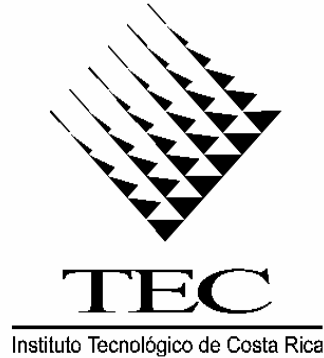


Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**“Diseño e implementación del prototipo de un sistema de control que
simule las funciones de la tarjeta Intellisys en un compresor estacionario
Ingersoll Rand”**

Instituto Costarricense de Electricidad

I.C.E.

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero
en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Mario Alberto Vargas Jiménez

Cartago, Septiembre de 2007

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

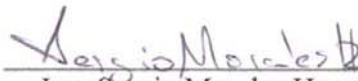
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

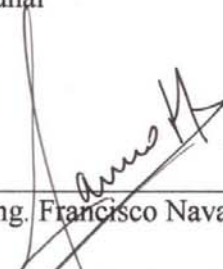
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal


Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector


Ing. Francisco Navarro Henríquez

Profesor lector


Ing. Gabriela Ortiz León

Profesor asesor



TEC

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 3 de septiembre del 2007

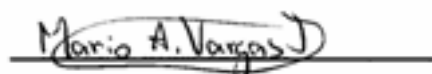
Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Palmares, 27 de agosto de 2007

A handwritten signature in black ink that reads "Mario A. Vargas J". The signature is written in a cursive style and is positioned above a solid horizontal line.

Mario Alberto Vargas Jiménez.

Cédula: 2-567-868

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, ya que con su ayuda he obtenido la capacidad y perseverancia para levantarme cada día y tratar de ser mejor. Él nos bendice para que podamos hacer bien las cosas.

A mis padres y hermanos, que siempre están presentes a mi lado y con la disposición de apoyarme incondicionalmente.

A mi novia Ericka quien siempre está a mi lado apoyándome y cultivando todo ese amor que día a día crece con gran intensidad. Gracias por creer en mí y por valerme tal cual soy.

Agradecimiento

Agradezco al personal de la Unidad de Innovación y Crecimiento del MET, todos ellos al depositar su confianza en mi contribuyeron al éxito del proyecto, a los ingenieros Mario Rojas Castro y Allen Ledezma Rojas por la ayuda ofrecida en todo momento.

Deseo además agradecer a los profesores de la escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por hacer bien su trabajo y servir de guías durante mis estudios.

Un agradecimiento especial a la profesora Ing. Gabriela Ortiz León quien con sus observaciones y consejos me ayudó a salir adelante con este proyecto y llevarlo a su conclusión.

Resumen

En los proyectos de generación eléctrica del ICE se cuenta con maquinaria neumática que requiere de sistemas de producción de aire comprimido para ponerla en funcionamiento. La producción en los talleres hace que la demanda de aire crezca. Para mantener una presión estable y satisfacer la demanda de aire, el ICE ha adquirido compresores estacionarios cuya operación se basa en diferentes tecnologías. Los más modernos cuentan con sistemas de control electrónicos. Estos, al operar en ambientes de trabajo industriales, se encuentran expuestos a ruidos y fluctuaciones en el sistema eléctrico lo cual hace que poco a poco se deterioren sus partes. La tarjeta de control de estos compresores es llamada Intellisys y, hasta la fecha, los compresores adquiridos entre 1990 y 1998 han presentado problemas que han dañado esta parte. La compañía fabricante de estos compresores ha descontinuado esta tarjeta, por lo que la reparación de este tipo de daños se hace imposible al no tener los repuestos disponibles en el mercado.

El objetivo de este proyecto es la fabricación de una tarjeta de control similar a la Intellisys, lo cual facilitaría la reparación de los compresores.

Con la implementación del controlador prototipo basado en microcontrolador se obtuvo la comunicación con la tarjeta de adquisición variables para hacer la lectura de datos en los transductores del sistema, se logró actuar sobre la tarjeta de interfaz de potencia para controlar el funcionamiento de las partes del compresor y se programaron los modos de compresión de encendido “dentro y fuera de línea” y de “modulación” en la compresión.

Palabras clave

Intellisys, microcontrolador, ruidos, compresor.

Abstract

The “Instituto Costarricense de Electricidad” uses pneumatic machinery to perform some works. This makes necessary the use of compressed air production systems.

The ICE has stationary air compressors to supply enough air to put the pneumatic machinery into operation. The Ingersoll Rand SSR-EP200 compressor uses an electronic control card to manage every process of its parts. Some of these compressors have suffered damages in the electronic control card due to exposition into industrial work atmospheres.

The control card used by these compressors is called Intellisys and when it is damaged, it is impossible to replace it. The reason is that the manufacturer has discontinued this card.

That makes impossible to repair this type of damages when not having the available replace.

It is necessary to implement an electronic control system similar to the Intellisys to fix non operational compressors. This would make easier the repair of a compressor.

The implemented control card is based on an electronic microcontrolled system which performs the basic functions to control the parts of the compressor that produces compressed air.

Keywords

Intellisys, microcontroller, noises, compressor.

INDICE GENERAL

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
Capítulo 2. Meta y objetivos	3
2.1 Meta.....	3
2.2 Objetivo general.....	3
2.3 Objetivos específicos	3
Capítulo 3. Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema.....	4
3.1 Compresores de aire [1]	4
3.1.1 Usos del aire y gases comprimidos [1].....	4
3.1.2 Unidades y condiciones estándares [1].....	4
3.1.3 Compresores rotatorios de tornillo doble inundados en aceite [1].....	4
3.2 Puerto serie RS-232 [7]	6
3.3 Inter Integrated Circuit (I2C) [8]	7
3.4 Sensores de temperatura (Termistores) [9]	7
3.5 Sensores de presión (galga extensiométrica) [10].....	8
3.5.1 Presión Absoluta [10]	9
3.5.2 Presión Atmosférica [10]	9
3.5.3 Presión Manométrica [10]	9
Capítulo 4. Análisis y estudio del compresor.....	12
4.2 Descripción de la parte electrónica del sistema.....	15
4.2.1 Bloque de adquisición de variables	15
4.2.2 Tarjeta controladora Intellisys	18
4.2.3 Etapa de potencia	19
Capítulo 5. Solución implementada	24
5.1 Evaluación de alternativas	24
5.2 Descripción del hardware	26
5.2.1 Comunicación con la tarjeta de adquisición de datos.....	26
5.2.2 Comunicación con la tarjeta interfaz de potencia	28
5.2.3 Etapa de procesamiento de datos.....	30
5.2.4 Interfaz con el usuario	31
5.3 Descripción del software.....	34
5.3.1 Microcontrolador principal	34
5.3.1.1 Teclado.....	34
5.3.1.2 Conexión con reloj en tiempo real (RTC).....	35
5.3.1.3 Menú.....	37
5.3.1.4 Mostrar datos medidos en transductores.....	39
5.3.1.5 Configuración de presión mínima y máxima de operación	40
5.3.1.6 Operación del compresor	42
5.3.2 Comunicación con PIC secundario mediante I2C	42
5.3.3 Comunicación con PC mediante el protocolo RS-232.....	45
5.3.4 Microcontrolador secundario	46
5.3.4.1 Rutina para adquisición de variables	47
5.3.4.2 Etapa de potencia.....	49
Capítulo 6. Análisis de resultados	55
6.1 Revisión de registros de estado mediante monitoreo a través del puerto RS-232.....	55
6.2 Mediciones realizadas con el analizador lógico LogicPort.....	56

6.3 Linealización de transductores de presión.....	59
6.4 Linealización de sensores de temperatura	60
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones.....	63
7.1 Conclusiones	63
7.2 Recomendaciones	64
Bibliografía	65
Apéndices.....	66
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología	66
A.2 Descripción detallada de las señales utilizadas en el sistema desarrollado	67
A.2.1 Microcontrolador principal.....	67
A.2.2 Microcontrolador secundario.....	72
A.2.2.a Conexión con tarjeta de adquisición de variables	72
A.2.2.b Conexión con tarjeta de interfaz de potencia	76
A.3 Información sobre la institución	84
A.3.1 Descripción de la institución	84
A.3.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto	84
Anexos	86
Anexo A Periféricos a controlar en la tarjeta de adquisición de datos:	86
A.1 MC14051B, multiplexor / demultiplexor analógico	86
A.2 LTC1093CN, Sistema de adquisición de datos de 6 canales con entrada y salida digital.....	87
Anexo B. Hojas de datos del controlador del motor paso a paso	92
Anexo C. Hojas de datos del microcontrolador PIC18F458.....	94

Índice de figuras

Figura 1.1 Diagrama de bloques del circuito de control electrónico del compresor estacionario Ingersoll Rand SSR-EP200.....	2
Figura 3.1 Sistema compresor de aire mediante tornillos rotativos paralelos. [4]	4
Figura 3.2 Principio de operación de un compresor de doble tornillo.....	5
Figura 3.3 Formas constructivas de termistores NTC a. Tipo glóbulo con diferentes tipos de terminales - b. Tipo disco - c. Tipo barra [9].....	8
Figura 3.4 Puente de Wheatstone para galga extensiométrica [10].....	10
Figura 3.5 Transductor de presión de silicio difundido [10].	10
Figura 4.1 Diagrama del circuito de producción de aire comprimido dentro de un compresor estacionario Ingersoll Rand SSR-EP200. [4]	12
Figura 4.2 Diagrama de bloques de la etapa de adquisición de variables en el compresor Ingersoll-Rand SSR-EP200.....	16
Figura 4.3 Configuración de los pines del transductor de presión.....	16
Figura 4.4 Proceso de digitalización de señales de presión.....	17
Figura 4.5 Circuito acondicionador de señales para los transductores de presión [2].	17
Figura 4.6 Circuito acondicionador de señales obtenidas en los sensores de temperatura. [2] 18	
Figura 4.7 Diagrama de conexiones del motor de la unidad compresora y el ventilador de enfriamiento del compresor [4].....	20
Figura 4.8 Etapa de control de alimentación y movimiento del motor paso a paso de la válvula de ingreso de aire [4].....	22
Figura 4.9 Tarjeta PCB para monitoreo de límites de apertura y cierre de la válvula de ingreso de aire.....	23
Figura 5.1 Diagrama de bloques de solución propuesta basada en sistema electrónico con microcontrolador.....	25
Figura 5.2 Diagrama de bloques de solución propuesta basada en control mediante PLC.....	25
Figura 5.3 Diagrama de bloques de comunicación con tarjeta de adquisición de variables.	27
Figura 5.4 Diagrama de bloques de comunicación con tarjeta de interfaz de potencia.	29
Figura 5.5 División de la etapa de procesamiento de datos.	30
Figura 5.6 Esquemático del hardware implementado para Conexión del PIC con LCD y decodificador de teclado MMC74C922N.	32
Figura 5.7 Hardware implementado.	33
Figura 5.8 Diagrama de flujo de interrupción por teclado.	35
Figura 5.9 Diagrama de flujo de la rutina utilizada para la lectura de los registros del RTC.....	36
Figura 5.10 Diagrama de flujo de la rutina utilizada para escribir en los registros del RTC BQ3285EP.....	37
Figura 5.11 Diagrama de flujo de la rutina utilizada para mostrar el menú de opciones de programa en el visualizador LCD.....	38
Figura 5.12 Diagrama de flujo de rutina para despliegue de datos medidos en LCD.	40
Figura 5.13 Diagrama de rutina par configuración de presión mínima de línea.	41
Figura 5.14 Diagrama de flujo de rutina para ingreso de comandos al compresor.	42
Figura 5.15 Parte baja del registro de control y estado del sistema.....	43
Figura 5.16 Parte alta del registro de control y estado del sistema.	43
Figura 5.17 Diagrama de bloques de rutina para lectura de estado de PIC secundario.	44
Figura 5.18 Diagrama de bloques de rutina para escritura de comandos para PIC secundario.45	
Figura 5.19 Diagrama de bloques de programa para control de microcontrolador secundario. 47	
Figura 5.20 Diagrama de flujo de rutina para obtención de datos digitales del ADC.	48
Figura 5.21 Diagrama de flujo de rutina para control de motor paso a paso.....	50
Figura 5.22 Diagrama de flujo de rutina para revisión de apertura y cierre de la válvula de ingreso.....	51
Figura 5.23 Diagrama de flujo de proceso de arranque del motor principal.	52
Figura 5.24 Diagrama de flujo de operación en modo “ON/OFF”.....	53
Figura 6.1 Resultados obtenidos en condiciones iniciales mediante el monitoreo de registros de estado a través del puerto serie.	55
Figura 6.2 Resultados obtenidos en registros de estado a través del puerto serie. Sistema listo para iniciar unidad compresora.	56
Figura 6.3 Ciclo de escritura de configuración y lectura de dato medido en ADC LTC1093CN.57	
Figura 6.4 Ciclo de escritura de configuración I2C para el microcontrolador secundario.	58
Figura 6.5 Prueba de apertura y cierre de válvula de admisión de aire.	58

