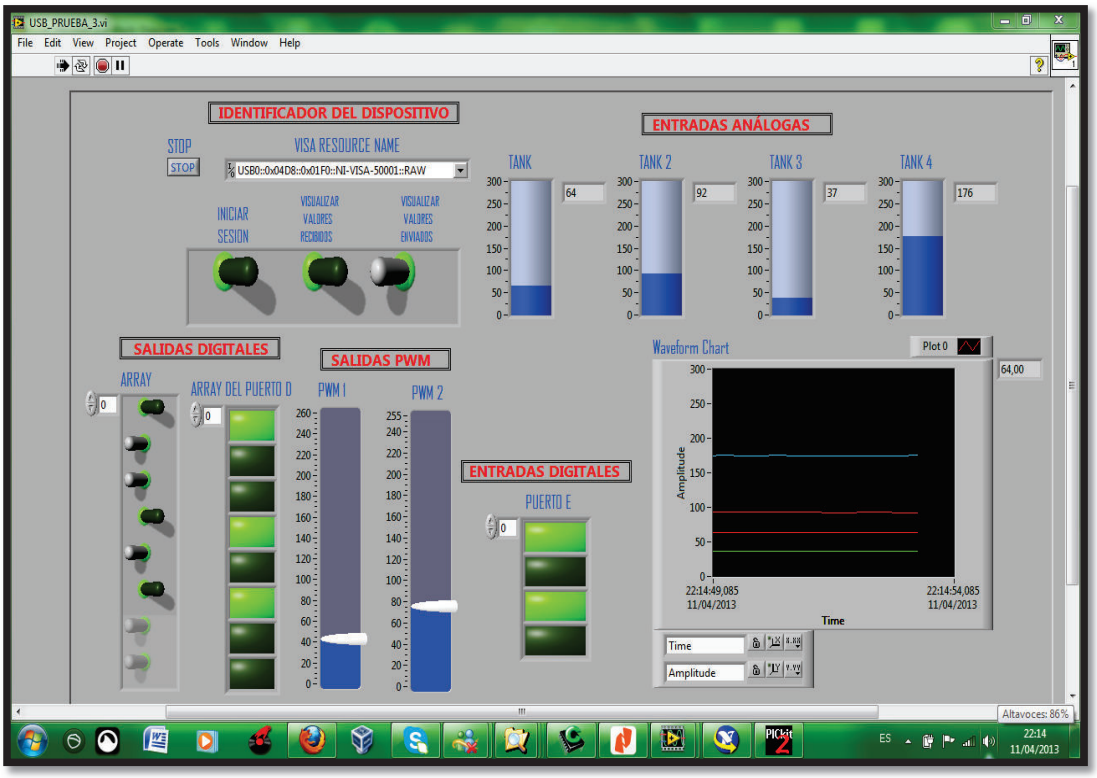


Figura 4.7. VI Inicial de Pruebas (Panel Frontal).

4.2.2 CIRCUITO INICIAL DE PRUEBAS

Este circuito se desarrolló con el propósito de facilitar el proceso de pruebas ya que contiene elementos básicos para simular entradas/salidas digitales, entradas analógicas, la comunicación USB, y elemento de visualización. Este circuito contiene los siguientes elementos:

- Microcontrolador PIC18F4550: Para tareas de control y comunicación.
- Dipswitchs: Para simular entradas digitales.
- Resistencias y Diodos Led: Para simular salidas digitales.
- Resistencias Variables (Potenciómetro): Para simular entradas analógicas.
- Display LCD: Para visualización del estado del circuito.
- Conector y elementos para comunicación USB.

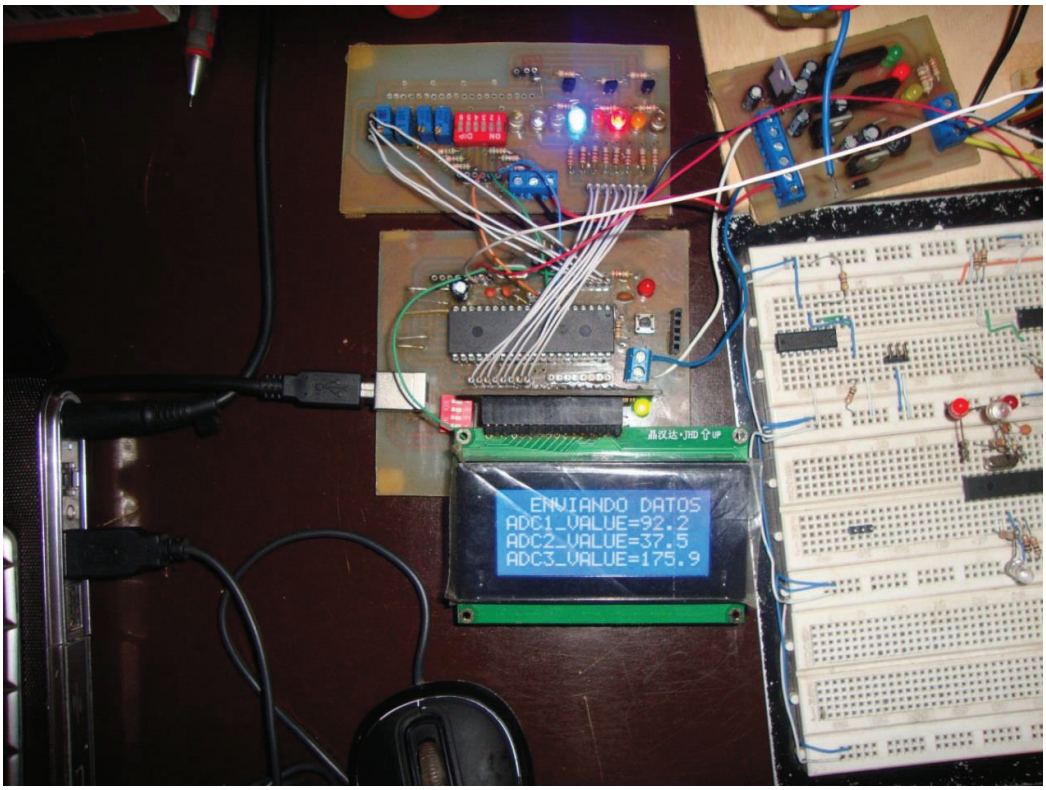


Figura 4.8. Circuito Inicial de Pruebas.

En conjunto con el VI desarrollado se realizaron las pruebas de comunicación USB, lectura de entradas analógicas, entradas digitales, salidas digitales y salidas PWM, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados Obtenidos con el Circuito Inicial de Pruebas.

PRUEBAS INICIALES VI Y CIRCUITO INICIAL DE PRUEBAS.		
Nº	**PARÁMETRO DE PRUEBA**	**CORRECTO**
1	RECONOCIMIENTO COMO DISPOSITIVO USB EN LA PC.	✓
2	RECONOCIMIENTO DISPOSITIVO USB EN LABVIEW.	✓
3	COMUNICACIÓN USB LABVIEW – MODULO.	✓
4	LECTURA DE ENTRADAS ANALÓGICAS.	✓
5	LECTURA DE ENTRADAS DIGITALES.	✓
6	MANIPULACIÓN SALIDAS DIGITALES.	✓
7	MANIPULACIÓN SALIDAS PWM.	✓
6	VISUALIZACIÓN DE VALORES EN DISPLAY.	✓

4.3 PRUEBAS DESARROLLADAS CON MÓDULO MESCI_USB

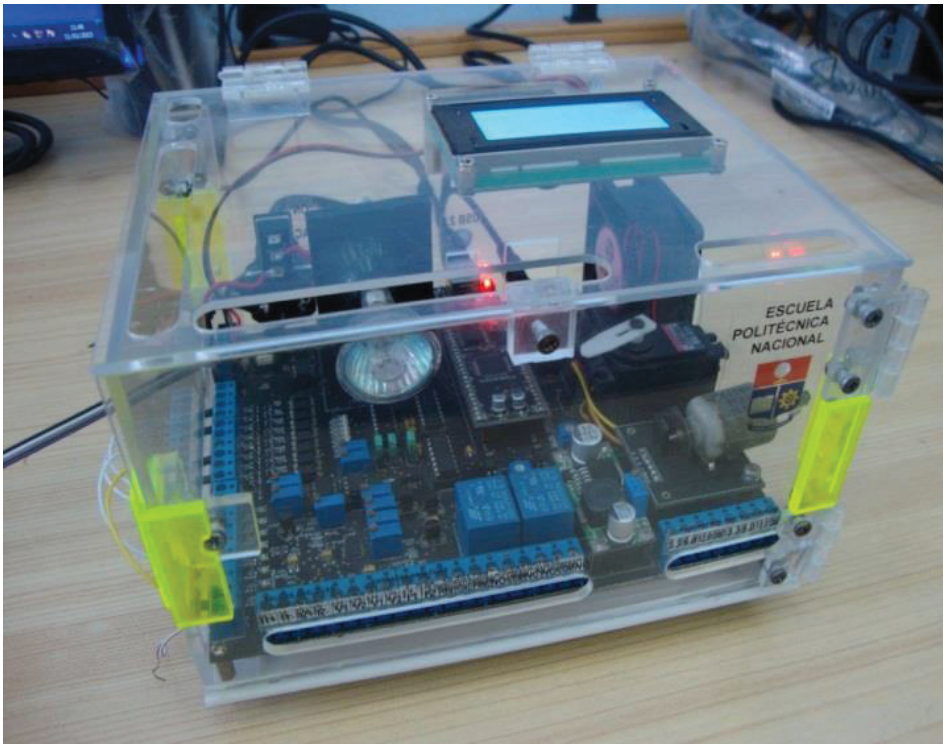


Figura 4.9. Módulo MESCI_USB.

En la figura 4.9 se muestra el módulo MESCI_USB y las pruebas finales realizadas se detallan a continuación:

4.3.1 PRUEBA DE VOLTAJES

Lo primero es comprobar sí los voltajes son los requeridos tanto para alimentar la parte de control como para la parte de potencia. Los valores de voltajes medidos se indican en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Medida de Voltajes (Polarización y Potencia).

VOLTAJES DE CONTROL Y POTENCIA					
Nº	**PARÁMETRO**	**VALOR OBTENIDO (V)**	**VALOR ESPERADO (V)**	**CORRECTO**	**ERROR (%)**
1	VOLTAJE DE CONTROL 5 VDC.	5.03	5.0	✓	0.6
2	VOLTAJE DE CONTROL 3.3 V	3.26	3.3	✓	1.21
3	VOLTAJE DE POTENCIA 12 V	12.06	12.0	✓	0.5

Figura 4.10. Valores Medidos en la Prueba de Voltajes.

4.3.2 PRUEBA DE SALIDAS DIGITALES

Las salidas digitales funcionan correctamente, su activación y desactivación se puede observar mediante diodos leds de color rojo; los valores obtenidos se indican en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resultados Obtenidos Salidas Digitales.

PRUEBAS DE SALIDAS DIGITALES								
Nº	**ESTADO**	**VALOR OBTENIDO (V)**		**VALOR ESPERADO (V)**		**CORRECTO**	**ERROR ABSOLUTO**	
1	DESACTIVO	0.18		0		✓	0.18	
2	ACTIVO	4.25	11.21	5.0	12.0	✓	-0.75	-0.79

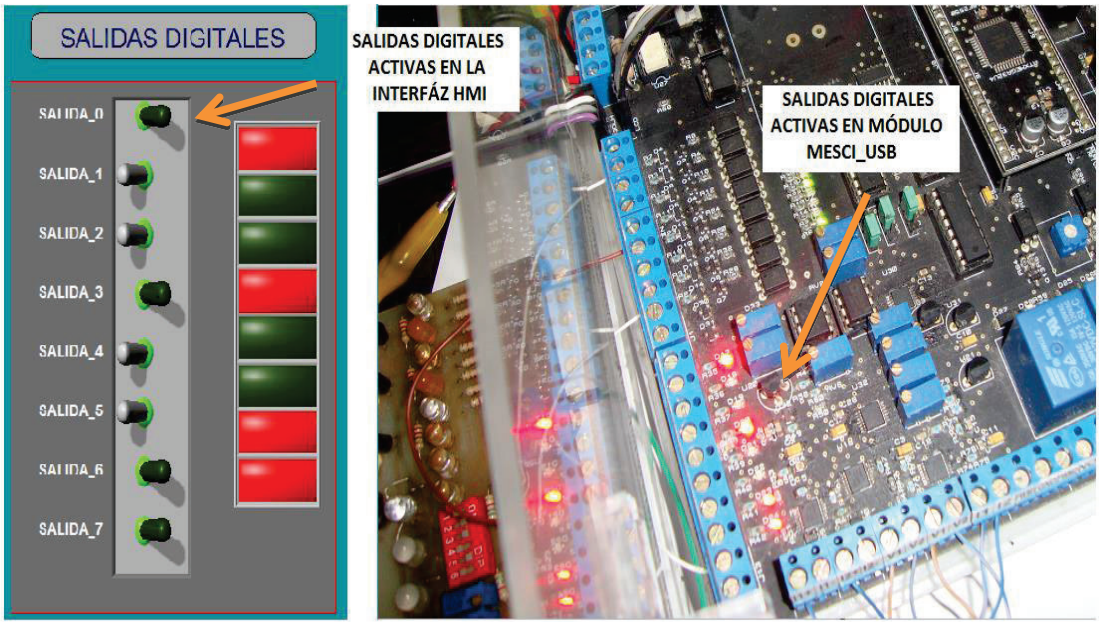


Figura 4.11. Pruebas de Salidas Digitales.