Figura 6.6 Gráfico de valores medidos en la tarjeta de adquisición de variables para el transductor de presión de 0 a 200 PSI en función de la presión aplicada.....	60
Figura 6.7 Gráfico de temperatura contra dato medido en ADC.	62
Figura A.2.1 Conexión del decodificador de teclado MM74C922N [14].	67
Figura A.2.2 Conexión de los PIC para comunicarse mediante I2C.....	69
Figura A.2.3 Conexión del PIC principal con el RTC.	70
Figura A.2.4 Direcciones de los registros del BQ3285EP [12].	71
Figura A.2.5 Conexión del MAX232 al PIC18LF458.....	72
Figura A.2.6 Señales a controlar para la obtención de datos del LTC1093CN [9].	73
Figura A.2.7 Señales a controlar para la obtención de datos del LTC1093CN.	73
Figura A.2.8 Señales a controlar para la obtención de datos del LTC1093CN.	75
Figura A.2.9 Bobinados de un motor paso a paso bipolar.....	76
Figura A.2.10 Bobinados de un motor paso a paso bipolar.....	77
Figura A.2.11 Esquemático de la conexión PIC secundario con Interfaz de potencia.	79
Figura A.2.12 Interfaz de potencia para control de actuadores.....	80
Figura A.2.13 Esquemático de la conexión PIC secundario con Interfaz de potencia.	80
Figura A.2.14 Esquemático del circuito diseñado.....	81
Figura A.2.15 Esquemático de la tarjeta de adquisición de variables.	83
Figura A.1 Diagrama de pines del MC14051B [10].	86
Figura A.2 Diagrama de pines del LTC1093CN [9].....	87
Figura A.3 Palabra de control para obtener los datos del LTC1093CN [9].	88
Figura A.4.a. Secuencia de operación del LTC1093CN en modo unipolar con entradas diferenciales (CH4+ y CH5-) y salida en formato LSB-first [9].	90
Figura A.4.b Secuencia de operación del LTC1093CN en modo unipolar con entradas diferenciales (CH4+ y CH5-) y salida en formato MSB-first [9].	90
Figura A.5.a Span de entrada y asignación de código para conversión bipolar [9].	90
Figura A.5.b Span de entrada y asignación de código para conversión bipolar [9].	91

Índice de tablas

Tabla 3.1 Descripción de puerto serie RS-232 para conector de 9 pines [7].	7
Tabla 5.1 Comparación de ventajas y desventajas entre los sistemas propuestos.	26
Tabla 6.1 Valores medidos en la tarjeta de adquisición de variables para diferentes valores de presión en los transductores de presión de 0 a 200 PSI.	59
Tabla 6.2 Valores medidos en ADC para uno de los termistores a diferentes temperaturas.....	60
Tabla 6.2 Continuación.	61
Tabla A.2.1 Tabla de verdad para salidas del MC14051B [10].	75
Tabla A.1 Tabla de tabla de verdad para el MC14051B, MC14052B, y MC14053B [10].	86
Tabla A.2.a Tabla de verdad para la selección de canales a medir en el LTC1093CN [9].	89
Tabla A.2.b Tabla de verdad para la selección de canales a medir en el LTC1093CN [9].	89

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Tanto en la división de Maquinaria Equipo y Talleres (MET)¹, como en los proyectos de generación eléctrica del ICE se utilizan equipos neumáticos para la realización de diversos trabajos. Los equipos neumáticos requieren de aire comprimido para funcionar y en el caso de los talleres MET, se cuenta con una serie de tuberías que transportan el aire a través de las instalaciones. La utilización de aire que se tiene es grande y para satisfacer esta demanda, es necesaria la utilización de compresores estacionarios con capacidades de producción que mantengan los niveles de presión estables. Estos compresores se encuentran funcionando durante todo el día, entrando en operación cada vez que sea necesario. La presión en las tuberías debe mantenerse entre 100 y 125 PSI (*Pounds per square inch* ó libras por pulgada cuadrada) para evitar problemas de operación en los equipos neumáticos.

Actualmente en las instalaciones del MET se cuenta con dos compresores estacionarios funcionando en conjunto. Uno de ellos tiene un sistema de control analógico, mientras que el otro es más moderno y posee un sistema de control digital. De este tipo de compresores se tienen dos fuera de operación. El control de estos compresores se lleva a cabo mediante tres tarjetas electrónicas que en conjunto se encargan de la adquisición de datos de los transductores, configuración de modos de operación y accionamiento de componentes tales como válvulas y motores. La figura 1.1 muestra el diagrama de bloques del sistema controlador que actualmente posee el compresor con control digital.

El primer bloque representa la etapa en la cual se conectan los sensores y transductores del compresor. Los datos sensados son interpretados por la tarjeta Intellisys en el segundo bloque. La tarjeta Intellisys es la que se encarga además de comunicarse con la tarjeta de interfaz para potencia que accione los componentes del compresor tales como electroválvulas y motores.

Este compresor fue adquirido en 1992 junto con otros cinco que se encuentran ubicados en otros proyectos de generación eléctrica del ICE. Tres de estos compresores se encuentran fuera de operación debido a que su

¹ Ver apéndice A.3 Información sobre la institución.

respectiva tarjeta controladora sufrió un daño eléctrico. Por esta razón es necesario sustituir dicha tarjeta y así poner el compresor en funcionamiento. En la actualidad, el fabricante no produce la tarjeta controladora utilizada por estos compresores, por lo que no se puede adquirir en el mercado para reparar los compresores en mal estado.

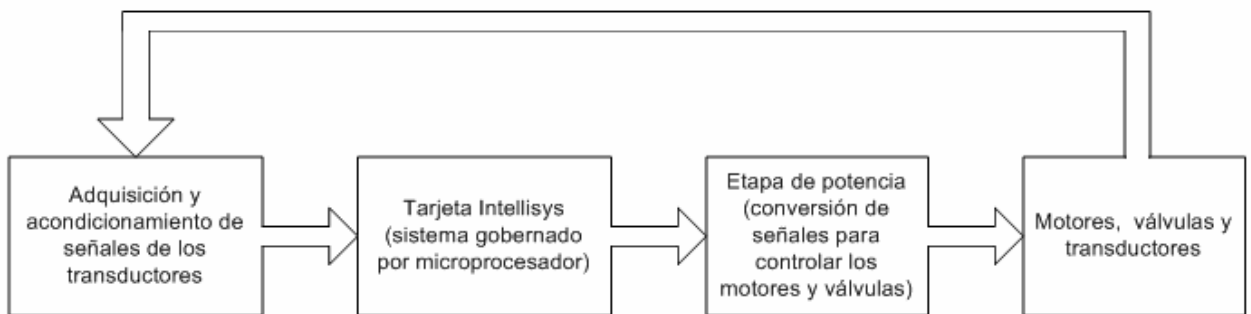


Figura 1.1 Diagrama de bloques del circuito de control electrónico del compresor estacionario Ingersoll Rand SSR-EP200.

El problema existente nace a raíz de que la tarjeta controladora Intellisys está descontinuada y no es posible adquirirla. Esto llevó a proponer el diseño e implementación de una tarjeta similar a la Intellisys, que realice las funciones básicas para controlar las partes del compresor y hacer que este sea funcional.

Específicamente, lo que se requiere es la implementación de un sistema controlador que se encargue de gobernar las partes de un compresor estacionario Ingersoll Rand modelo SSR-EP200 y así lograr la producción de aire comprimido.

Capítulo 2. Meta y objetivos

2.1 Meta

Poner a funcionar uno de los compresores estacionarios Ingersoll Rand que actualmente se tiene fuera de funcionamiento debido a que el repuesto electrónico que necesita se encuentra obsoleto.

2.2 Objetivo general

Diseñar e implementar el prototipo de un sistema de control genérico que simule las funciones básicas que tiene a cargo la tarjeta controladora Intellisys en los compresores estacionarios Ingersoll-Rand SSR-EP200.

2.3 Objetivos específicos

- Determinar las señales de control que deben ser consideradas y su importancia en el sistema.
- Seleccionar el tipo de microcontrolador o PLC a utilizar que mejor se adapte a los requerimientos del sistema compresor.
- Desarrollar el prototipo de la tarjeta de control.
- Implementar las rutinas de software que controlarán tanto la medición de las variables como el accionamiento de los motores y electroválvulas del sistema.
- Comprobar el adecuado funcionamiento del sistema prototipo instalándolo en uno de los compresores dañados.

Capítulo 3. Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema

3.1 Compresores de aire [1]

A continuación se describirá algo de teoría acerca de compresores de aire y los usos que se les da.

3.1.1 Usos del aire y gases comprimidos [1]

El aire comprimido se utiliza generalmente en la operación de máquinas y herramientas. En la industria se le dan diversos usos y las presiones utilizadas varían dependiendo de la actividad que se realiza. Por ejemplo, el uso más frecuente en talleres y fábricas es de una línea donde se mantiene una presión de entre 90 y 110 psig que son los valores nominales para la operación de los equipos.

3.1.2 Unidades y condiciones estándares [1]

La unidad estándar para la medición de presión en el Sistema Internacional (SI) es el kilopascal (kPa).

En países de Europa y en Estados Unidos utilizan el bar como unidad estándar para medir presión, de manera que 1 bar equivale a 14.5 psi (*pounds per square inch*, o libras por pulgada cuadrada).

3.1.3 Compresores rotatorios de tornillo doble inundados en aceite [1]

La figura 3.1 muestra el corte seccional de una unidad compresora este tipo. El principio de operación se puede determinar a partir de la figura 3.2.

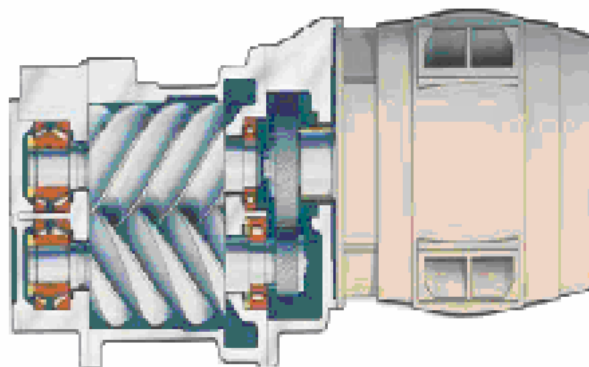


Figura 3.1 Sistema compresor de aire mediante tornillos rotativos paralelos. [4]

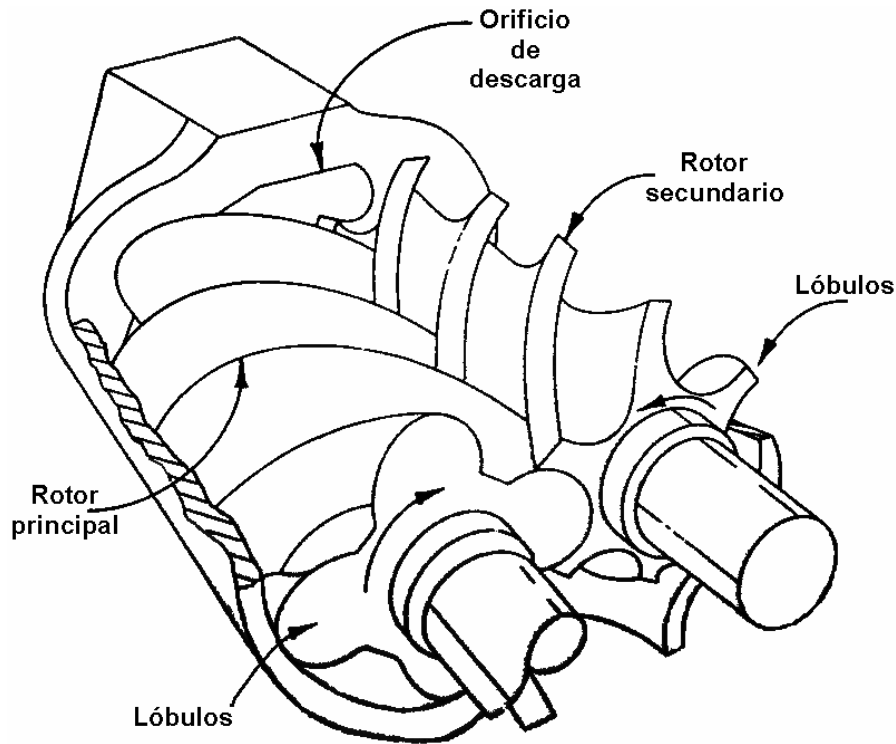


Figura 3.2 Principio de operación de un compresor de doble tornillo.

El desplazamiento de un compresor de doble tornillo está dado por la expresión:

$$V_{th} = KD^3 \frac{L}{D} C_{th} N \quad (2)$$

Donde:

- $K = N_m (A_{mg} + A_{fg}) D^2$
- D = diámetro del rotor.
- L = longitud del rotor.
- N_m = número de lóbulos² en el rotor principal.
- A_{mg} = área de una ranura en el rotor principal.
- A_{fg} = área de una ranura en el rotor secundario.
- C_{th} es una constante de traslape (entre 0.95 y 1.0 para casi todos los diseños), que corrige el traslape de los procesos de llenado y

² Los lóbulos son las partes salientes o protuberancias en los tornillos rotatorios. En el caso del rotor principal de la figura 3.2 se tienen 4 lóbulos, mientras que el rotor secundario cuenta con 6 lóbulos.

compresión. C_{th} depende del ángulo de alabeo, del perfil y del número de lóbulos.

Existen diferentes configuraciones utilizadas para el diseño de los tornillos, donde se utiliza diferentes cantidades de lóbulos. En el diseño más popular, se utiliza una combinación de 4 y 6 lóbulos.

Para completar un ciclo de llenado y compresión en este tipo de diseño se tiene que realizar una rotación de aproximadamente 750° en el rotor principal.

3.2 Puerto serie RS-232 [7]

La interfaz RS-232 es útil para implementar sistemas de comunicaciones serie en distancias menores a los 15 metros, y utilizando velocidades menores que 20 Kb.

Puede ser utilizada en comunicación asíncrona o síncrona y tipos de canal "simplex", "half duplex" o "full duplex". En un canal "simplex" los datos siempre viajarán en una dirección. En un canal "half duplex" los datos pueden viajar en una u otra dirección. Mientras que en un canal "full duplex", la comunicación se da en ambos sentidos simultáneamente. Una interfase "full duplex" puede implementarse utilizando solamente 3 cables. Una vez que ha comenzado la transmisión de un dato, los bits tienen que llegar uno a uno con una velocidad constante. Por eso se dice que el RS-232 es asíncrono por carácter y síncrono por bit.

Las señales con las que trabaja este puerto serie son digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos. El RS-232 puede transmitir los datos en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, a velocidades determinadas. Después de la transmisión de los datos, le sigue un bit opcional de paridad, que indica si el número de bits transmitidos es par o impar, para detectar fallos y después 1 o 2 bits de parada. En la tabla 3.1 se muestra la descripción de las señales utilizadas para implementar la comunicación serie mediante el protocolo RS-232. En dicha tabla se describen los pines utilizados y las señales que transporta cada uno de ellos.

Tabla 3.1 Descripción de puerto serie RS-232 para conector de 9 pines [7].

Número de Pin	Señal	Descripción	E/S
1	-	Masa chasis	-
3	TxD	Transmit Data	S
2	RxD	Receive Data	E
7	RTS	Request To Send	S
8	CTS	Clear To Send	E
6	DSR	Data Set Ready	E
5	SG	Signal Ground	-
1	CD/DCD	(Data) Carrier Detect	E
4	DTR	Data Terminal Ready	S
9	RI	Ring Indicator	E

3.3 Inter Integrated Circuit (I2C) [8]

I2C es un bus de comunicaciones serie muy usado, principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos.

El bus I2C solamente utiliza dos hilos para transmitir la información: por uno van los datos y por otro la señal de reloj que sirve para sincronizarlos. Es necesaria también una tercera línea usada como referencia (gnd). Tanto la línea de datos como de reloj son de drenador abierto, por lo que necesitan resistencias de “pull-up”.

Los dispositivos conectados al bus I2C tienen una dirección para ser identificados, pueden ser amos o esclavos. El dispositivo amo inicia la transferencia de datos y además genera la señal de reloj, pero no es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo. De manera que es posible utilizar el bus I2C en modo multimaestro.

3.4 Sensores de temperatura (Termistores) [9]

Los termistores son fabricados a partir de mezclas de óxidos metálicos, que los hace tener propiedades semiconductoras. El comportamiento de los termistores es el de resistores térmicos, en otras palabras, la resistencia que éstos presentan está en función de la temperatura del medio en que se encuentran.

Dependiendo de la composición química utilizada para fabricar los termistores, se pueden clasificar en dos tipos: NTC y PTC.

Los termistores NTC cuentan con un coeficiente de temperatura negativo (“Negative Temperatura Coeficient”), de manera que mantienen cierto grado de resistencia eléctrica a temperatura ambiente y al aplicarles calor, su resistencia disminuye.

Por otro lado, los termistores PTC poseen un coeficiente de temperatura positivo (“Positive Temperatura Coeficient”). El coeficiente de temperatura positivo hace que la resistencia en éste tipo de termistores se incremente en función de la temperatura aplicada a ellos.

La elevada sensibilidad a las variaciones de temperatura hacen que los termistores presenten grandes facilidades y sean adecuados para llevar a cabo mediciones de temperatura con gran precisión. Lo cual los ha hecho útiles en la medición de temperatura dentro de aplicaciones industriales.

La mayoría de los termistores tienen un reducido tamaño que los hace prácticos para instalar discretamente en diferentes ubicaciones. En la figura 3.3 se muestran algunas de las presentaciones de los termistores que se pueden encontrar en el mercado.

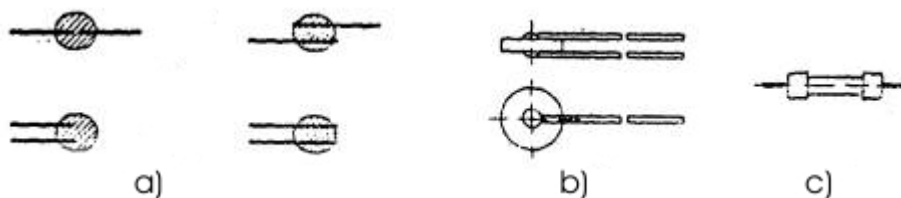


Figura 3.3 Formas constructivas de termistores NTC a. Tipo glóbulo con diferentes tipos de terminales - b. Tipo disco - c. Tipo barra [9].

3.5 Sensores de presión (galga extensiométrica) [10]

Cuando se habla de presión, se sabe que la presión es una fuerza que se aplica a una determinada área. Existen diferentes unidades para expresar la presión. En el caso de la medición de presión en gases se utilizan los bares o los psi.

Los diferentes tipos de presión, son: presión absoluta, presión atmosférica y presión manométrica.

3.5.1 Presión Absoluta [10]

La presión absoluta se da cuando se realiza una medición de presión de un fluido tomando como referencia el vacío. El vacío se presenta cuando no existe choque entre las moléculas. La utilización de este término se debe a que la presión atmosférica sufre variaciones con respecto a las altitudes sobre el nivel del mar. De manera que la presión absoluta hace que el concepto sea más universal y pueda ser utilizado en cualquier parte del mundo sin importar la altitud sobre el nivel del mar.

3.5.2 Presión Atmosférica [10]

La presión atmosférica se refiere a la fuerza que ejerce el peso de una columna de aire sobre un cuerpo. Al tener una columna de aire sobre la tierra se aplica la fuerza del peso de ésta sobre una superficie, lo cual representa a la presión atmosférica. La presión atmosférica a nivel del mar tiene un valor aproximado de 14.7 psi. Conforme la altitud aumenta, se presenta una disminución en el valor de la presión atmosférica.

3.5.3 Presión Manométrica [10]

Este tipo de presión es mayor a la atmosférica. La presión manométrica se mide a partir de la diferencia de la presión absoluta y la atmosférica. En otras palabras, la presión manométrica es medida omitiendo el valor de la presión atmosférica. De manera que la presión manométrica se puede expresar como:

$$\text{Presión Manométrica} = \text{Presión Absoluta} - \text{Presión Atmosférica}$$

Para realizar mediciones de presión se utilizan diferentes dispositivos con sus respectivos principios de funcionamiento. Uno de ellos es la galga extensiométrica. La galga esta constituida por un puente de Wheatstone. Al aplicar una tensión al circuito, se produce una pequeña corriente que circula por las resistencias que conforman dicho arreglo. El elemento con que se mide la presión por lo general entrega a su salida un valor de resistencia, que es utilizado en el puente de Wheatstone. Cuando se produce alguna variación en la presión del sistema se presenta un desequilibrio en el puente, haciendo que a la salida de éste se obtenga una diferencia de potencial proporcional a la presión medida.