Figura 4.12. Voltajes Medidos de Salidas Digitales.

4.3.3 PRUEBA DE ENTRADAS DIGITALES

El estado de las entradas digitales se puede apreciar de forma visual mediante los diodos leds de color verde en el módulo, que a su vez se puede observar en la interfaz de usuario en la pestaña de entradas/salidas digitales por medio de indicadores de color verde. Para la prueba se utilizó las salidas digitales del módulo y se conectó hacia las entradas digitales. En la figura 4.13 se indica el funcionamiento de las entradas digitales.

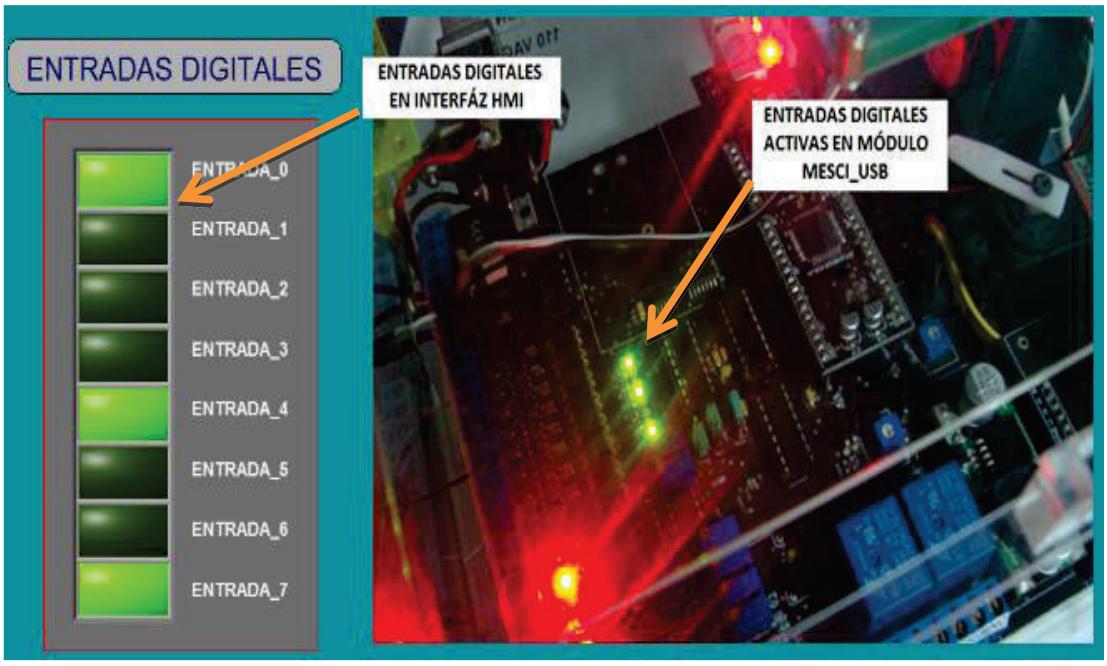


Figura 4.13. Prueba de Entradas Digitales.

4.3.4 PRUEBA DE SALIDAS TIPO RELÉ

El control de las salidas tipo relé funcionan correctamente tanto su activación como desactivación tal como se observa en la figura 4.14.

Tabla 4.4. Resultados Obtenidos Salidas Tipo Relé.

PRUEBAS DE SALIDAS TIPO RELÉ				
Nº	**ESTADO**	**CONTACTO NO**	**CONTACTO NC**	**CORRECTO**
1	DESACTIVO	ABIERTO	CERRADO	✓
2	ACTIVO	CERADO	ABIERTO	✓

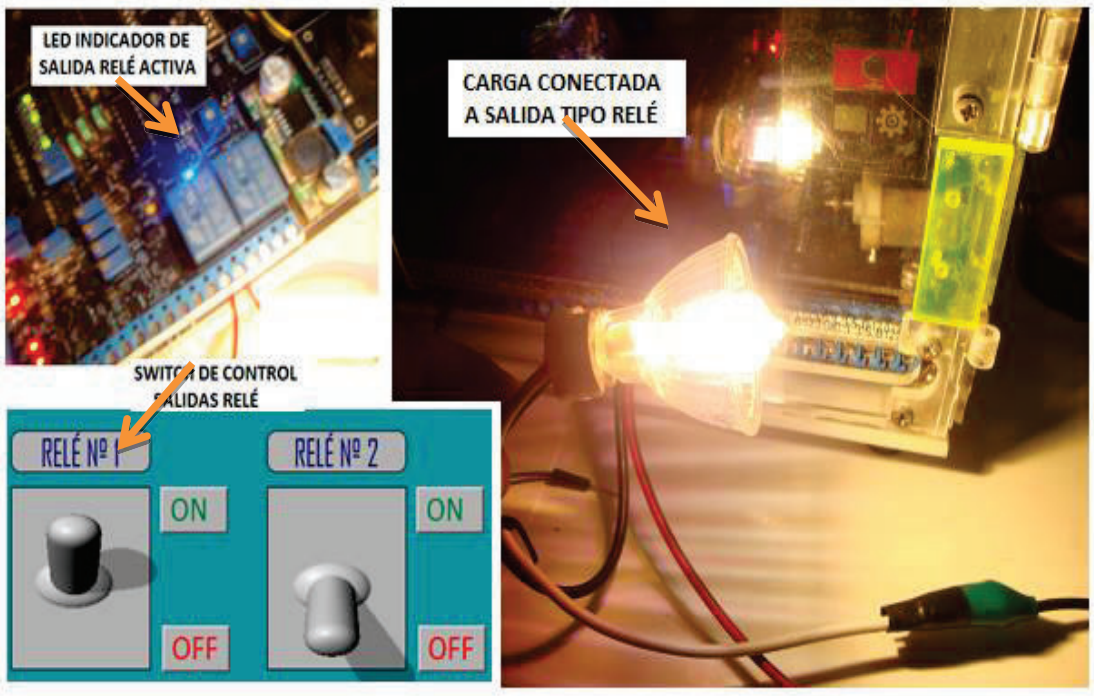


Figura 4.14. Pruebas Salidas Tipo Relé.

4.3.5 PRUEBA DE SALIDAS TIPO PWM

Las salidas tipo PWM trabajan perfectamente, las dos salidas de tipo PWM se puede variar el ciclo de trabajo del 0 al 100%; adicionalmente se puede variar la frecuencia de estas señales PWM en el rango de 500 Hz hasta los 10 KHz.

Tabla 4.5. Resultados Obtenidos Salidas PWM (Frecuencia).

PRUEBAS DE SALIDAS TIPO PWM (FRECUENCIA).					
Nº	**PARÁMETRODE PRUEBA**	**VALOR OBTENIDO**	**VALOR ESPERADO**	**CORRECTO**	**ERROR (%)**
1	FRECUENCIA MÍNIMA	499.5 Hz	500.0 Hz	✓	0.1
2	FRECUENCIA MÁXIMA	10.82 KHz	10.0 KHz	✓	8.2

Tabla 4.6. Resultados Obtenidos Salidas PWM (Ciclo de trabajo).

PRUEBAS DE SALIDAS TIPO PWM (CICLO DE TRABAJO %). Frecuencia de Prueba = 2KHz. Periodo= 500 us.				
Nº	**CICLO DE TRABAJO**	**TIEMPO EN ALTO (us)**		**ERROR (%)**
		VALOR OBTENIDO	**VALOR ESPERADO**	
1	PWM1 (18%)	92	90	2.2
2	PWM1 (90%)	444	450	1.3
3	PWM2 (30%)	152	150	1.3
4	PWM2 (75%)	372	375	0.8

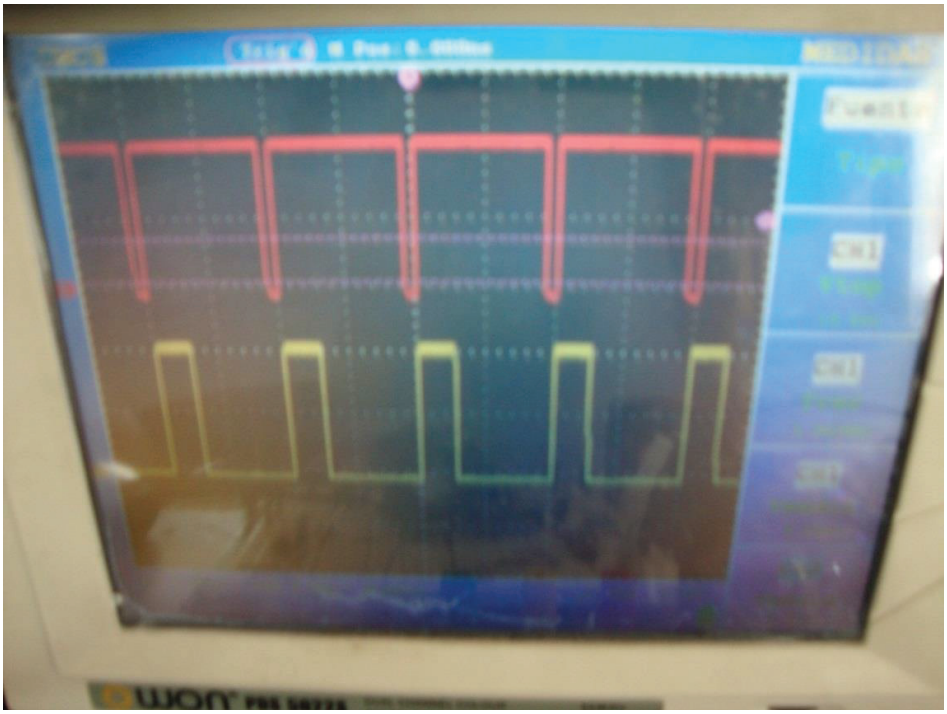


Figura 4.15. Pruebas de Salidas PWM (PWM1: 90%, PWM2: 30%).

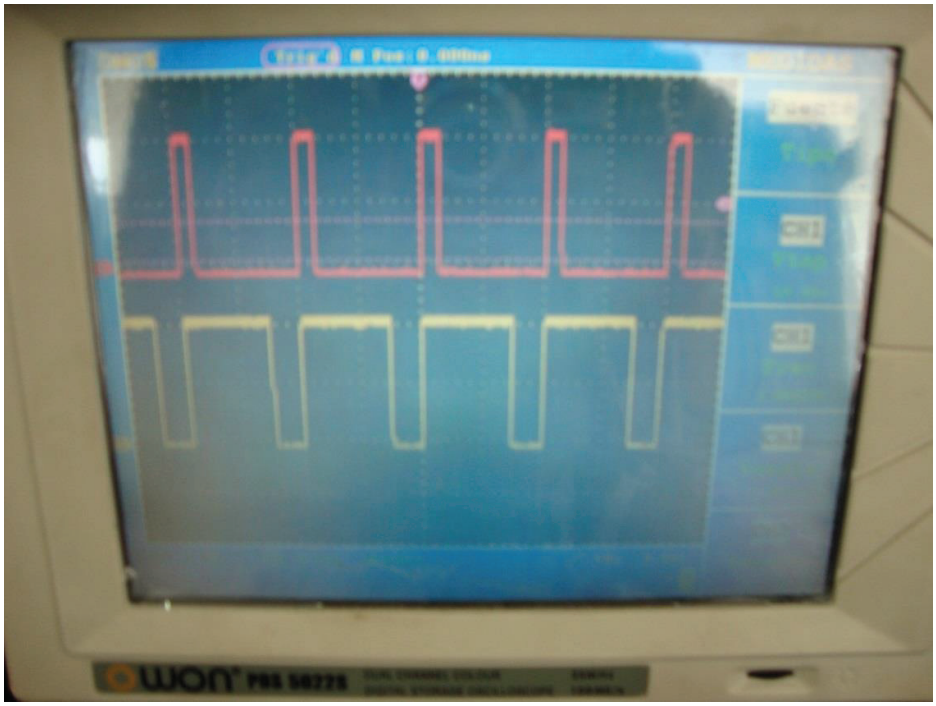


Figura 4.16. Pruebas de Salidas PWM (PWM1: 18%, PWM2: 75%).

4.3.6 PRUEBA SALIDAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE (4-20mA)

Las pruebas se realizó con resistencias de carga de diferentes valores: 100, 240 y 470 Ω. En la tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos para RL= 240 Ω.

El valor de la caída de voltaje en la resistencia de carga se determinó de la siguiente manera: $V_{RL} = I_L * R_L$

Tabla 4.7. Resultados Obtenidos Salidas Analógicas de Corriente.