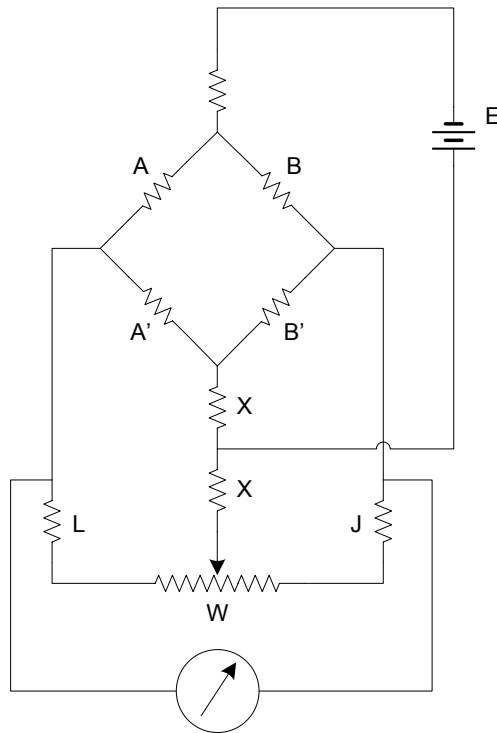


Figura 3.4 Puente de Wheatstone para galga extensiométrica [10].

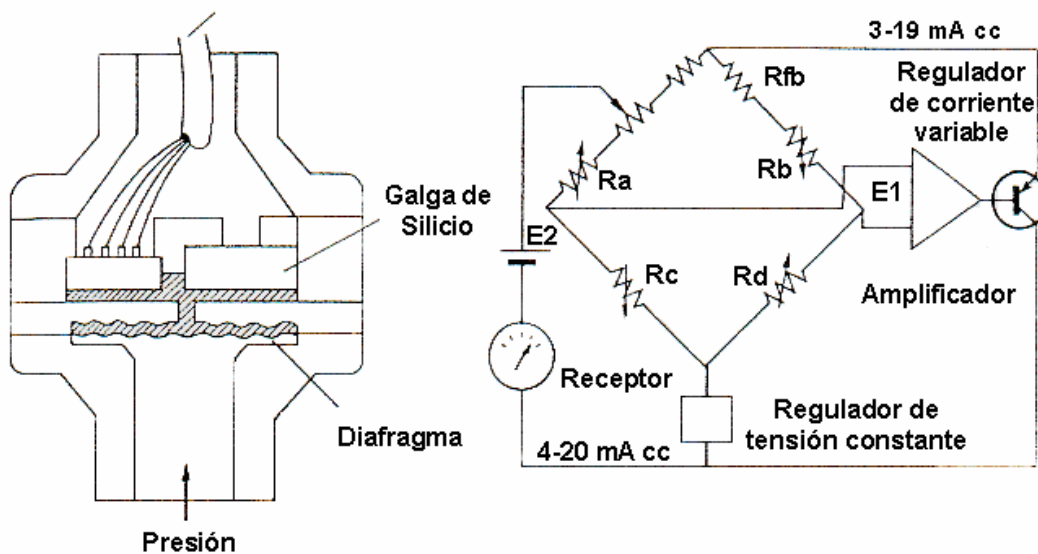


Figura 3.5 Transductor de presión de silicio difundido [10].

En la figura 3.5 se ejemplifica el uso que se le da a este tipo de arreglos para realizar mediciones de presión. Inicialmente se tiene un diafragma que dependiendo de la presión aplicada a él, entrega a su salida un valor determinado de resistencia. Este valor de resistencia es utilizado en uno de los lados del arreglo de Wheatstone, de manera que si se mantiene el circuito

alimentado y se presenta alguna variación en esta resistencia, se tendrá a la salida un valor de tensión proporcional a la presión medida de la siguiente manera.

Cuando no se tiene presión, las tensiones E1 y E2 mantienen la misma magnitud, mientras que al aplicar presión, el valor de Ra aumenta, mientras que el valor de Rb disminuye su resistencia. Generando así diferencias entre las magnitudes de las tensiones E1 y E2 y por consiguiente entregando a la salida un valor de tensión proporcional al de la presión medida.

Capítulo 4. Análisis y estudio del compresor

Los compresores de aire que operan bajo el principio de tornillos rotativos son una alternativa en la industria para llevar a cabo la producción de aire comprimido. Dentro de un compresor de aire de este tipo se puede encontrar una serie de partes mecánicas que son las encargadas de realizar la compresión del aire. Para explicar detalladamente el proceso de compresión, se utilizará el diagrama de la figura 4.1 que muestra las partes del circuito de producción de aire del compresor con que se trabajó.

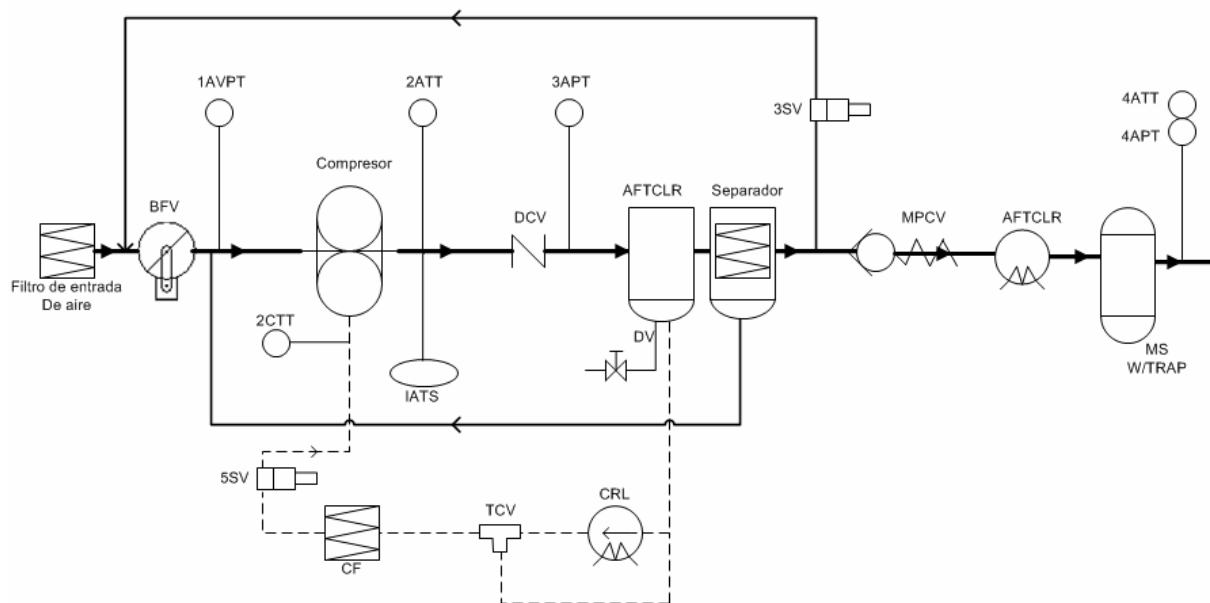


Figura 4.1 Diagrama del circuito de producción de aire comprimido dentro de un compresor estacionario Ingersoll Rand SSR-EP200. [4]

El proceso de compresión inicia cuando el ingreso de aire se hace a través de del filtro de entrada que se muestra en la parte izquierda del diagrama. Seguido de este filtro se encuentra una válvula de ingreso (BFV) cuya función es regular la entrada de aire a la unidad compresora. Mientras esta válvula se mantenga cerrada, no ingresará aire a la unidad; cuando se abre, dependiendo de su apertura, así será el caudal de aire que ingrese al sistema. Esta válvula de ingreso es una de las partes que se debe controlar con el fin de regular la producción de aire. El control de esta válvula se hace mediante el movimiento de un motor paso a paso, el cual permite que se tenga gran precisión a la hora de abrir o cerrarla.

La unidad compresora cuenta con dos tornillos en ejes paralelos que son girados con la ayuda del motor trifásico. Para iniciar el funcionamiento del compresor se debe realizar el arranque del motor que maneja los tornillos de la unidad compresora. El arranque de la unidad compresora requiere de una configuración eléctrica de transición estrella a delta para mantenerla en operación con el menor consumo de corriente posible. En la figura 4.1 se muestra la unidad compresora con el nombre “Compresor”, a la derecha de la válvula de ingreso.

El sistema inicia su ciclo una vez que se encuentran girando los tornillos, cuando esto sucede, la válvula de ingreso debe ser controlada para permitir que el aire entre y pase a través de la unidad compresora.

Cuando el ingreso de aire ha iniciado, la presión de entrada es monitoreada mediante el sensor 1AVPT (*“Air Vacuum Pressure Transducer”*), encargado de medir la presión de vacío en la cavidad de ingreso en la unidad compresora. Este transductor mide presiones en un rango que va de 0 psi a 15 psi. En condiciones normales, cuando la unidad compresora está girando los tornillos y la válvula de ingreso se encuentra cerrada, éste transductor mide una presión inferior a la de referencia, que en este caso es la presión atmosférica que tiene un valor aproximado de 14.7 psi.

Dentro de la unidad compresora, el giro de los tornillos hace que se lleve a cabo el proceso de compresión de aire mediante el principio de reducción de volumen. La reducción de volumen en los fluidos hace que la temperatura aumente. Por esta razón, el compresor cuenta con una válvula que inyecta aceite al circuito de producción de aire para lubricar las partes mecánicas del compresor. El aceite al mismo tiempo cumple la función de refrigerante del aire comprimido cuando se mezcla con este. En la figura 4.1 se puede apreciar la válvula que controla el flujo de aceite como 5SV. Además, es importante el monitoreo de la temperatura del aceite ingresado al compresor, por lo que este dato es medido mediante el sensor 2CTT (*“Coolant Temperature Sensor”*).

Siguiendo el proceso de compresión, se cuenta con un sensor de temperatura a la salida del compresor (ver 2ATT en figura 4.1). Este sensor se encarga de medir la temperatura del fluido de salida de la unidad compresora, que es una mezcla de aire comprimido con aceite.

Como un mecanismo de seguridad, en esta cavidad se cuenta con un interruptor térmico que se activa al presentarse temperaturas que sobrepasen los límites que soporta el compresor (ver 1ATS en diagrama de figura 4.1).

En esta misma cavidad se encuentra instalada una válvula llamada DCV (*Discharge Check Valve*, ver diagrama de figura 4.1). Esta se encarga de liberar el aire comprimido hacia la siguiente etapa e impide que este regrese a la unidad de compresión.

El fluido de salida de la unidad compresora pasa por un dispositivo que separa el aire comprimido del aceite utilizado para enfriarlo. Esta etapa es el separador que se muestra en la figura 4.1 después de la válvula de descarga. El aceite separado se reutiliza, de manera que pueda ser inyectado nuevamente al compresor, mientras que el aire sigue su proceso de separación de aceite.

En la salida de la etapa anterior se cuenta con una válvula cuya función es enviar el aire comprimido a la entrada de la válvula de mariposa en caso de que se utilice la operación de descarga del compresor.

Una vez que se ha separado el aire del aceite, éste pasa por una etapa de postenfriado llamada AFTCLR (*after cooler*). Aquí se baja la temperatura del aire comprimido.

Luego de reducir la temperatura del aire, se pasa el producto por otro dispositivo encargado de purificar el aire que se enviará al sumidero, de manera que éste salga del sistema limpio hacia las tuberías. Este dispositivo es denominado MS W/TRAP (ver figura 4.1) y se encuentra limitando el sistema con la salida del mismo.

Finalmente se cuenta con un sensor de temperatura (4ATT) y un transductor de presión (4APT), juntos se encargan de monitorear la temperatura y presión del aire de salida respectivamente.

La información anterior describe los sensores que deben ser monitoreados y las partes a controlar dentro del compresor para llevar a cabo el ciclo de producción de aire.

4.2 Descripción de la parte electrónica del sistema

En la actualidad este compresor cuenta con un sistema de control electrónico que consta de tres tarjetas. En la figura 1.1 se puede observar el diagrama de bloques de este sistema.

Las tarjetas que conforman este controlador son:

- Adquisición y acondicionamiento de señales
- El controlador (sistema Intellisys con microprocesador).
- Tarjeta de interfaz del arrancador (etapa de potencia).

Esta etapa es la interfaz del control electrónico con el accionamiento de los motores y electroválvulas del compresor.

4.2.1 Bloque de adquisición de variables

El bloque de adquisición de variables se encuentra conectado a cada uno de los sensores de presión y temperatura instalados para monitorear el compresor. Las señales recibidas de los transductores son digitalizadas mediante un convertidor de analógico a digital para luego ser enviadas a la controladora Intellisys, donde estas señales son interpretadas.

El diagrama de la figura 4.2 ilustra la forma en que los sensores del compresor entregan sus señales analógicas al convertidor de analógico a digital (ADC) de la tarjeta de adquisición de variables.

Las señales conectadas a esta tarjeta son:

- Tres sensores de presión (descritos en sección 4.1).
- Tres sensores de temperatura (descritos en sección 4.1).
- Un indicador magnético de estado en la puerta del panel de control.
- Contacto auxiliar que monitorea el estado del botón de paro de emergencia del compresor.
- Un conector multicable que conecta con la tarjeta controladora Intellisys.

Los valores de presión dentro del compresor son medidos a partir de transductores tipo puente. Llamados así debido a que en ellos la presión se mide a partir de una galga extensiométrica instalada en un puente Wheatstone. En la sección 3.5 se describe su principio de funcionamiento.

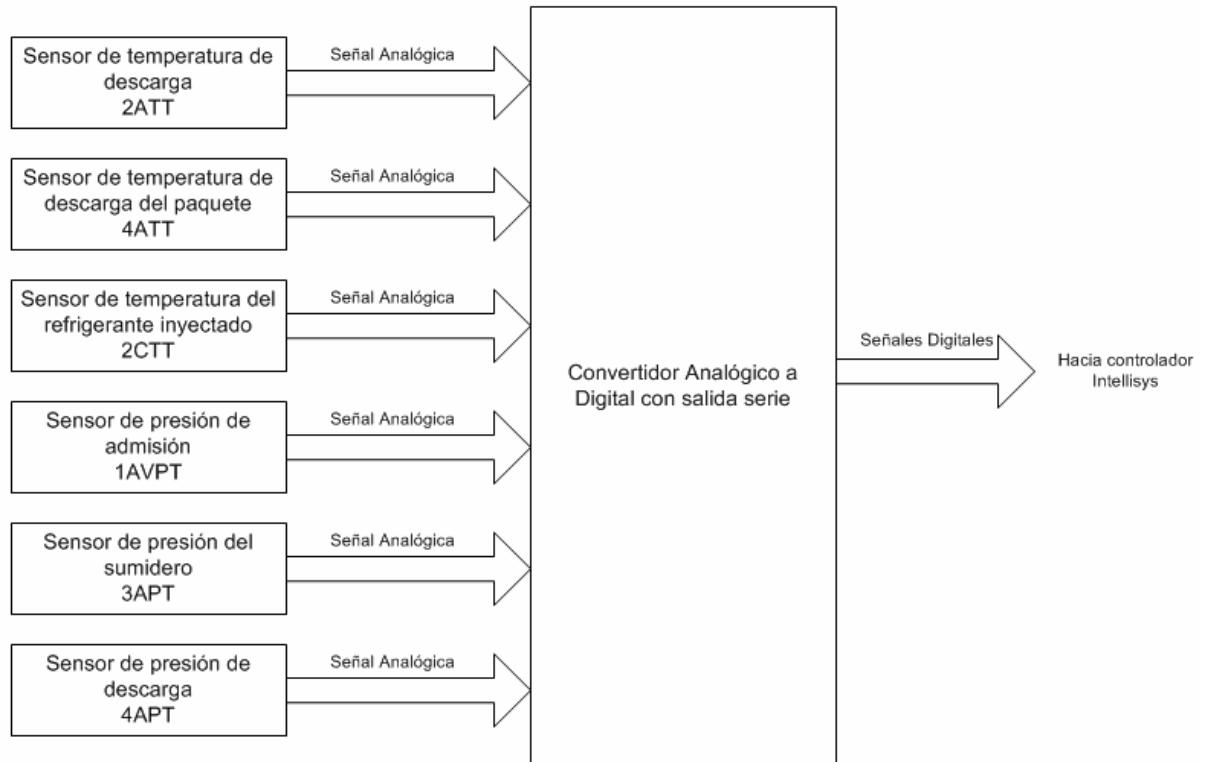


Figura 4.2 Diagrama de bloques de la etapa de adquisición de variables en el compresor Ingersoll-Rand SSR-EP200.

La figura 4.3 muestra las cuatro líneas de conexión eléctrica existentes en los transductores de presión utilizados.

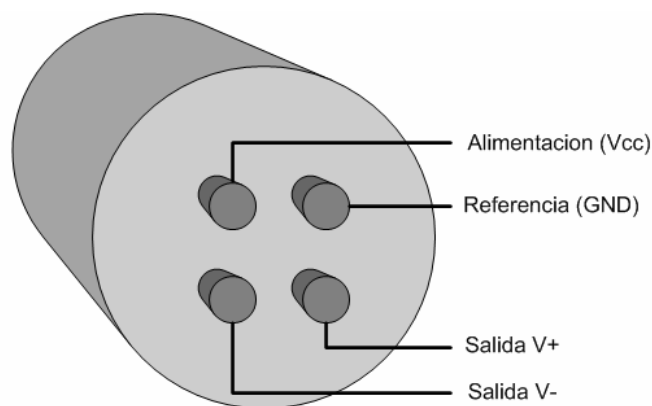


Figura 4.3 Configuración de los pines del transductor de presión.

La señal de salida de los transductores de presión tipo puente es del orden de los milivoltios, por lo que es necesario amplificarla para ser medida de manera precisa.

En la figura 4.4 se muestra la manera en que la señal medida en el transductor pasa a través de un amplificador que se encarga de acondicionarla para luego convertirla en una entrada del ADC, que luego de digitalizar la medición puede enviar los datos a la tarjeta controladora.

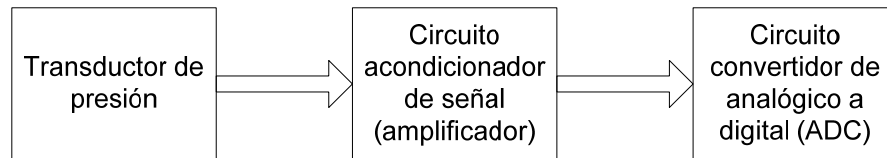


Figura 4.4 Proceso de digitalización de señales de presión.

El circuito utilizado como acondicionador de señal se basa en un arreglo de dos amplificadores operacionales configurados en modo de amplificador diferencial. Esta configuración ayuda a obtener a la salida del circuito una tensión proporcional a la diferencia de las señales medidas del transductor de presión [2]. En la figura 4.5 se muestra la configuración del circuito acondicionador de señal ubicado en la tarjeta de adquisición de variables.

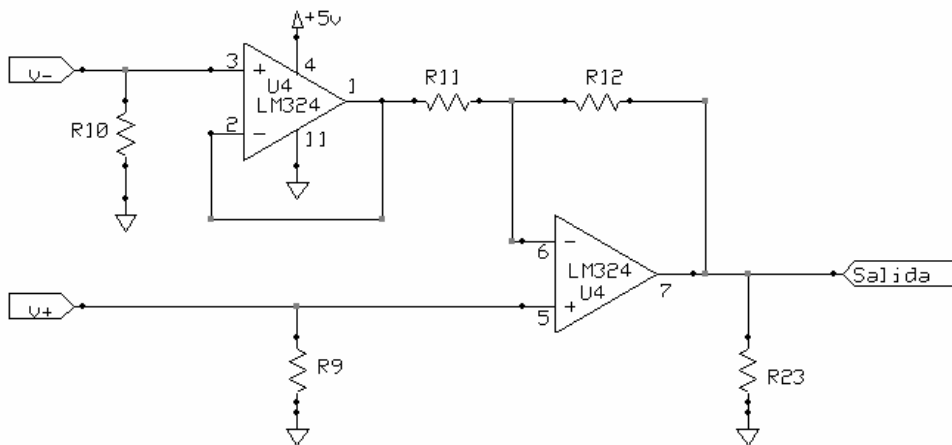


Figura 4.5 Circuito acondicionador de señales para los transductores de presión [2].

Las entradas del circuito de la figura 4.5 son las tensiones que entrega el transductor de presión. El primer amplificador operacional acopla la impedancia de la tensión negativa recibida del transductor, mientras que el segundo amplificador está configurado como un amplificador diferencial. Esto hace que la tensión en la salida de este circuito sea:

$$V_{salida} = (V_{(+)} - V_{(-)}) \frac{R_{12}}{R_{11}} \quad (1)$$

Lo cual hace que la diferencia de tensiones de salida del compresor sea amplificada en un factor de R_{12}/R_{11} .

La adquisición de las mediciones de temperatura se hace a partir de termistores tipo NTC (consultar sección 3.4). La señal obtenida a la salida de estos es acondicionada para luego ser procesada por el ADC.

El circuito utilizado para acondicionar los valores proporcionados por el sensor de temperatura se muestra en la figura 4.6.

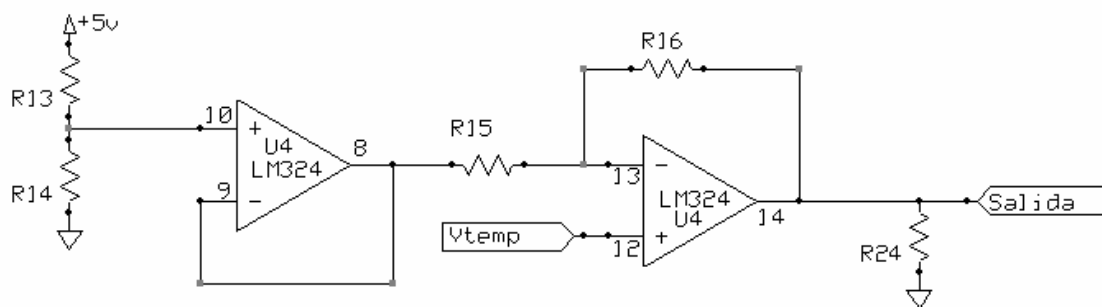


Figura 4.6 Circuito acondicionador de señales obtenidas en los sensores de temperatura. [2]

El acondicionador de señales para mediciones en el termistor esta constituido por un amplificador diferencial que entrega a su salida una tensión proporcional a la temperatura medida.

4.2.2 Tarjeta controladora Intellisys

La Intellisys es un sistema mínimo basado en microprocesador. Esta tarjeta interactúa con el bloque de adquisición de variables para así obtener los datos digitalizados de los transductores. Además se encuentra conectada a un visualizador de mensajes y una botonera, encargados de la interfaz con el usuario. Esta tarjeta interpreta para enviar los comandos pertinentes a la etapa de potencia.

La Intellisys puede hacer que el compresor trabaje en dos modos.

- Modulación / Selección de control automático.

Este modo permite que el compresor module la producción de aire en función de la demanda presente. La operación en este modo monitorea el sensor de presión de la salida y si se presenta una

disminución, abre la válvula de ingreso para mantener la presión de salida en un valor estable.