PRUEBA DE SALIDAS DE CORRIENTE 4-20 mA								
Nº	**SALIDA 1**			**SALIDA 2**			**ERROR (%)**	
	VALOR SALIDA		VALOR MEDIDO V_{RL} (V)	VALOR SALIDA		VALOR MEDIDO V_{RL} (V)	SALIDA 1	SALIDA 2
	I_L (mA)	V_{RL} (V)		I_L (mA)	V_{RL} (V)			
1	4.0	0.96	1.46	4.0	0.96	1.47	-	-
2	6.5	1.56	1.47	6.0	1.44	1.47	5.7	2.0
3	7.5	1.80	1.78	7.5	1.80	1.66	1.1	7.7
4	10.0	2.40	2.31	10.0	2.40	2.38	3.7	0.8
5	12.0	2.88	2.85	12.0	2.88	2.82	1.0	2.08
6	14.5	3.48	3.40	14.5	3.48	3.67	2.2	5.4
7	16.0	3.84	3.82	16.4	3.94	4.10	0.5	4.0
8	17.5	4.20	4.25	17.0	4.08	4.35	1.1	6.6
9	18.0	4.32	4.37	18.0	4.32	4.6	1.1	6.4
10	20.0	4.8	4.77	20.0	4.8	4.76	0.6	2.0

Figura 4.17. Pruebas de Salidas de Corriente.

4.3.7 PRUEBA SALIDAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE (0-5VDC)

Las pruebas de las salidas de voltaje arrojaron los resultados que se indican en la tabla 4.8, se puede apreciar que existe un margen de error muy pequeño.

Tabla 4.8. Resultados Obtenidos Salidas Analógicas de Voltaje.

PRUEBAS DE SALIDAS DE VOLTAJE 0-5 VDC						
Nº	**SALIDA 1 (V)**		**SALIDA 2 (V)**		**ERROR (%)**	
	VALOR SETEADO	VALOR MEDIDO	VALOR SETEADO	VALOR MEDIDO	SALIDA1	SALIDA 2
1	0	-0.01	0	-0.006	-	-
2	0.25	0.24	0.50	0.49	4	2

3	0.75	0.74	1.10	1.10	1.3	0
4	1.00	0.99	1.30	1.30	1	0
5	1.50	1.49	1.75	1.75	0.6	0.0
6	2.25	2.24	2.00	1.99	0.4	0.5
7	3.50	3.49	2.75	2.74	0.2	0.3
8	4.10	4.09	3.60	3.59	0.2	0.1
9	4.52	4.52	4.25	4.24	0	0.2
10	5.00	5.00	5.00	5.00	0	0

En la figura 4.18 se muestra las pruebas realizadas para las salidas analógicas de voltaje.

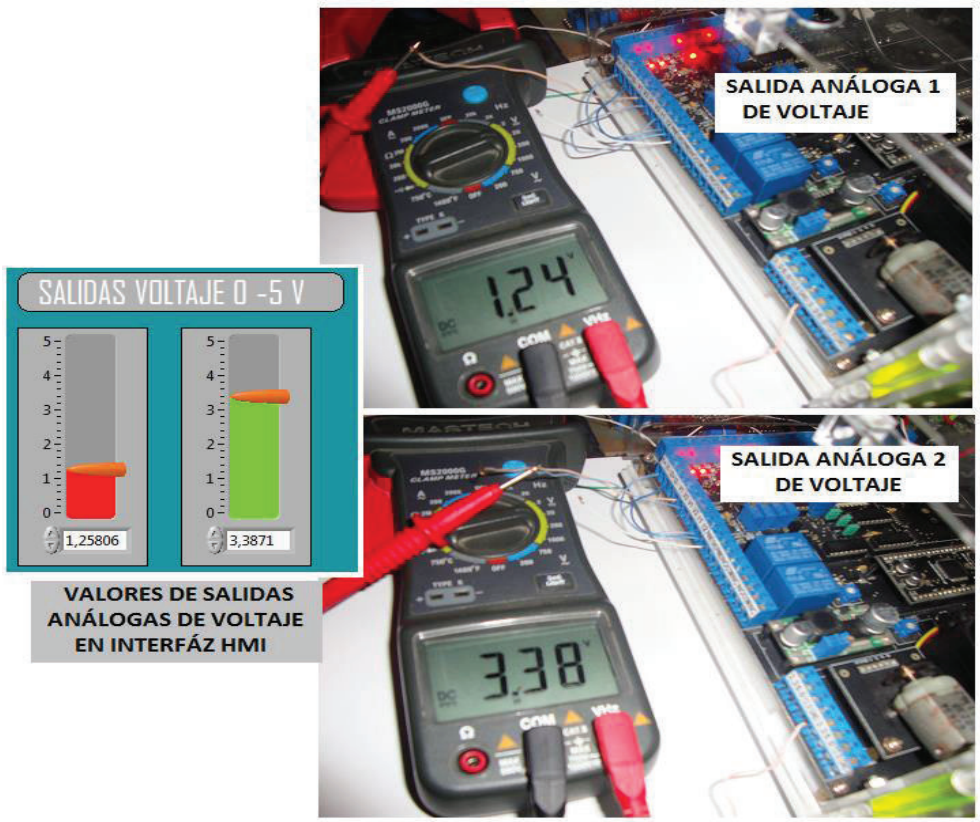


Figura 4.18. Pruebas de Salidas Analógicas de Voltaje.

4.3.8 PRUEBA ENTRADAS ANALÓGICAS DE CORRIENTE (4-20 mA)

Para la prueba de entradas analógicas de corriente se utilizó un pequeña tarjeta electrónica mostrada en la figura 4.19, la cual genera señales de corriente en el rango (0 – 21 mA) y de voltaje en el rango de (0 – 5 VDC). Los resultados obtenidos en las pruebas de las entradas analógicas de corriente (4 – 20 mA) se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Resultados Obtenidos Entradas Analógicas de Corriente.

PRUEBA DE ENTRADAS DE CORRIENTE 4-20 mA						
Nº	**ENTRADA1 (mA)**		**ENTRADA2 (mA)**		**ERROR (%)**	
	VALOR ENTRADA	VALOR MEDIDO	VALOR ENTRADA	VALOR MEDIDO	ENTRADA 1	ENTRADA 2
1	4.0	4.15	4.0	4.13	3.75	3.25
2	5.75	5.83	5.5	5.56	1.4	1.2
3	7.70	7.68	7.3	7.23	0.2	0.9
4	10.0	10.02	10.0	9.94	0.2	0.6
5	13.30	13.27	12.50	12.39	0.2	0.8
6	14.0	13.95	15.0	14.92	0.3	0.5
7	16.20	16.10	16.8	16.61	0.6	1.1
8	17.50	17.35	18.0	17.82	0.8	1.0
9	18.25	18.11	19.0	18.65	0.7	1.8
10	20	19.75	20	19.70	1.25	1.5

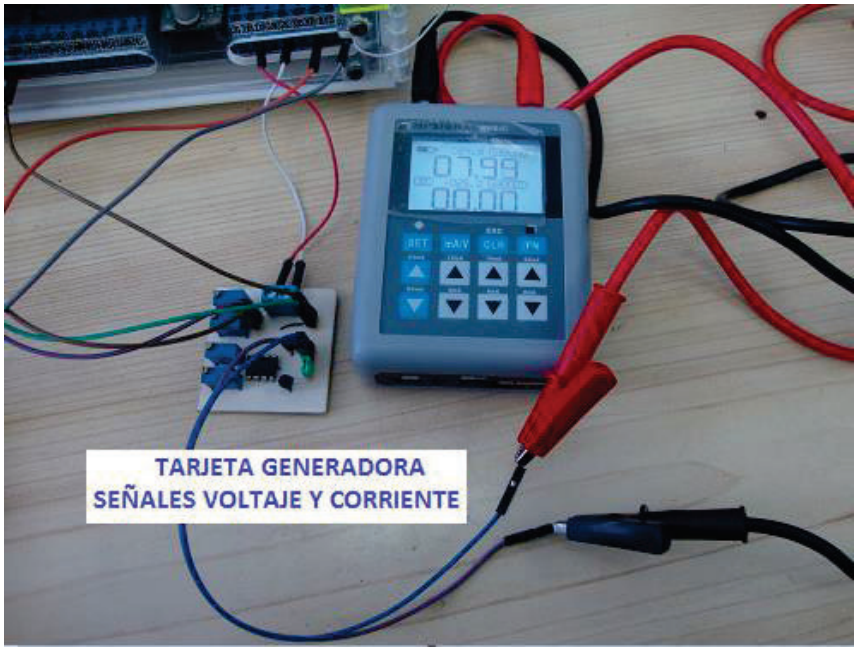


Figura 4.19. Tarjeta Electrónica Generadora de Señales Voltaje y Corriente.

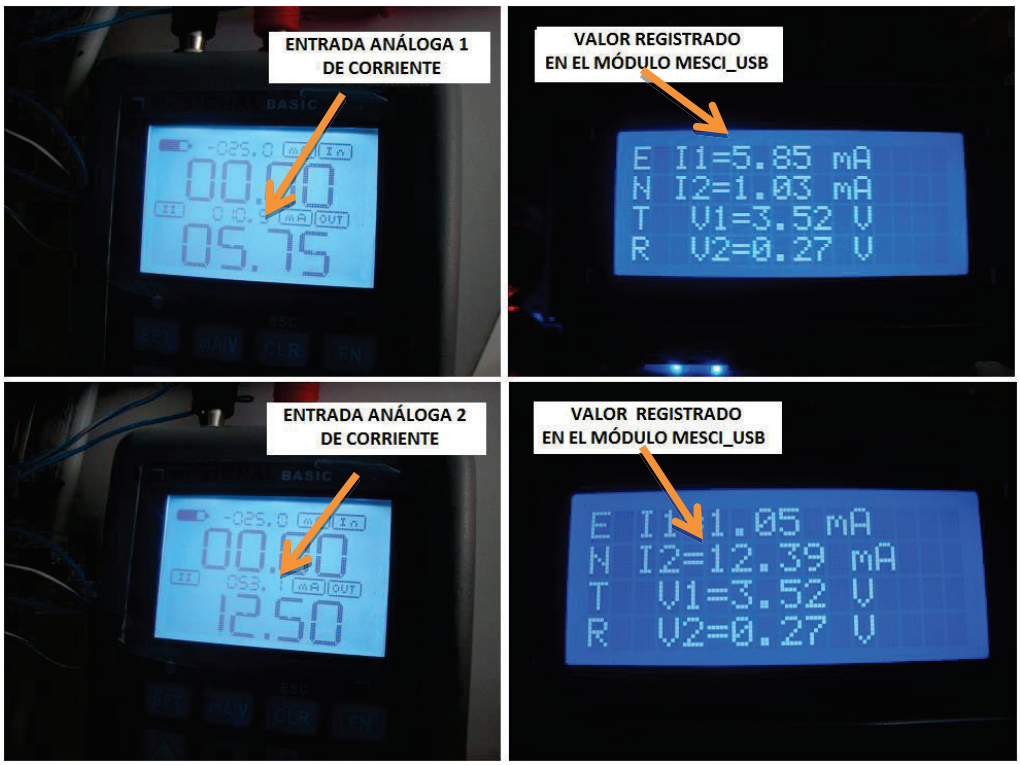


Figura 4.20. Pruebas de Entradas Analógicas de Corriente.

4.3.9 PRUEBA ENTRADAS ANALÓGICAS DE VOLTAJE (0-5VDC)

Las entradas de voltaje deben ser señales de voltaje en el rango de 0-5 VDC, para las pruebas se utilizó la tarjeta de la figura 4.19. Los resultados obtenidos en el proceso de pruebas se indican en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Resultados Obtenidos Entradas Analógicas de Voltaje.

PRUEBA DE ENTRADAS DE VOLTAJE 0-5 VDC						
Nº	**ENTRADA 1 (V)**		**ENTRADA 2 (V)**		**ERROR (%)**	
	VALOR ENTRADA	VALOR MEDIDO	VALOR ENTRADA	VALOR MEDIDO	ENTRADA 1	ENTRADA 2
1	0	0.25	0	0.25	-	-
2	0.75	0.85	0.5	0.58	7.6	8.5
3	1.50	1.64	1.0	1.12	9.3	12
4	2.0	2.14	2.0	2.12	7	6
5	3.0	3.09	3.0	3.09	3	3
6	3.50	3.56	3.25	3.32	1.7	2.1
7	3.75	3.78	3.50	3.55	0.8	1.4
8	4.0	4.06	3.90	3.95	1.5	1.2
9	4.50	4.53	4.25	4.26	0.6	0.2
10	5.0	4.99	5.0	4.97	0.2	0.6

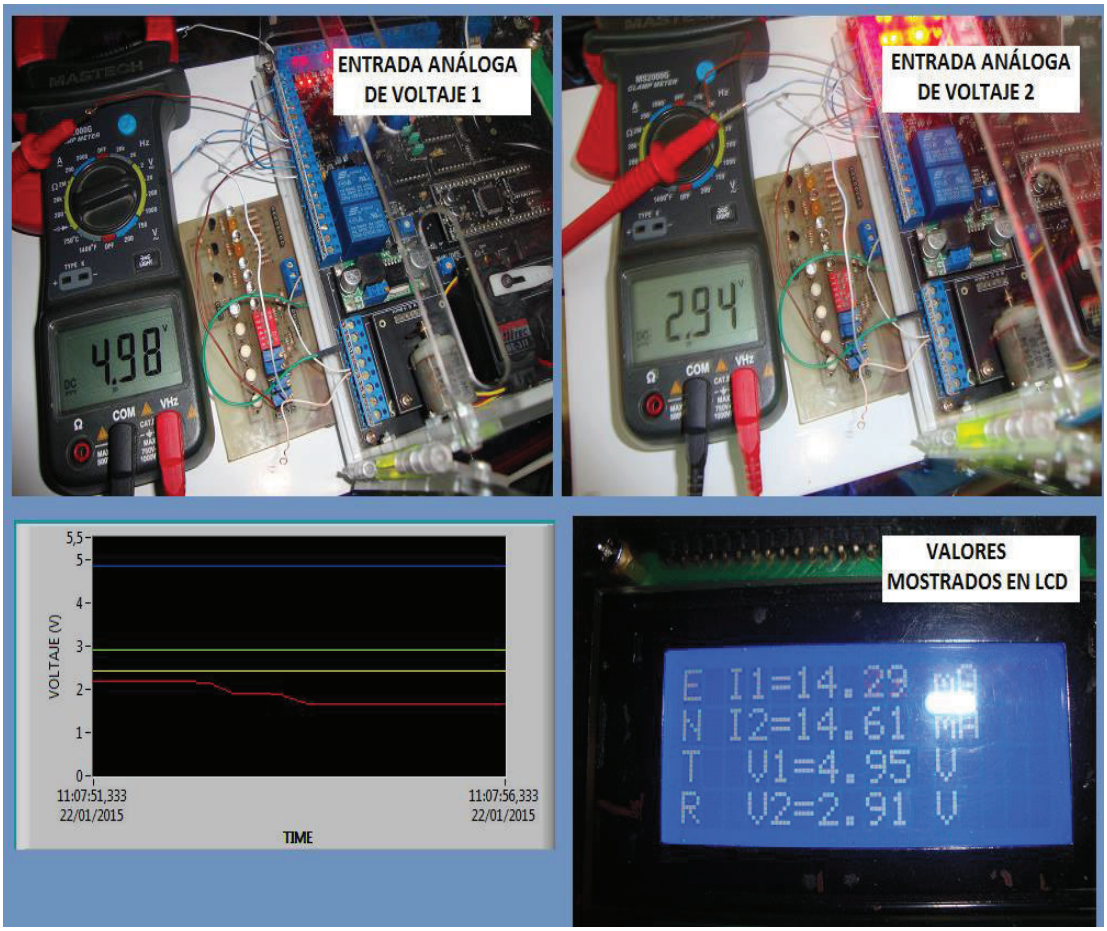


Figura 4.21. Prueba de Entradas Analógicas de Voltaje.

4.3.10 PRUEBA CONTROL DE POSICIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR

El servomotor varía su posición en el rango de 0 a 180 grados, según lo determine el usuario; en el proceso de pruebas el servomotor respondió satisfactoriamente según lo esperado. Dado que no se dispone de un instrumento que permita medir la posición exacta del eje de servomotor, su funcionamiento se comprobó mediante una simple inspección visual, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.11. En la figura 4.22 se muestra la señal de control para el servomotor.

. **Tabla 4.11.** Pruebas Control Servomotor.

PRUEBAS CONTROL SERVOMOTOR.			
Nº	**PARÁMETRO**	**VALOR MEDIDO**	**POSICIÓN DEL EJE EN GRADOS**
1	FRECUENCIA DE SEÑAL Hz.	50.7	-
2	CICLO DE TRABAJO (%)	5.2	0
3		8.2	90
4		11.7	180

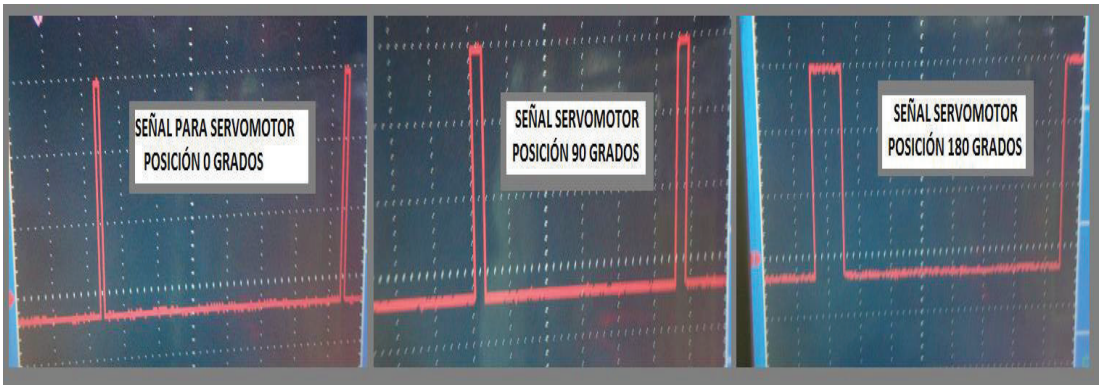


Figura 4.22. Señales de Control Servomotor.

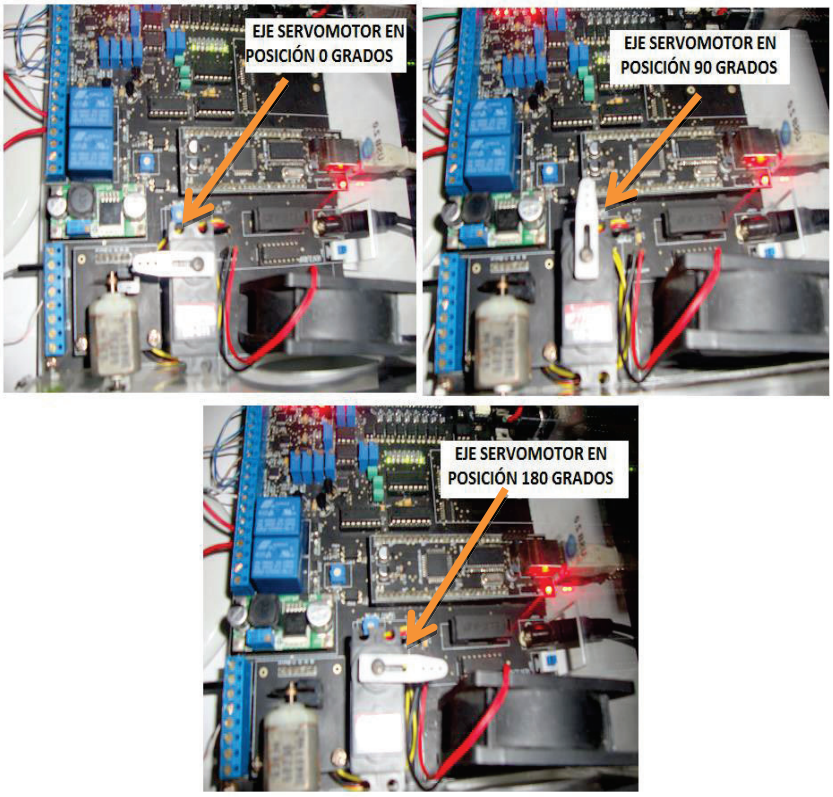


Figura 4.23. Posición del Eje del Servomotor.

4.3.11 PRUEBA DE CONTROL DE TEMPERATURA

El Control de temperatura básicamente funciona para temperaturas mayores a la temperatura ambiente ya que no se cuenta con un sistema de enfriamiento para temperaturas menores a la temperatura ambiente. El rango de la variación de temperatura está en el rango de T ambiente<Temperatura<60°C.

Con la opción de control manual se puede encender y apagar tanto el ventilador como la lámpara, es decir se puede realizar un control ON/OFF; adicionalmente en la opción de control manual se tiene la posibilidad de controlar el voltaje que alimenta a la lámpara mediante el control de fase, pudiéndose variar el ángulo de disparo según el requerimiento del usuario. Los resultados obtenidos se indican en la tabla 4.12 y en la figura 4.24.

Tabla 4.12. Resultados Obtenidos Control Manual de Temperatura.

PRUEBAS DE TEMPERATURA(MODO MANUAL)				
Nº	**PARÁMETRO**	**VALORES MEDIDOS**		
1	VENTILADOR ON/OFF	✓		
2	LÁMPARA ON/OFF	✓		
	LÁMPARA CONTROL DE FASE	VOLTAJE RMS (V)	ÁNGULO DE DISPARO (mseg.)	VOLTAJE RMS CALCULADO
4		8.20	7.3	13
5		21.45	6.4	32
6		39.20	5.5	54
7		93.00	2.76	107
8		105.4	1.48	118

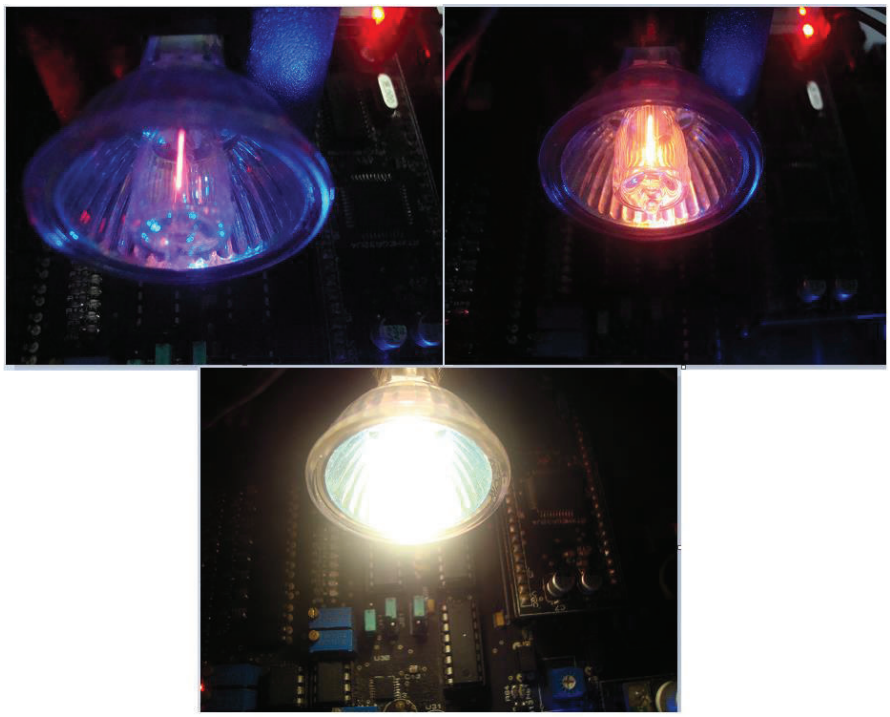


Figura 4.24. Control Manual de Control de Fase.

Pruebas de Temperatura Modo Automático.

El sistema de control de temperatura de forma automática responde satisfactoriamente, obteniéndose los resultados indicados en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Resultados Obtenidos en Pruebas de Control de Temperatura.

CONTROL DE TEMPERATURA (MODO AUTOMÁTICO)				
Nº	PARÁMETRO			ERROR (%)
	TEMP. SETEADA	TEMP. MEDIDA	TEMP MOSTRADA EN LCD	
1	24	24.07	24.1	0.4
2	26	´26.3	26.3	1.15
3	27	27.07	27.4	0.25
4	30	29.89	29.8	0.3
5	35	34.87	34.8	0.3
6	38	38.38	37.9	1.0
7	40	39.90	39.6	0.25
8	45	44.87	44.8	0.28
9	48	48.13	47.8	0.27
10	50	49.82	49.7	0.36

En la figura 4.25 y figura 4.26 se observa la señal del voltaje en la carga (lámpara).

En la figura 4.27 se muestra el valor de set point de temperatura y el valor registrado.

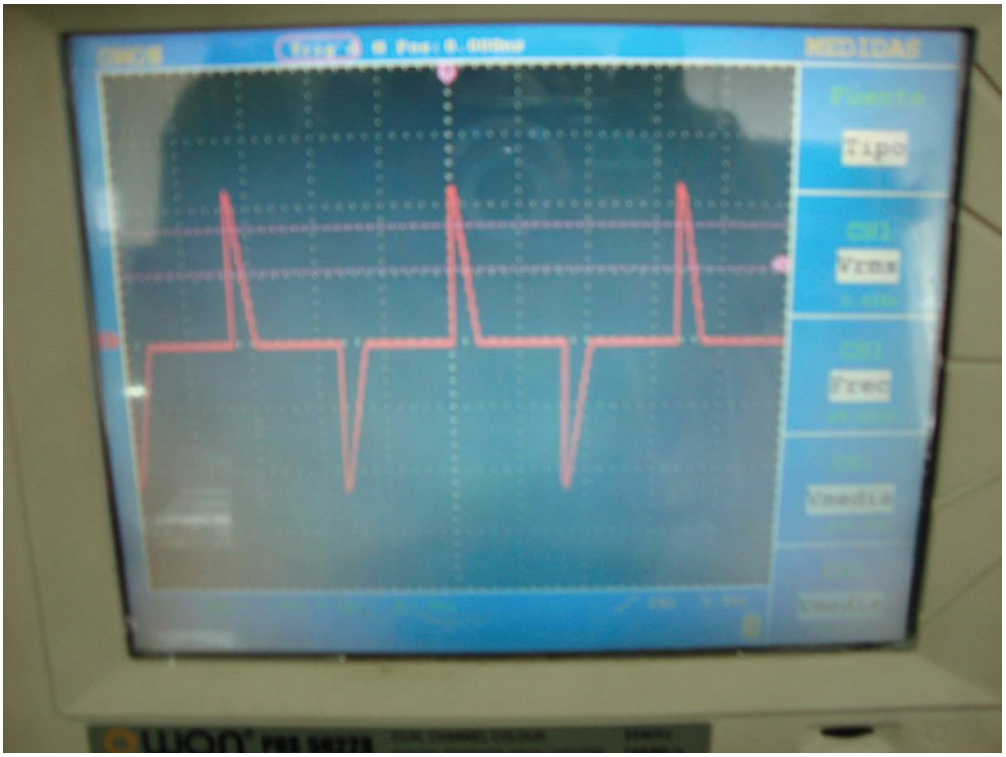


Figura 4.25. Señal de Voltaje Control de Fase Lámpara.