- En línea / Fuera de línea.

Este modo se configura para que el compresor produzca aire automáticamente. Cuando en la línea de salida de aire se detecta una presión mínima, se abre completamente la válvula de ingreso de aire (trabajo a máxima carga del compresor) hasta que se llegue a un nivel apropiado de presión en la salida. Al llegar a la presión máxima, se cierra la válvula de ingreso de aire para funcionar sin carga hasta que la presión llegue nuevamente al valor mínimo para volver a producir aire a carga máxima.

4.2.3 Etapa de potencia

La etapa de potencia recibe como entrada los comandos que la tarjeta Intellisys envía para controlar los diferentes dispositivos del compresor. Los componentes que están conectados a esta tarjeta son:

- El motor de pasos de la válvula de entrada.
- La tarjeta de los interruptores de límite del motor de pasos.
- Las fuentes de poder de 24 V y 115V
- Las luces de potencia.
- El interruptor de alta temperatura (1ATS).
- El interruptor de emergencia.
- Los contactos auxiliares de los arrancadores.
- Los sensores de sobrecarga del motor principal.
- Los sensores de sobrecarga del sensor de abanico.
- La válvula de control de aceite (5SV).
- Las bobinas de los arrancadores.
- Los puntos de conexión para el botón de arranque/paro remoto.
- Las 4 bases para los circuitos integrados de las diferentes opciones.

Además existe un cable multilíneas que conecta el controlador Intellisys con esta tarjeta.

El bloque de interfaz de potencia, además de proveer la alimentación de todo el sistema de control, se encarga de realizar la interfaz de las señales digitales de control con los dispositivos actuadores del compresor.

En esta tarjeta se encuentran conectados los contactores encargados tanto de hacer el arranque en estrella del motor principal de la unidad compresora, como los que hacen el cambio a configuración triángulo para el funcionamiento normal del mismo.

La figura 4.7 muestra el diagrama de conexiones del motor de la unidad compresora, el motor del ventilador de enfriamiento, los contactores de arranque de los motores. También se muestra la conexión con el transformador que entrega la alimentación del sistema de control.

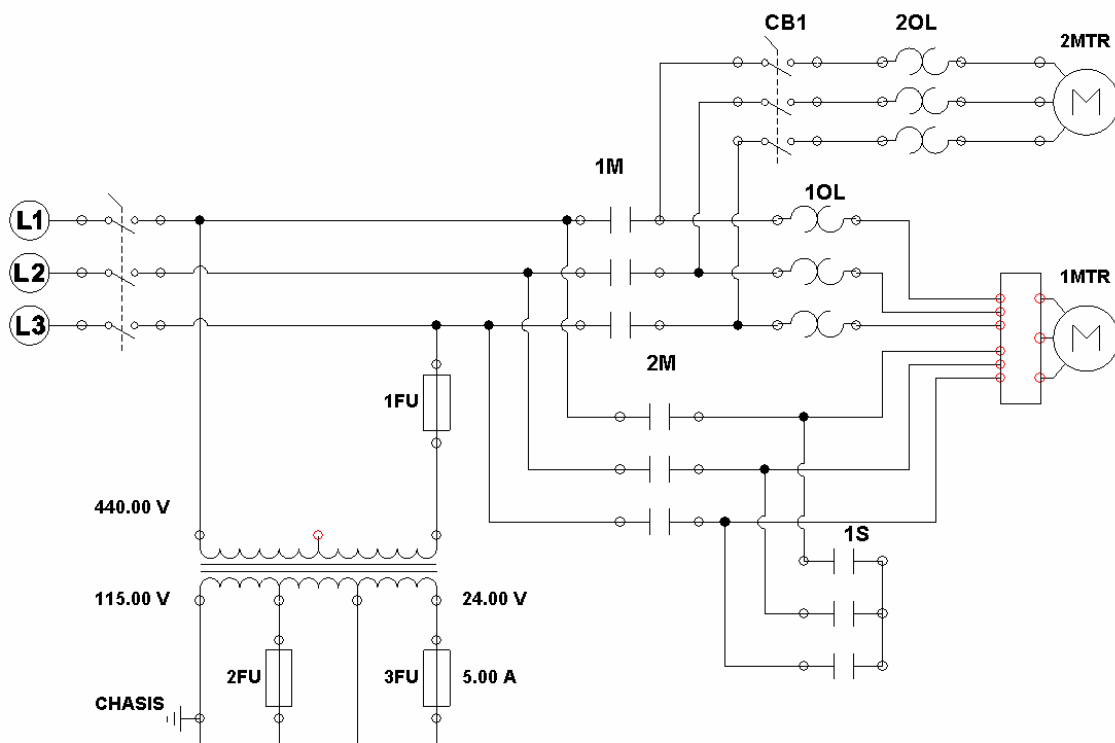


Figura 4.7 Diagrama de conexiones del motor de la unidad compresora y el ventilador de enfriamiento del compresor [4].

El motor que moviliza los tornillos de la unidad compresora se denomina “1MTR”, este es un motor trifásico. Para ponerlo en movimiento, el fabricante dispuso los contactores “1M”, “2M” y “1S” tal y como se muestra en la figura 4.7. Esta disposición de los contactores permite hacer que el motor sea arrancado con una transición de estrella a delta.

Para hacer el arranque en estrella es necesario cerrar los contactores denominados “1S”, y luego cerrar los contactores “1M” para hacer la conexión

con las líneas de alimentación principal. Al cerrar estos contactores el motor recibe la corriente necesaria para a girar y obtener inercia para luego hacer la transición a delta mediante la apertura de los contactores “1S” y el cierre de “2M”.

El motor “2MTR” hace que gire el ventilador utilizado para enfriar el radiador del sistema de enfriamiento. Este motor inicia su giro cuando los contactores “1M” se cierran, por lo que este motor y el de la unidad compresora arrancan simultáneamente.

En cada uno de estos motores se tienen conectadas protecciones térmicas (“1OL” y “2OL”), que son utilizadas para monitorear el estado de la alimentación de los motores, de manera que si se presenta un problema, éste será indicado mediante el envío de una señal a la tarjeta de control que será interpretada por el controlador del sistema.

En la tarjeta de interfaz de potencia también se controlan las electroválvulas 3SV y 5SV mostradas en la figura 4.1. La válvula 5SV es la encargada de permitir que el lubricante utilizado en la unidad compresora fluya por todas sus cavidades cuando esta se encuentra abierta. Por otro lado, la válvula 3SV tiene la función de descargar la unidad compresora. Esta válvula se abre cuando la unidad se encuentra operando en modo de descarga y es cerrada mientras la unidad se encuentra en carga (comprimiendo aire). La apertura y cierre de ésta válvula se encuentra en función del estado de la válvula de admisión. De manera que cuando se cierra la válvula de admisión, es necesario abrir 3SV para que la unidad compresora descargue. Mientras que cuando se abre la válvula de ingreso de aire, 3SV debe cerrarse para que el sistema comprima el aire y cargue.

El control de giro del motor paso a paso regula la apertura de la válvula de ingreso se realiza en esta tarjeta. Para llevar a cabo este control se cuenta con un controlador L297, el cual está conectado a dos circuitos integrados L6203 que tienen la función de entregar la alimentación a las bobinas del motor de pasos a partir de los comandos recibidos de la tarjeta Intellisys.

La figura 4.8 muestra la conexión de los circuitos integrados mencionados anteriormente. El L297 controla las bobinas del motor mediante los dos L6203. Para hacer que este motor se mueva, es necesario que la

Intellisys genere la señal para selección del sentido de giro y la señal de reloj para recorrer los pasos necesarios.

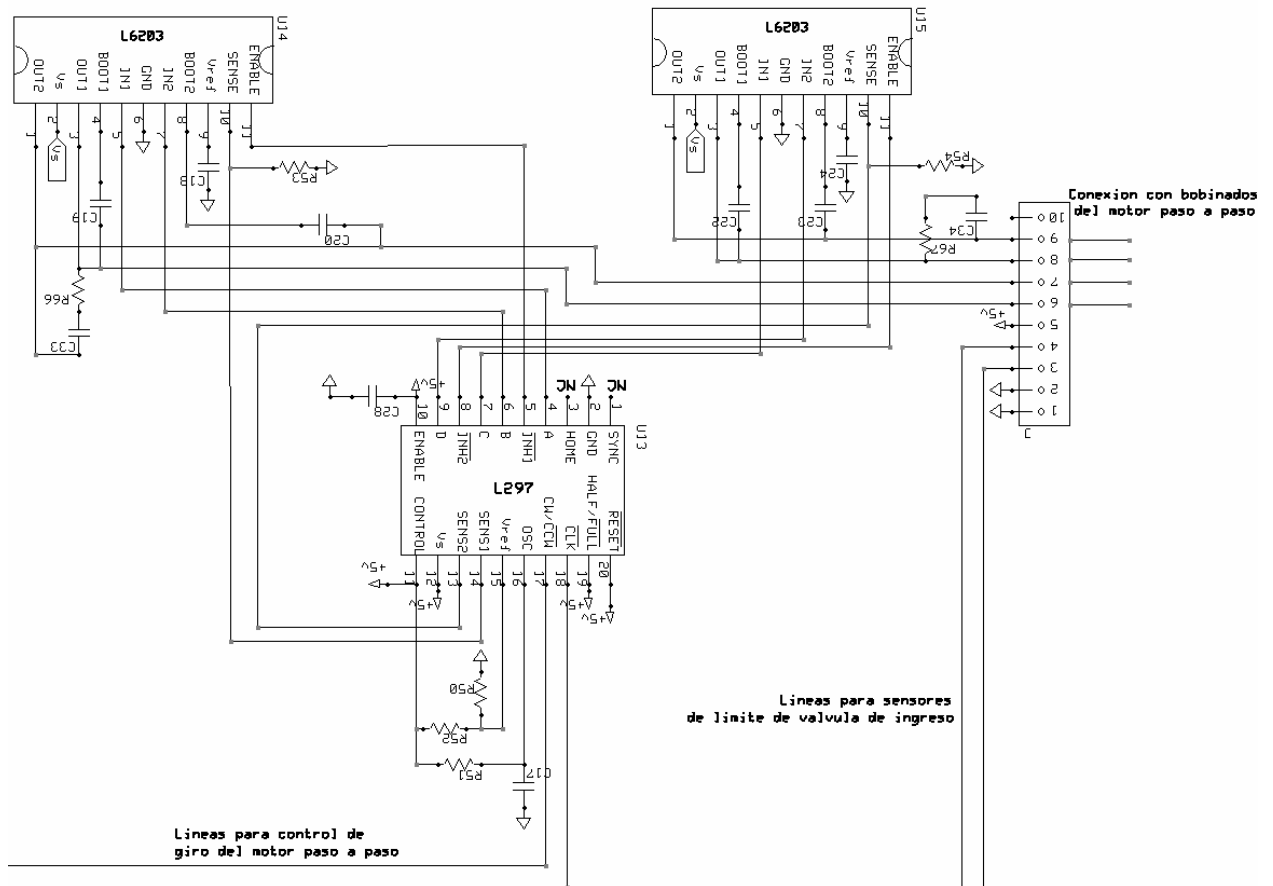


Figura 4.8 Etapa de control de alimentación y movimiento del motor paso a paso de la válvula de ingreso de aire [4].