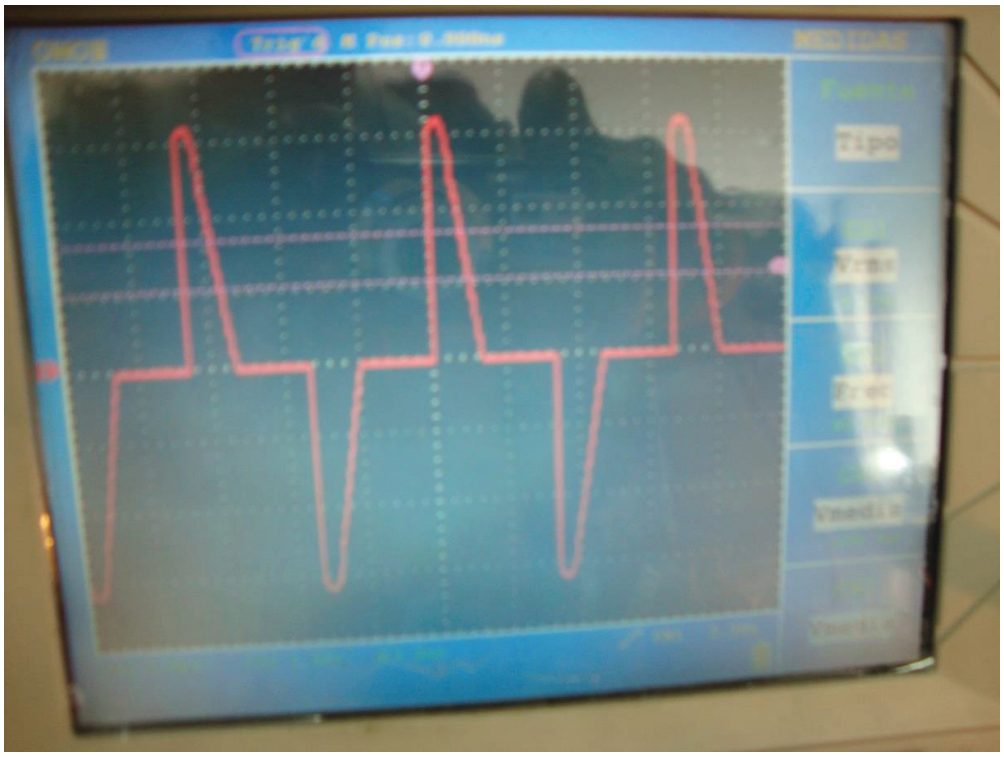


Figura 4.26. Señal de Voltaje Control de Fase Lámpara.

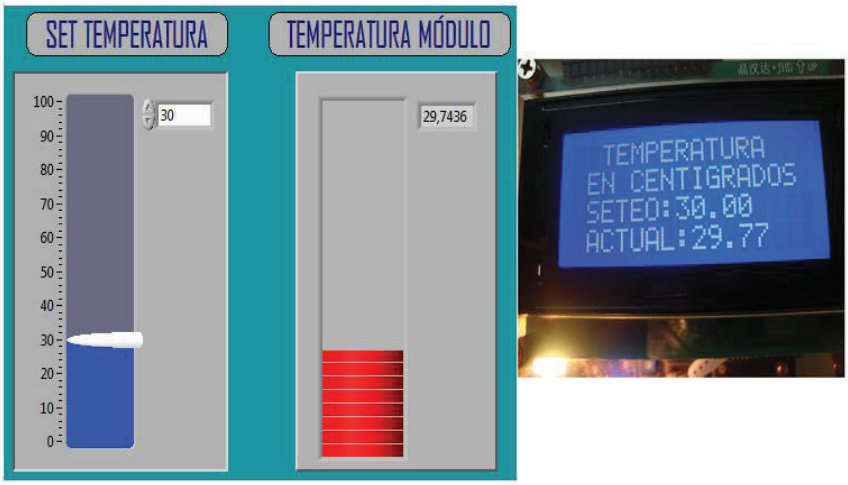


Figura 4.27. Pruebas Temperatura Valores Seteado y Medido.

4.3.12 PRUEBA DE CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR DC

La velocidad del motor se puede variar desde una velocidad de 360 RPM hasta 2700 RPM, se puede cambiar el sentido de giro del motor incluso cuando el motor se halla girando a su máxima velocidad; esto no es recomendable pero sí se requiere se lo puede hacer.

En la interfaz de usuario la variación de la velocidad del motor está en función de la variación del ciclo de trabajo de la señal PWM que controla al motor, es decir que cuando el ciclo de trabajo de la señal esté al 100% se tendrá la máxima velocidad; en este sentido hay que tomar en cuenta que para un ciclo de trabajo menor al 18% el motor no se mueve, esto debido a que el voltaje generado con ese ciclo de trabajo es insuficiente para vencer la inercia del motor.

Tabla 4.14. Resultados Pruebas Motor DC.

PRUEBAS DEL MOTOR DC.		
Nº	**SEÑAL PWM (%)**	**VELOCIDAD DEL MOTOR (RPM)**
1	18	0

2	20	360
3	25	720
4	40	1620
5	50	1920
6	75	2460
7	90	2580
8	100	2700

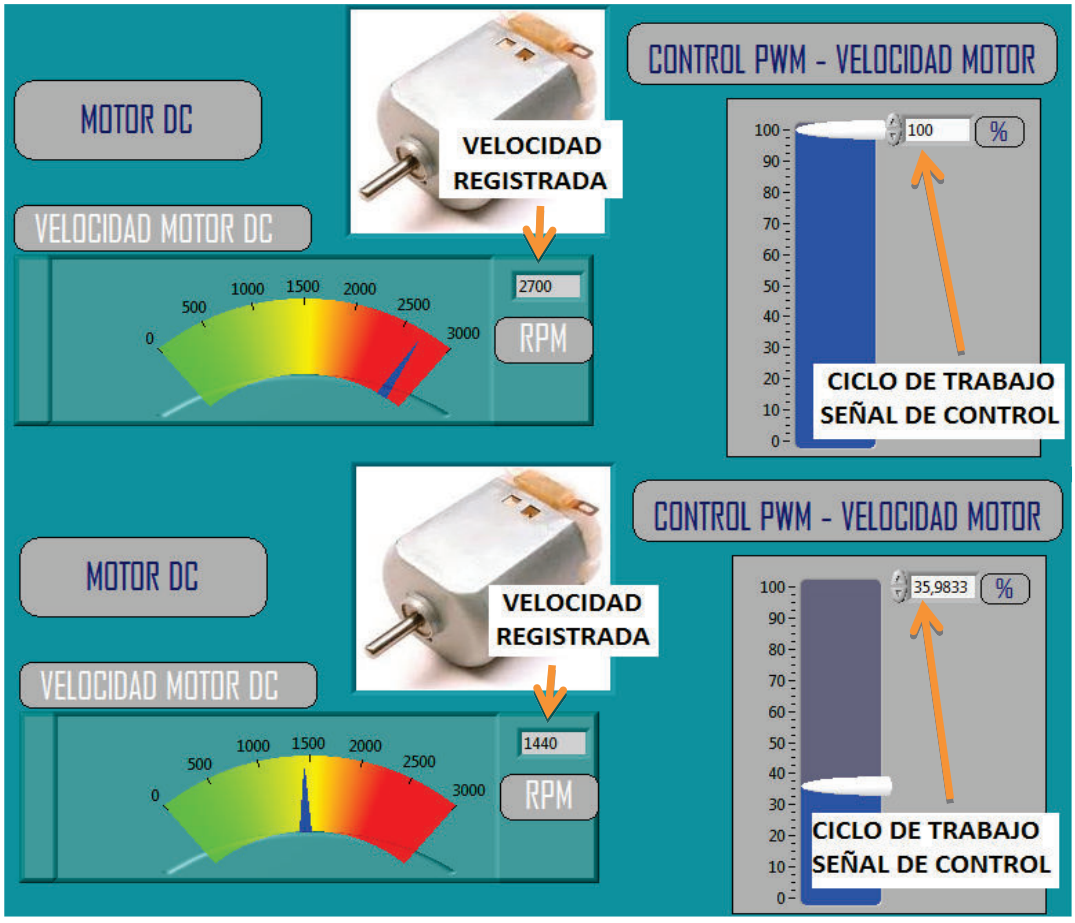


Figura 4.28. Pruebas de Velocidad Motor DC.

4.3.13 PRUEBA DE CONTROL DE ANIMACIÓN DE ENSAMBLE

Las pruebas relacionadas al control del ensamble funcionan correctamente, pudiéndose mover el ensamble de acuerdo con los datos que envía el acelerómetro. Pero también se tiene la opción de realizar la simulación con datos generados directamente en el Labview. Para esta prueba se debe dividir la pantalla de modo que se pueda visualizar tanto el archivo de Solidworks y la interfaz de usuario Labview.

Para realizar esta prueba se debe habilitar la simulación para ello abrir la ventana del archivo Módulo MESCI_USB_EPN+Ensamble, hacer clic derecho sobre ENSAMBLE_PROYECTO_MESCI y clic izquierdo en Start Simulation, tal como se observa en la figura 4.29. Se debe esperar que en el archivo de Solidworks aparezcan unas flechas de color rojo relacionadas con cada uno de los motores, luego esperar unos 10 segundos antes de proceder a variar los datos con los cuales se ejecutará la simulación.

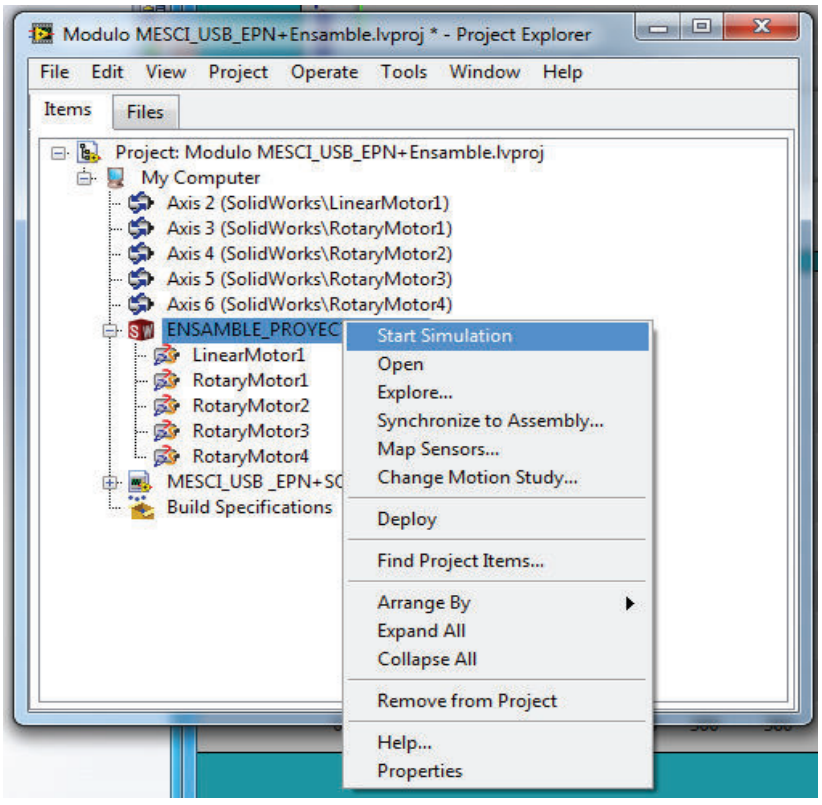


Figura 4.29. Habilitación de la Simulación.