Para detectar la posición del motor paso a paso existe una tarjeta PCB instalada sobre el eje del mismo. La tarjeta de límites cuenta con dos interruptores de final de carrera, ubicados estratégicamente para detectar si la válvula de ingreso se encuentra totalmente abierta o totalmente cerrada. En la figura 4.9 se puede observar esta tarjeta. Existe una posición inicial en la cual debe mantenerse la válvula mientras el sistema se encuentra descargado (válvula cerrada). El otro sensor se encuentra justo donde la válvula de ingreso se encuentra totalmente abierta. La funcionalidad de esta tarjeta es tener un control de la cantidad de pasos que el motor tiene que recorrer ya sea para abrir o cerrar la válvula de ingreso de aire. La diferencia en distancia entre la apertura y cierre de la válvula es de 80°.

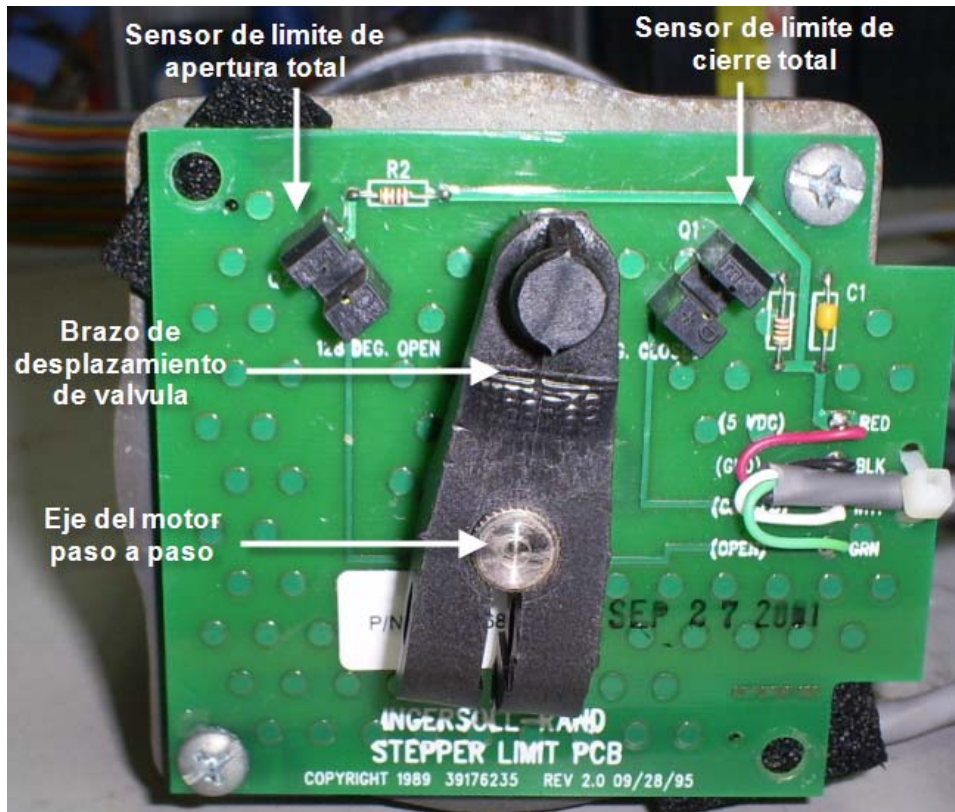


Figura 4.9 Tarjeta PCB para monitoreo de límites de apertura y cierre de la válvula de ingreso de aire.

Como se puede observar en la figura 4.9, el brazo de desplazamiento de la válvula de admisión debe mantenerse dentro del rango de movimiento marcado por los sensores de límite. Lo anterior para asegurar que no se presente una apertura mayor de la necesaria a la hora de cargar el compresor.

Capítulo 5. Solución implementada

5.1 Evaluación de alternativas

El análisis del compresor y sus partes descrito en el capítulo 4, contribuyó a identificar las señales a controlar para interactuar con los componentes del mismo.

Para desarrollar un sistema de control que cumpla con los requerimientos de funcionamiento del compresor, se propusieron dos alternativas: el desarrollo de un sistema de control electrónico, y el uso de un PLC para interactuar con las partes del compresor.

La primera opción propone el desarrollo de una tarjeta electrónica basada en microcontrolador y con la función de generar las señales necesarias para interactuar con las tarjetas de adquisición de datos e interfaz de potencia.

Para elaborar un sistema que se encargue de controlar estas dos tarjetas es necesario implementar dos etapas de comunicaciones. Una serial para la obtención de los datos de la tarjeta de adquisición de variables, y la otra para interactuar con la tarjeta de interfaz de potencia. La tarjeta a implementar además requiere de un módulo de procesamiento de datos obtenidos por los transductores. Adicional a esto, es necesaria la implementación una interfaz para que el usuario pueda configurar y controlar el sistema.

El diagrama de la figura 5.1 muestra cada uno de los bloques necesarios para interactuar con las dos tarjetas del compresor. Se tiene la etapa de comunicación serial que se encarga de obtener la información de la tarjeta de adquisición de variables. Esta etapa es controlada por el bloque de procesamiento de datos. Además se cuenta con un bloque que interactúa con la tarjeta de interfaz de potencia, haciendo que esta controle las partes del compresor y de esta manera se realice el funcionamiento del mismo.

La segunda alternativa planteada se basó en el uso de un PLC (*Programmable Logic Array*) para implementar el control del compresor. Con el desarrollo de esta opción, se propuso un sistema como el que se muestra en la figura 5.2, donde tanto los transductores, como las electroválvulas y

contactores del sistema pueden ser conectados directamente al PLC, siendo éste último quien controla todos los componentes del compresor.

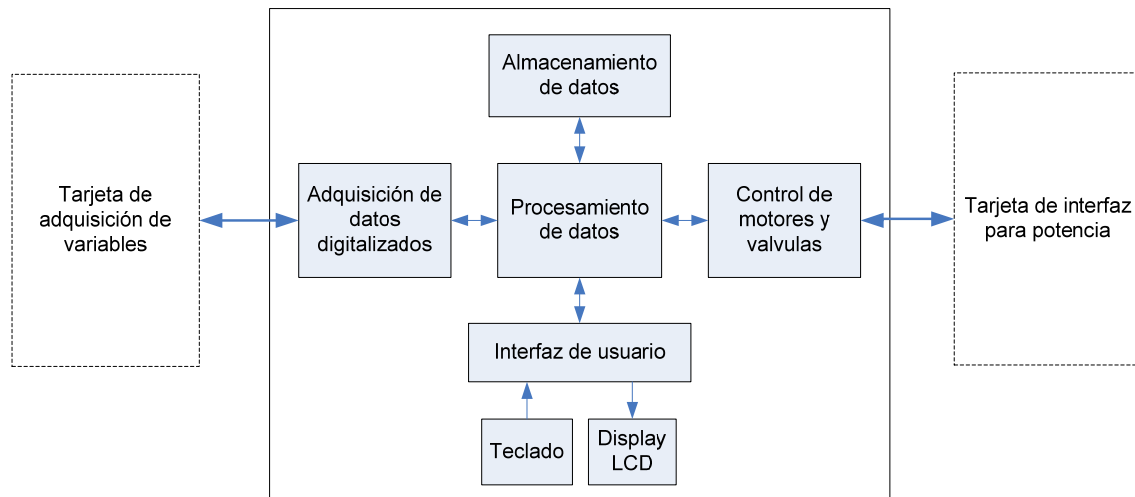


Figura 5.1 Diagrama de bloques de solución propuesta basada en sistema electrónico con en microcontrolador.



Figura 5.2 Diagrama de bloques de solución propuesta basada en control mediante PLC.

En esta opción el PLC sería el encargado de medir las variables en los transductores y controlar directamente los actuadores del compresor a partir de lógica programada.

Para determinar la mejor opción a implementar, se elaboró la tabla 5.1 donde se comparan las ventajas y desventajas de las dos soluciones propuestas.

Tomando en consideración el aspecto económico, la posibilidad de expansión del hardware y mejoras a largo plazo, se eligió implementar la primera opción utilizando un microcontrolador PIC18LF458 de Microchip debido a sus características, entre las que se tiene: arquitectura RISC (*“Reduced Instruction Set Computer”*) con 35 instrucciones de programación. Una

velocidad de operación de 20MHz, obteniendo una respuesta a corto plazo ante la activación interrupciones. Interrupciones externas en el puerto B. Posee hardware para comunicaciones mediante los protocolos I2C (Inter-Integrated Circuit) y RS-232. Es un microcontrolador de 40 pines, de los cuales 34 pueden ser utilizados como entradas o salidas. El espacio de memoria de programa es de 32 Kbytes, 1536 bytes de memoria RAM para datos y 256 bytes de datos tipo EEPROM [11]. Estas características lo hacen capaz de generar y controlar las señales necesarias para la operación del compresor.

Tabla 5.1 Comparación de ventajas y desventajas entre los sistemas propuestos.

Propuesta	Ventajas	Desventajas
Sistema controlador basado en Microcontrolador	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño reducido • Sistema capaz de ser ampliado • Adaptable a casi cualquier periférico • Alimentación de 5 Vcd. • Bajo en precio. • Gran eficiencia para procesar datos. • Velocidad de 20 MHz y más. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a ruidos eléctricos si no se protege adecuadamente • Se debe implementar todo el hardware para conexión con periféricos.
Sistema controlador basado en PLC	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema unificado y de fácil configuración • Tamaño reducido. • Compatibilidad con diferentes protocolos de comunicación. • Expansible mediante módulos externos. • Gran eficiencia para procesar datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precio elevado. • Los módulos de expansión son costosos.

5.2 Descripción del hardware

Los circuitos esquemáticos del hardware implementado se encuentran en el apéndice A.2. Este apartado hace referencia a estos apéndices para profundizar en la descripción de las señales utilizadas en cada una de las etapas de hardware desarrolladas.

5.2.1 Comunicación con la tarjeta de adquisición de datos

El bloque de obtención de datos de la tarjeta de adquisición de variables debe generar las señales necesarias para realizar la selección del sensor que se desea medir y además las señales de control que necesita el ADC para

digitalizar las señales medidas en los transductores. El diagrama de la figura 5.3 muestra las señales generadas para la comunicación con esta tarjeta.

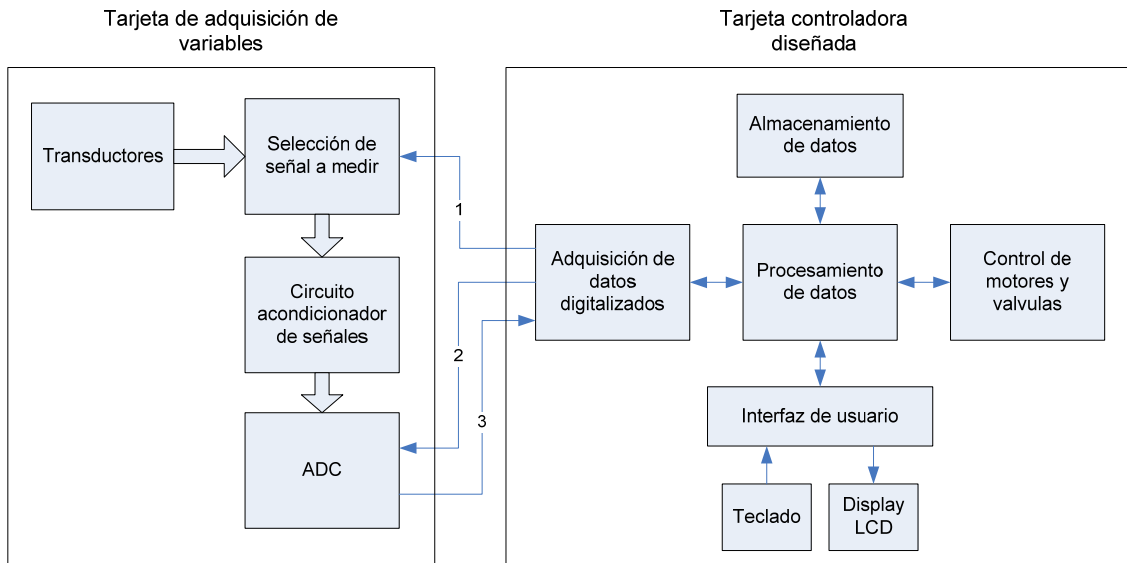


Figura 5.3 Diagrama de bloques de comunicación con tarjeta de adquisición de variables.