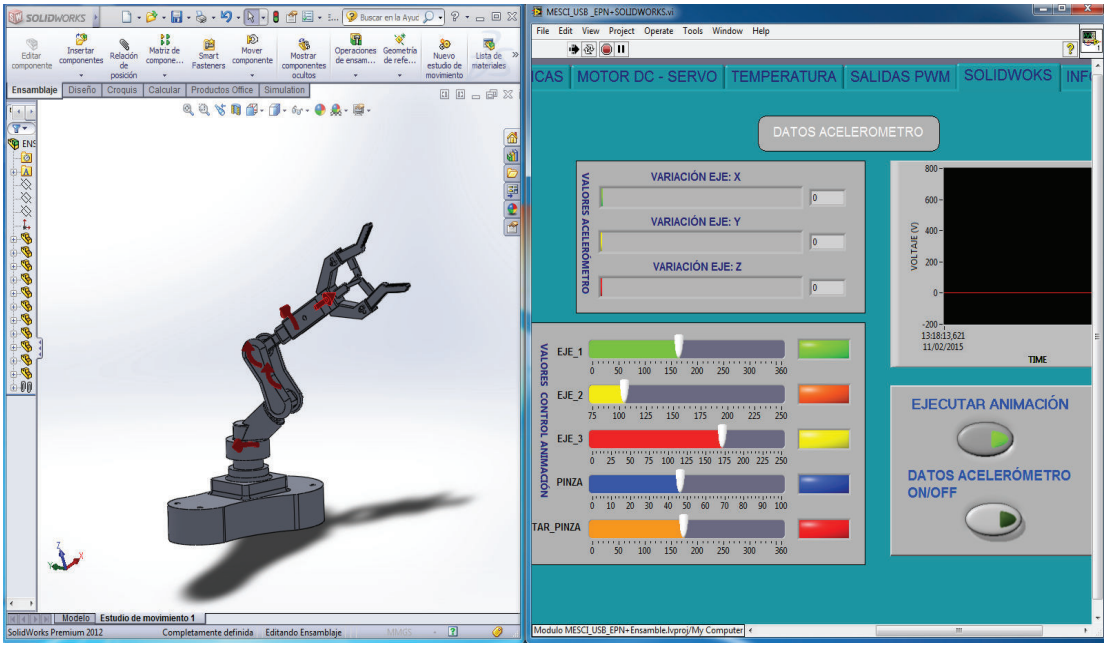


Figura 4.30. Pruebas de Control de Ensamble.

Para ejecutar la simulación debe mantener el clic izquierdo presionado sobre el botón de EJECUTAR ANIMACIÓN hasta que observe que la ejecución se lleve a cabo, ya que si hace clic izquierdo e inmediatamente lo suelta lo más seguro será que la simulación no se ejecute. En la figura 4.30 se tiene la ventana de Labview con sus respectivos controles y el ensamble de Solidworks.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones indicadas en este apartado son el resultado de las pruebas realizadas tanto con el módulo completo, el circuito de pruebas y las pruebas realizadas en protoboard; estas conclusiones y recomendaciones brindan por un lado una idea general de las características, funcionamiento y precauciones de operación del módulo; y por otro una visualización de los inconvenientes y experiencias vividas durante el desarrollo del proyecto.

5.1 CONCLUSIONES

El objetivo principal del proyecto, esto es, desarrollar e implementar un Módulo de Instrumentación electrónica con enlace hacia Labview mediante comunicación USB fue cumplido en su totalidad; cubriendo el alcance planteado.

Además de los recursos inicialmente planteados se añadieron otros tales como las salidas tipo PWM, más entradas y salidas digitales. Esto con el fin que la persona que manipule el módulo cuente con más herramientas de desarrollo.

Es importante comprobar que el software que se va emplear para el desarrollo de un proyecto cuente con los complementos o herramientas necesarias, en este caso por ejemplo es necesario comprobar que el Labview cuente con el complemento NI SoftMotion for Solidworks; ya que si no se tiene instalado este complemento o toolkit no sería posible el enlace entre Labview y Solidworks.

El desarrollo de la comunicación USB entre el módulo y Labview, elimina la necesidad de utilizar una tarjeta de adquisición de datos comercial, y abre la posibilidad de desarrollar tarjetas de adquisición de datos de acuerdo a los requerimientos que se puedan presentar.

El usuario puede desarrollar su propia interfaz gráfica, ya que se han incluido en la paleta de funciones de Labview funciones que permiten: abrir, escribir, leer, cerrar la comunicación con el módulo; otorgando al módulo mayor funcionalidad.

El módulo es reconocido como un dispositivo USB por parte del computador gracias a la instalación de un driver, el mismo que fue creado utilizando la herramienta NI-VISA Driver Wizard. Si no se instala este driver la comunicación USB no será posible.

El uso de capacitores de desacoplo para los dispositivos electrónicos es de mucha importancia ya que reducen los efectos que tienen las señales de alta frecuencia en circuitos electrónicos. Es importante también trabajar con dispositivos que presenten características de rechazo al ruido ya que con ello se estará garantizando obtener los resultados esperados.

En lo concerniente a las comunicaciones I2C y SPI, esto depende básicamente del bus que se requiera para comunicar él o los dispositivos periféricos con el microcontrolador, pero sí se tiene la opción elegir hay que considerar las ventajas y desventajas que estos buses de comunicación ofrecen, por ejemplo si se opta por la comunicación I2C como ventaja se puede mencionar que se emplea una menor cantidad de pines (recursos) del microcontrolador respecto a la comunicación SPI que requiere como mínimo tres pines y un pin adicional por cada dispositivo periférico conectado; pero considerar también que en el caso de la comunicación SPI al ser una comunicación full dúplex se tiene una mayor tasa

de transferencia de datos (mayor velocidad) respecto a la comunicación I2C que es una comunicación half duplex.

5.2 RECOMENDACIONES

En el control del motor DC, específicamente cuando se desee invertir el sentido de giro se recomienda primero detener al motor, seleccionar el sentido de giro y activar el encendido ya que sí se invierte el sentido de giro cuando éste se halla girando puede ocasionar daños en la mecánica del motor.

Para la operación del motor tomar en cuenta que con un ciclo de trabajo menor al 18% el motor no se moverá, esto debido a que el voltaje generado para este ciclo de trabajo es insuficiente para vencer la inercia del motor; se recomienda arrancar el motor con un ciclo de trabajo del 50% y a partir de ese valor incrementar o disminuir el ciclo de trabajo para variar la velocidad del motor.

En el caso del control de movimientos del objeto creado en Solidworks para la configuración de los motores la única posibilidad que admite el enlace Labview-Solidworks es que éstos sean controlados bajo el parámetro distancia ya que si se los configura bajo otro parámetro el enlace no será posible.

Cuando se vaya a probar el control de movimientos del ensamble se debe abrir el archivo “Módulo MESCI_USB_EPN+Ensamble”. Lo recomendable es abrir el archivo de ensamble ENSAMBLE_PROYECTO_MESCI desde el programa Solidworks, luego abrir el archivo de Labview “MESCI_USB_EPN+SOLIDWORKS”. Para poner en ejecución asegurarse de realizar el despliegue de la aplicación antes de ejecutar el VI. Sí no se va a probar

el control del ensamble lo recomendable es abrir y ejecutar únicamente el archivo ejecutable “MESCI_USB_EPN”; para mayores detalles se recomienda revisar el Manual de Usuario.

En el caso del manejo de la lámpara dentro del control de temperatura se recomienda no mantenerlo encendido innecesariamente, ya que puede ocasionar daños en el módulo debido a la temperatura que puede llegar a alcanzar en el interior.

Es importante que el acelerómetro no sea desconectado, ya que si esto sucede, al llamar a las funciones de lectura de datos ocasionará que el módulo no responda y se pierda la comunicación USB.

Para garantizar el buen estado del módulo se recomienda que el usuario ingrese señales de voltajes y corrientes (entradas analógicas) en los rangos para los cuales fue diseñado, es decir; (4 – 20 mA) en el caso de las entradas de corriente y (0 – 5 VDC) para las entradas de voltaje.

Una de las mejoras que se podría aplicar a este proyecto es cambiar la carcasa del módulo para hacerla más robusta. Cambiar el LCD 16x4 por una pantalla gráfica o incluso touch (TFT).

REFERENCIAS BIBLIOGÁFICAS

[1] Armfield. “Sistemas de Entrenamiento para Plantas de Proceso”. [En línea]. Disponible en:http://discoverarmfield.com/es/products/view/pct23/sistema-de-entrenamiento-para-plantas-de-proceso.

[2 Edibon Equipamiento Didáctico Técnico.“Sistema EDIBON de Adquisición de Datos/Sistema de Instrumentación Virtual”. [En línea]. Disponible en: http://www.edibon.com/products/catalogues/es/EDAS-VIS.pdf

[3] Edibon Equipamiento Didáctico Técnico. “Entrenador de Transductores e Instrumentación SAIT”. [En línea]. Disponible en: http://www.edibon.com/products/catalogues/es/units/electronics/transducerssensors/SAIT.pdf

[4] National Instruments. “Tarjeta DC Motor Quanser QNET”. [En línea]. Disponible en: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210349#overview

[5] National Instruments. “Tarjeta HVAC Quanser QNET” [En línea]. Disponible en: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210346#overview.

[6] National Instruments. “Tarjeta VTOL Despegue y Aterrizaje Vertical Quanser QNET”. [En línea]. Disponible en: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210347#overview.

[7] National Instruments.“Entrenador de Péndulo Rotatorio Invertido”.[En línea]. Disponible en: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210350#overview.

[8] National Instruments. “Tarjeta Sensores de Mecatrónica Quanser QNET”. [En línea]. Disponible en: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210348#overview.

[9] National Instruments. “Tarjeta MyolectricQuanser QNET”. [En línea]. Disponible en: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210351#overview.

[10] Datalights. “Entrenador Planta de Control EPC”. [En línea]. Disponible en: http://www.datalights.com.ec/site2/images/EPC/epc%20manual%20de%20usuario.pdf

[11] Bascom AVR “AN#192 Aplication Note Getting Started With ATXMEGA and BASCOM-AVR Part1”.

[12] Eduardo García B. “COMPILADOR C CCS Y SIMULADOR PROTEUS PARA MICROCONTROLADORES PIC”. 1ra. Ed. AlfaOmega Grupo Editor México 2008.

[13] David Carmona.“Entorno de Programación CCS”.[En línea]. Disponible en: ftp://www.pereboil.es/AREAS/ELECTRONICA/CFGS/TC1/SOLP/LENGUAJE%20C/Programacion%20C%20para%20electronica/Introduccion%20prog/IDE%20CCS.pdf

[14] Pololu. AN3192 Aplication Note. “Using LSM303DHL for a tilt compensated electronic compass”. [En línea]. Disponible en: https://www.pololu.com/file/0J434/LSM303DLH-compass-app-note.pdf

[15] Andrés Cánovas L. “MANUAL DE USUARIO DEL COMPILADOR PCW DE CCS”. Compiler for Microchip PICmicro [En línea]. Disponible en: http://www.cursos.ucv.cl/eie48700/referencias/CCS_C_Manual.pdf

[16] National Instruments. “Introduction to NI SoftMotion for SolidWorks”.[En línea]. Disponible en: http://www.ni.com/tutorial/9566/en/

[17] National Instruments.“Getting Started with NI SoftMotion for Solidworks”.[En línea].Disponible en: http://www.ni.com/pdf/manuals/372876e.pdf

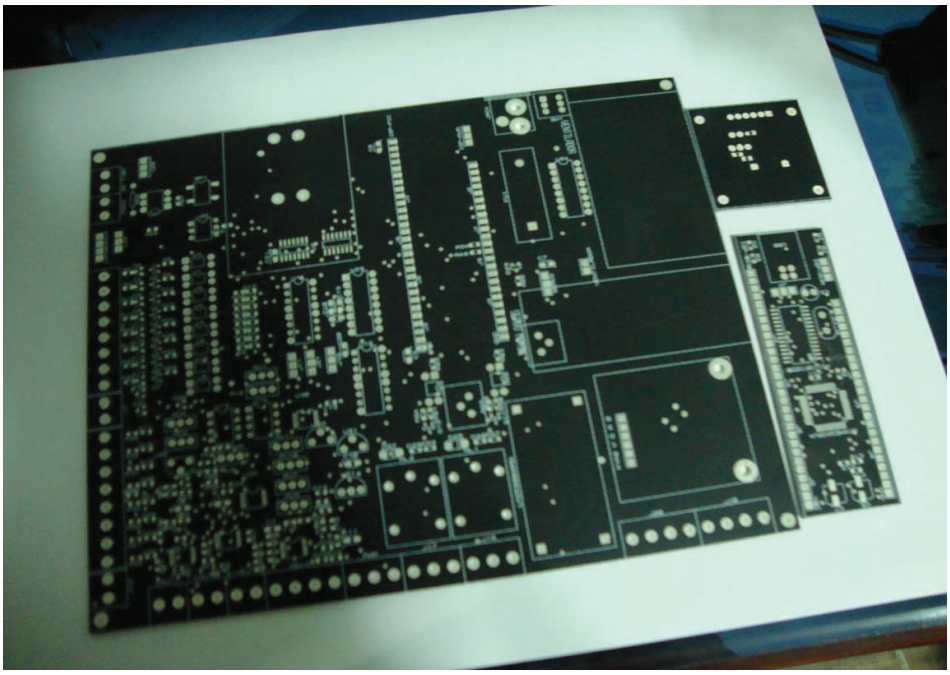
[18] Ingeniería en Microcontroladores.“Protocolo USB (UNIVERSAL SERIAL BUS)”. [En línea]. Disponible en: http://www.i-micro.com/pdf/articulos/usb.pdf

[19] Robert. F. Coughlin, Frederick. F. Driscoll, “Amplificadores Operacionales Lineales y Circuitos Integrados Lineales”, 4ta ed.Prentice-Hall. México 1993.

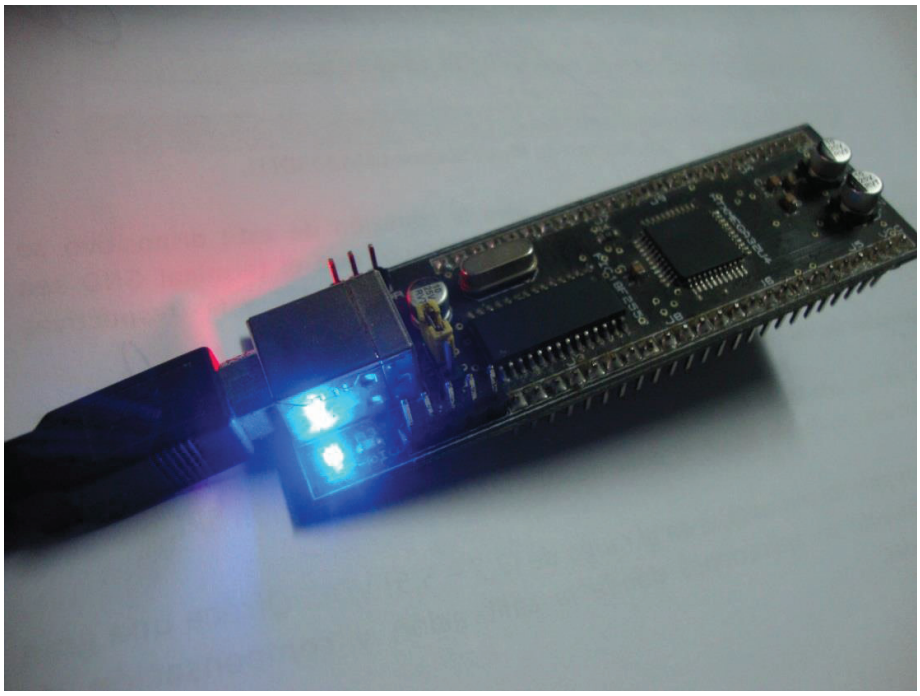
[20] Fairchild Semiconductor. “Applications of Zero Voltaje Crossing Optically Isolated Triac Drivers”, Rev. 4. Julio 2002.

ANEXO A

1. Tarjetas Electrónicas antes de Montaje de Elementos.



2. Tarjeta de microcontroladores después de montaje de elementos.



ANEXO B

3. Tabla para la Configuración del Oscilador PIC18F2550 para la Comunicación USB.

TABLE 2-3: OSCILLATOR CONFIGURATION OPTIONS FOR USB OPERATION

Input Oscillator Frequency	PLL Division (PLLDIV2:PLLDIV0)	Clock Mode (FOSC3:FOSC0)	MCU Clock Division (CPUDIV1:CPUDIV0)	Microcontroller Clock Frequency
48 MHz	N/A(1)	EC, ECIO	None (00)	48 MHz
			÷2 (01)	**24 MHz**
			÷3 (10)	16 MHz
			÷4 (11)	12 MHz
48 MHz	÷12 (111)	EC, ECIO	None (00)	48 MHz
			÷2 (01)	**24 MHz**
			÷3 (10)	16 MHz
			÷4 (11)	12 MHz
		ECPLL, ECPIO	÷2 (00)	48 MHz
			÷3 (01)	32 MHz
			÷4 (10)	**24 MHz**
			÷6 (11)	16 MHz
40 MHz	÷10 (110)	EC, ECIO	None (00)	40 MHz
			÷2 (01)	20 MHz
			÷3 (10)	13.33 MHz
			÷4 (11)	10 MHz
		ECPLL, ECPIO	÷2 (00)	48 MHz
			÷3 (01)	32 MHz
			÷4 (10)	**24 MHz**
			÷6 (11)	16 MHz
24 MHz	÷6 (101)	HS, EC, ECIO	None (00)	**24 MHz**
			÷2 (01)	12 MHz
			÷3 (10)	8 MHz
			÷4 (11)	6 MHz
		HSPLL, ECPLL, ECPIO	÷2 (00)	48 MHz
			÷3 (01)	32 MHz
			÷4 (10)	**24 MHz**
			÷6 (11)	16 MHz

Legend: All clock frequencies, except 24 MHz, are exclusively associated with full-speed USB operation (USB clock of 48 MHz).

ANEXO C

4. Especificaciones Eléctricas del TRIAC Q7015L5

Electrical Specifications

$I_{T(RMS)}$	Part Number			V_{DRM}	I_{GT}					I_{DRM}			V_{GT}	
	Isolated	Non-Isolated			DC Gate Trigger Current In Specific Operating Quadrants V_D = 12VDC (3) (7) (15)					Peak Off-State Current Gate Open V_{DRM} = Max Rated Value (1) (16)			DC Gate Trigger Voltage V_D = 12VDC (2) (6) (15) (18)	
RMS On-State Current Conduction Angle of 360° (4) (16)	THERMOTAB TO-220AB	TO-202AB	TO-220AB	Repetitive Peak Blocking Voltage (1)	mAmps					mAmps			Volts	
				Volts	QI	QII	QIII	QIV	QIV	T_C = 25°C	T_C = 100°C	T_C = 125°C	T_C = 125°C	T_C = 25°C
MAX	See "Package Dimensions" section for variations.			MIN	MAX				TYP	MAX			MIN	MAX
10.0 Amps	Q2010L5	Q2010F51	Q2010R5	200	50	50	50		75	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q4010L5	Q4010F51	Q4010R5	400	50	50	50		75	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q5010L5	Q5010F51	Q5010R5	500	50	50	50		75	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q6010L5	Q6010F51	Q6010R5	600	50	50	50		75	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q7010L5		Q7010R5	700	50	50	50		75	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q8010L5		Q8010R5	800	50	50	50		75	0.1	0.5	2.0	0.2	2.5
15.0 Amps	Q2015L5		Q2015R5	200	50	50	50			.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q4015L5		Q4015R5	400	50	50	50			.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q5015L5		Q5015R5	500	50	50	50			.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q6015L5		Q6015R5	600	50	50	50			.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q7015L5		Q7015R5	700	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
	Q8015L5		Q8015R5	800	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
25.0 Amps			Q2025R5	200	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
			Q4025R5	400	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
			Q5025R5	500	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
			Q6025R5	600	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
			Q7025R5	700	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
			Q8025R5	800	50	50	50			0.1	1.0	3.0	0.2	2.5

General Notes **Electrical Specification Notes**

V_{TM}	I_H	I_{GTM}	P_{GM}	$P_{G(AV)}$	I_{TSM}		dv/dt(c)	dv/dt		tgt	I^2t	di/dt
Peak On-State Voltage at Maximum Rated RMS Current T_C = 25°C (1) (5)	Holding Current (DC) Gate Open (1) (8) (12)	Peak Gate Trigger Current (14)	Peak Gate Power Dissipation (14) $I_{GT} \le I_{GTM}$	Average Gate Power Dissipation	Peak One-Cycle Surge (9) (13) Amps		Critical Rate-of-Rise of Commutation Voltage at Rated V_{DRM} & $I_{T(RMS)}$ Commutating di/dt = 0.54 Rated $I_{T(RMS)}$/ms Gate Unenergized (1) (4) (13)	Critical Rate-of-Rise of Off-State Voltage at Rated V_{DRM} Gate Open (1) Volts/µSec		Gate Controlled Turn-On Time I_{GT} = 200mA 0.1µs Rise Time (10) (17)	RMS Surge (Non-Repetitive) On-State for Period of 8.3ms For Fusing	Maximum Rate-of-Change of On-State Current I_{GT} = 200mA with 0.1µs Rise Time
Volts	mAmps	Amps	Watts	Watts	60Hz	50Hz	Volts/µSec	T_C = 100°C	T_C = 125°C	µSec	$Amps^2Sec$	Amps/µSec
MAX	MAX						TYP	MIN		TYP		
1.6	50	1.8	20	0.5	120	100	4	350	225	3	60	70
1.6	50	1.8	20	0.5	120	100	4	350	225	3	60	70
1.6	50	1.8	20	0.5	120	100	4	300	200	3	60	70
1.6	50	1.8	20	0.5	120	100	4	300	200	3	60	70
1.6	50	1.8	20	0.5	120	100	4	250	175	3	60	70
1.6	50	1.8	20	0.5	120	100	4	250	175	3	60	70
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	4	400	275	4	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	4	400	275	4	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	4	350	225	4	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	4	350	225	4	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	4	300	200	4	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	4	300	200	4	166	100
1.8	100	2.0	20	0.5	200	167	5	400	275	4	220	100
1.8	100	2.0	20	0.5	200	167	5	400	275	4	220	100
1.8	100	2.0	20	0.5	200	167	5	350	225	4	220	100
1.8	100	2.0	20	0.5	200	167	5	350	225	4	220	100
1.8	100	2.0	20	0.5	200	167	5	300	200	4	220	100
1.8	100	2.0	20	0.5	200	167	5	300	200	4	220	100

5. Especificaciones Optoacoplador PC817.

■ Absolute Maximum Ratings

(T_a=25°C)

	Parameter	Symbol	Rating	Unit
Input	Forward current	I_F	50	mA
	*1 Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V_{CEO}	*4 80	V
	Emitter-collector voltage	V_{ECO}	6	V
	Collector current	I_C	50	mA
	Collector power dissipation	P_C	150	mW
Total power dissipation		P_{tot}	200	mW
*2 Isolation voltage		$V_{iso\ (rms)}$	5.0	kV
Operating temperature		T_{opr}	−30 to +100	°C
Storage temperature		T_{stg}	−55 to +125	°C
*3 Soldering temperature		T_{sol}	260	°C

*1 Pulse width≤100μs, Duty ratio : 0.001
*2 40 to 60%RH, AC for 1minute, f=60Hz
*3 For 10s
*4 Up to Date code "P7" (July 2002) V_{CEO} : 35V.

■ Electro-optical Characteristics

(T_a=25°C)

	Parameter		Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage		V_F	I_F=20mA	–	1.2	1.4	V
	Peak forward voltage		V_{FM}	I_{FM}=0.5A	–	–	3.0	V
	Reverse current		I_R	V_R=4V	–	–	10	μA
	Terminal capacitance		C_t	V=0, f=1kHz	–	30	250	pF
Output	Collector dark current		I_{CEO}	V_{CE}=50V, I_F=0	–	–	100	nA
	Collector-emitter breakdown voltage		BV_{CEO}	I_C=0.1mA, I_F=0	*5 80	–	–	V
	Emitter-collector breakdown voltage		BV_{ECO}	I_E=10μA, I_F=0	6	–	–	V
Transfer characteristics	Collector current		I_C	I_F=5mA, V_{CE}=5V	2.5	–	30.0	mA
	Collector-emitter saturation voltage		$V_{CE\ (sat)}$	I_F=20mA, I_C=1mA	–	0.1	0.2	V
	Isolation resistance		R_{ISO}	DC500V, 40 to 60%RH	5×10^{10}	1×10^{11}	–	Ω
	Floating capacitance		C_f	V=0, f=1MHz	–	0.6	1.0	pF
	Cut-off frequency		f_c	V_{CE}=5V, I_C=2mA, R_L=100Ω, −3dB	–	80	–	kHz
	Response time	Rise time	t_r	V_{CE}=2V, I_C=2mA, R_L=100Ω	–	4	18	μs
		Fall time	t_f		–	3	18	μs

*5 From the production Date code "J5" (May 1997) to "P7" (July 2002), however the products were screened by BV_{CEO}≥70V.

6. Especificaciones Optoacoplador 4N25.

ORDER INFORMATION	
PART	**REMARKS**
4N25	CTR > 20 %, DIP-6
4N26	CTR > 20 %, DIP-6
4N27	CTR > 10 %, DIP-6
4N28	CTR > 10 %, DIP-6

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (1)				
PARAMETER	**TEST CONDITION**	**SYMBOL**	**VALUE**	**UNIT**
INPUT				
Reverse voltage		V_R	5	V
Forward current		I_F	60	mA
Surge current	t ≤ 10 µs	I_{FSM}	3	A
Power dissipation		P_{diss}	100	mW
OUTPUT				
Collector emitter breakdown voltage		V_{CEO}	70	V
Emitter base breakdown voltage		V_{EBO}	7	V
Collector current		I_C	50	mA
	t ≤ 1 ms	I_C	100	mA
Power dissipation		P_{diss}	150	mW

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (1)							
PARAMETER	**TEST CONDITION**	**PART**	**SYMBOL**	**MIN.**	**TYP.**	**MAX.**	**UNIT**
INPUT							
Forward voltage (2)	I_F = 50 mA		V_F		1.3	1.5	V
Reverse current (2)	V_R = 3 V		I_R		0.1	100	µA
Capacitance	V_R = 0 V		C_O		25		pF
OUTPUT							
Collector base breakdown voltage (2)	I_C = 100 µA		BV_{CBO}	70			V
Collector emitter breakdown voltage (2)	I_C = 1 mA		BV_{CEO}	30			V
Emitter collector breakdown voltage (2)	I_E = 100 µA		BV_{ECO}	7			V
I_{CEO}(dark) (2)	V_{CE} = 10 V, (base open)	4N25			5	50	nA
		4N26			5	50	nA
		4N27			5	50	nA
		4N28			10	100	nA
I_{CBO}(dark) (2)	V_{CB} = 10 V, (emitter open)				2	20	nA
Collector emitter capacitance	V_{CE} = 0		C_{CE}		6		pF
COUPLER							
Isolation test voltage (2)	Peak, 60 Hz		V_{IO}	5000			V
Saturation voltage, collector emitter	I_{CE} = 2 mA, I_F = 50 mA		$V_{CE(sat)}$			0.5	V
Resistance, input output (2)	V_{IO} = 500 V		R_{IO}	100			GΩ
Capacitance, input output	f = 1 MHz		C_{IO}		0.6		pF

7. Especificaciones MOC3021.

MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
INFRARED EMITTING DIODE			
Reverse Voltage	V_R	3	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
Total Power Dissipation @ T_A = 25°C Negligible Power in Triac Driver Derate above 25°C	P_D	100 1.33	mW mW/°C
OUTPUT DRIVER			
Off-State Output Terminal Voltage	V_{DRM}	400	Volts
Peak Repetitive Surge Current (PW = 1 ms, 120 pps)	I_{TSM}	1	A
Total Power Dissipation @ T_A = 25°C Derate above 25°C	P_D	300 4	mW mW/°C

MOC3021 MOC3022 MOC3023

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
INPUT LED					
Reverse Leakage Current (V_R = 3 V)	I_R	—	0.05	100	μA
Forward Voltage (I_F = 10 mA)	V_F	—	1.15	1.5	Volts
OUTPUT DETECTOR (I_F = 0 unless otherwise noted)					
Peak Blocking Current, Either Direction (Rated V_{DRM}(1))	I_{DRM}	—	10	100	nA
Peak On-State Voltage, Either Direction (I_{TM} = 100 mA Peak)	V_{TM}	—	1.8	3	Volts
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage (Figure 7, Note 2)	dv/dt	—	10	—	V/μs
COUPLED					
LED Trigger Current, Current Required to Latch Output (Main Terminal Voltage = 3 V(3)) MOC3021 MOC3022 MOC3023	I_{FT}	 — — —	 8 — —	 15 10 5	mA
Holding Current, Either Direction	I_H	—	100	—	μA

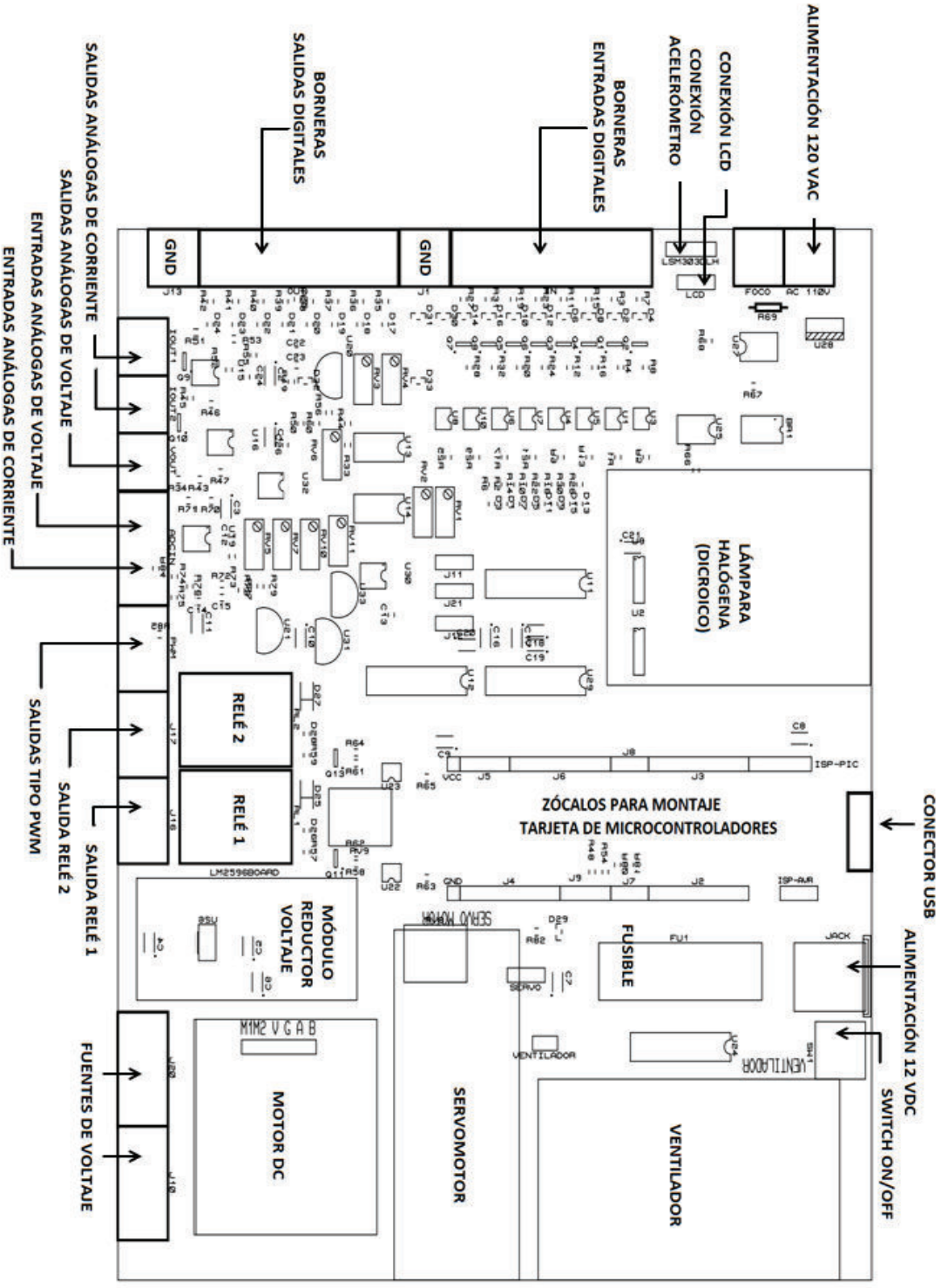
8. Características Eléctricas Diodo Zener BZX84C3V3.

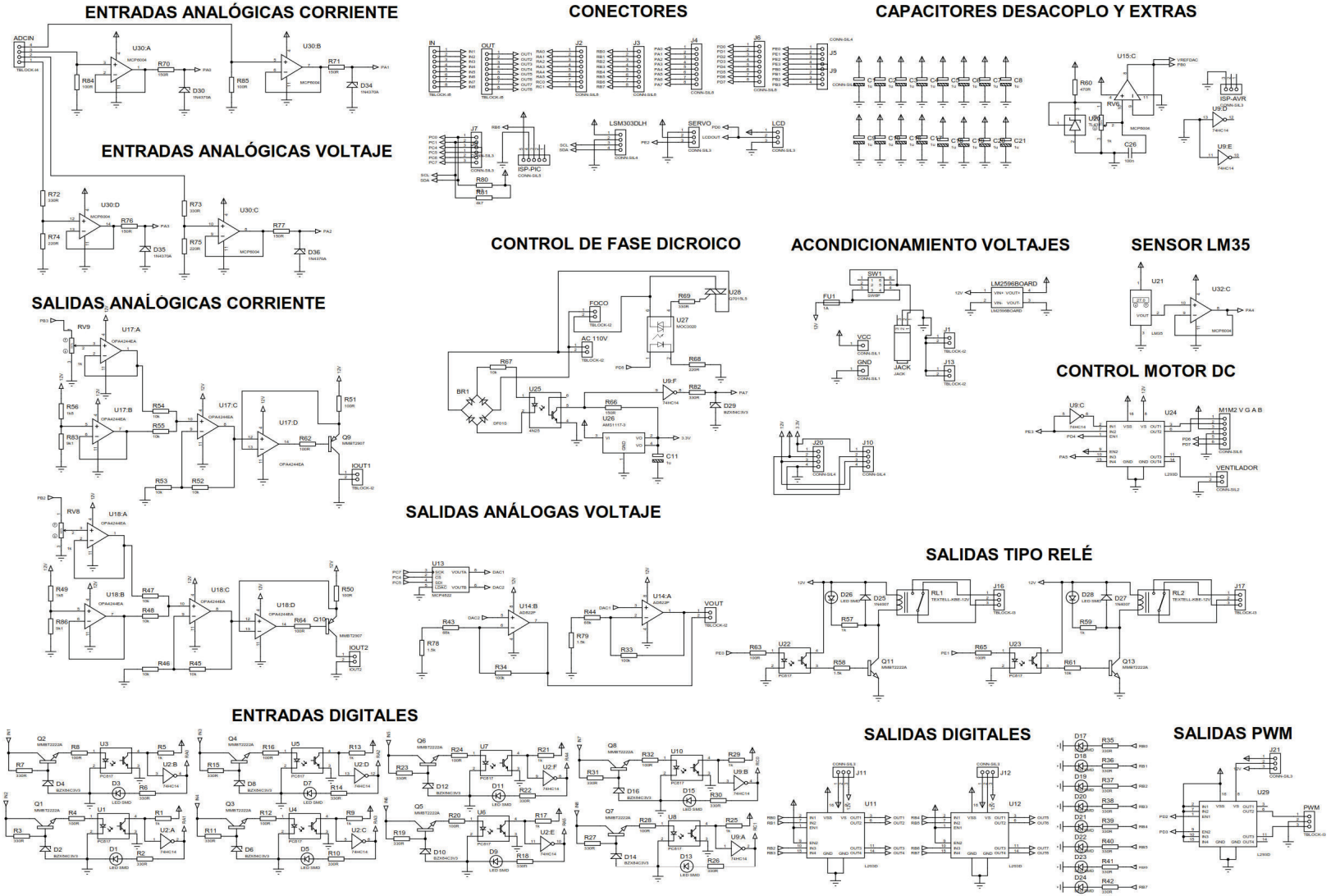
ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (T_A=25°C), V_F=0.9V MAX @ I_F=10mA (for all types)

TYPE	ZENER VOLTAGE V_Z @ I_{ZT}			TEST CURRENT	MAXIMUM ZENER IMPEDENCE			MAXIMUM REVERSE CURRENT		MAXIMUM ZENER CURRENT	MAXIMUM ZENER VOLTAGE TEMP. COEFF.	MARKING CODE
	MIN	NOM	MAX	I_{ZT}	Z_{ZT} @ I_{ZT}	Z_{ZK} @ I_{ZK}		I_R @	V_R	I_{ZM}	ΘV_Z	
	V	V	V	mA	Ω	Ω	mA	μA	V	mA	% / °C	
BZX84C2V4	2.2	2.4	2.6	5.0	100	600	1.0	50	1.0	104	-0.06	W3
BZX84C2V7	2.5	2.7	2.9	5.0	100	600	1.0	20	1.0	92	-0.06	W4
BZX84C3V0	2.8	3.0	3.2	5.0	95	600	1.0	10	1.0	83	-0.06	W5
BZX84C3V3	3.1	3.3	3.5	5.0	95	600	1.0	5.0	1.0	76	-0.06	W6
BZX84C3V6	3.4	3.6	3.8	5.0	90	600	1.0	5.0	1.0	69	-0.06	W7
BZX84C3V9	3.7	3.9	4.1	5.0	90	600	1.0	3.0	1.0	64	-0.06	W8
BZX84C4V3	4.0	4.3	4.6	5.0	90	600	1.0	3.0	1.0	58	-0.05	W9
BZX84C4V7	4.4	4.7	5.0	5.0	80	500	1.0	3.0	2.0	53	-0.03	Z1
BZX84C5V1	4.8	5.1	5.4	5.0	60	480	1.0	2.0	2.0	49	0.02	Z2
BZX84C5V6	5.2	5.6	6.0	5.0	40	400	1.0	1.0	2.0	45	0.03	Z3
BZX84C6V2	5.8	6.2	6.6	5.0	10	150	1.0	3.0	4.0	40	0.04	Z4
BZX84C6V8	6.4	6.8	7.2	5.0	15	80	1.0	2.0	4.0	37	0.05	Z5
BZX84C7V5	7.0	7.5	7.9	5.0	15	80	1.0	1.0	5.0	33	0.05	Z6
BZX84C8V2	7.7	8.2	8.7	5.0	15	80	1.0	0.7	5.0	30	0.06	Z7
BZX84C9V1	8.5	9.1	9.6	5.0	15	100	1.0	0.5	6.0	27	0.06	Z8
BZX84C10	9.4	10	10.6	5.0	20	150	1.0	0.2	7.0	25	0.07	Z9

ANEXO D

9. Ubicación de elementos y borneras en tarjeta electrónica.



ANEXO E

10. Diagrama de Circuitos Completo.