El proceso de digitalización de mediciones se inicia mediante la selección del transductor a medir. Luego, el bloque de adquisición de datos escribe una palabra de control en el ADC para iniciar la digitalización. Este proceso se explica en la sección 5.3.4.1.

Las líneas de la figura 5.3 que comunican la tarjeta de adquisición de variables y el sistema diseñado representan las señales utilizadas para lograr la comunicación entre ellas. La línea marcada como “1” denota una señal formada con tres bits para seleccionar entre los seis transductores del compresor. La línea denominada “2” representa dos señales utilizadas para interactuar con el ADC. Una de estas señales sincroniza la comunicación, mientras que la otra es utilizada para escribir las palabras de control. La línea marcada con “3” representa el medio por el cual se entrega el dato digitalizado al bloque de adquisición de datos. Tanto la lectura como la escritura de datos en el ADC se hacen sincronizadas con una señal de reloj generada en el bloque de adquisición de datos del sistema implementado. Para una mejor comprensión de la comunicación con el ADC, se recomienda consultar el anexo A.2.

Para realizar tanto las mediciones de la presión como la temperatura, se usaron los transductores que el compresor utiliza actualmente. Al no contar con

los datos técnicos respectivos fue necesario experimentar con los mismos para obtener su comportamiento.

Aprovechando el hardware implementado en esta etapa se procedió a conectar los transductores de presión y temperatura a la tarjeta de adquisición de variables. Se aplicaron presiones conocidas a los transductores y se midieron los datos mediante el bloque de adquisición de datos, de manera que fue posible obtener una serie de valores con los cuales se elaboró una gráfica experimental que describe el comportamiento de los transductores del compresor. Para obtener la gráfica experimental, las mediciones fueron repetidas varias veces para comprobar que en todos los casos, se obtenía un comportamiento similar. Con la gráfica de comportamiento de los sensores, se obtuvo una ecuación característica que a partir del dato obtenido mediante el ADC permite conocer el valor de presión correspondiente.

De igual manera se procedió para obtener el comportamiento de los sensores de temperatura. Los resultados obtenidos en ambos experimentos se pueden observar en el capítulo 6.

5.2.2 Comunicación con la tarjeta interfaz de potencia

La comunicación con esta tarjeta lleva a cabo el accionamiento de las partes del compresor para que este funcione adecuadamente. Para comunicar el sistema diseñado con esta tarjeta se utiliza el bloque de la figura 5.1 denominado “control del motores y válvulas”.

El bloque de procesamiento de datos genera las señales que esta etapa entregará a la tarjeta de interfaz de potencia para hacer que las partes explicadas en la sección 4.2.3 sean funcionales.

En la figura 4.7 se puede observar tres juegos de contactores: “1M”, “1S” y “2M”, cuyo estado se controla mediante el accionamiento de tres señales en la tarjeta de control. La tarjeta de potencia además se encarga de controlar dos señales que definen el estado de apertura y cierre de las válvulas “3SV” y “5SV”³.

³ Ver funcionamiento en sección 4.2.3.

La figura 5.4 muestra la conexión de la tarjeta desarrollada con la tarjeta de interfaz de potencia. La línea marcada con “4” está constituida por tres señales que son recibidas de los contactos auxiliares por el bloque de “control de motores y válvulas” del sistema diseñado.

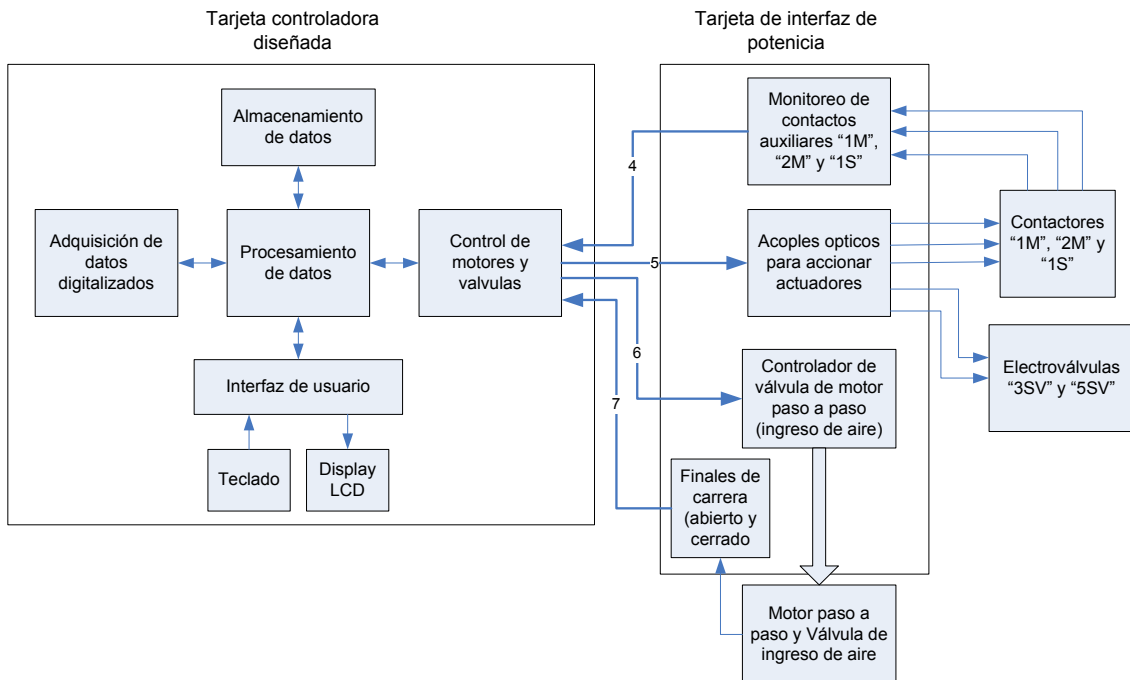


Figura 5.4 Diagrama de bloques de comunicación con tarjeta de interfaz de potencia.

El control de los tres contactores y dos electroválvulas se hace a partir de la línea marcada con “5”, que está constituido por cinco señales generadas por el bloque en cuestión.

Por otro lado, para controlar la apertura de la válvula de admisión de aire del compresor es necesario mover un motor paso a paso. El control de este motor se hace con dos señales eléctricas generadas en este bloque (ver “6” en figura 5.4). Las dos señales que manejan el controlador del motor paso a paso tienen las funciones de seleccionar el sentido de giro del motor, y generar la cantidad de pasos que se desea recorrer (mediante una señal de reloj). La figura 4.8 muestra el controlador de motor paso a paso utilizado, en el anexo B se adjunta hoja de datos. El circuito esquemático de esta etapa se puede ver en apéndice A.2.b.

5.2.3 Etapa de procesamiento de datos

Este bloque controla las mediciones de los transductores y el accionamiento de las partes del compresor mediante la interacción con las tarjetas de adquisición de variables e interfaz de potencia. Esta etapa se dividió en dos partes, una controla la interacción con las tarjetas de adquisición de datos e interfaz de potencia, mientras que la otra parte se encarga de controlar la interfaz con el usuario. En la figura 5.5 se muestra la subdivisión del bloque de procesamiento de datos.

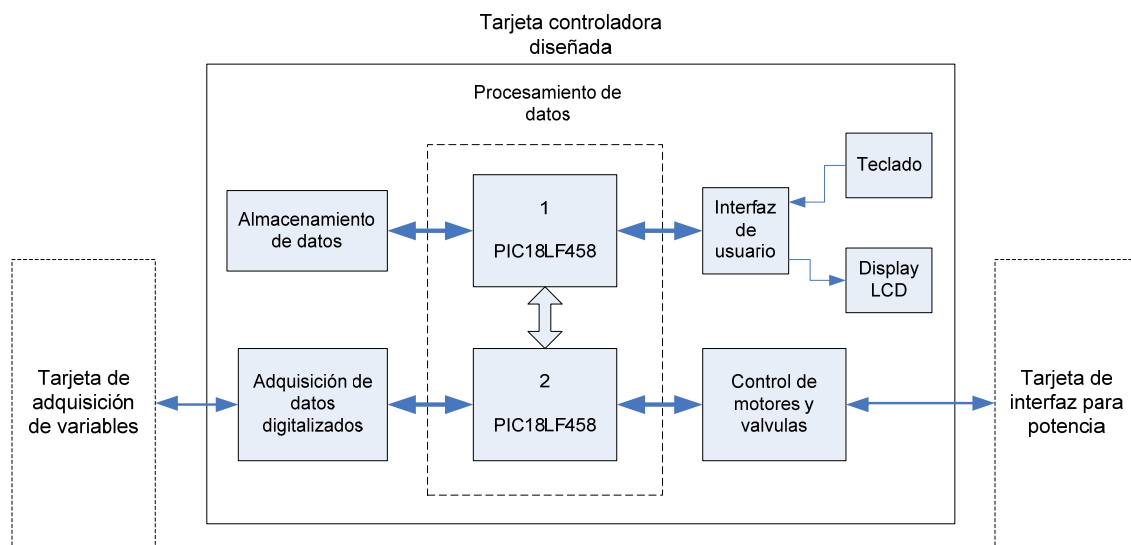


Figura 5.5 División de la etapa de procesamiento de datos.

El procesamiento de datos se hace mediante dos microcontroladores PIC18LF458, el primero se encarga de controlar el ingreso de datos por teclado y el despliegue de mensajes en el visualizador. Mientras que el segundo hace la comunicación con las tarjetas del compresor. El hardware implementado puede ser consultado en el apéndice A.2.

Los microcontroladores utilizados en este sistema cuentan con hardware de comunicaciones I²C, de manera que para comunicarlos entre sí se utilizó este protocolo. En la sección de descripción de software se explica la manera en que transfieren los datos. Esta comunicación fue implementada para que el microcontrolador principal pueda escribir comandos en el microcontrolador secundario. Además, el microcontrolador secundario indica su estado operacional para que el microcontrolador principal pueda actuar en función de él.

5.2.4 Interfaz con el usuario

Como se puede observar en el diagrama de la figura 5.5, la interfaz con el usuario se hace mediante un teclado y un visualizador LCD. El teclado utilizado es de tipo hexadecimal y el visualizador cuenta con 4 líneas de 16 caracteres cada una para el despliegue de mensajes.

La conexión del microcontrolador con el teclado hexadecimal se hizo mediante la utilización de un decodificador de teclado, quien mide las señales de los 8 pines del teclado y pone en su salida el valor hexadecimal correspondiente a la tecla presionada. Este decodificador tiene la ventaja de que genera una señal de interrupción cada vez que se presiona una tecla. Las señales producidas por este decodificador fueron conectadas al PIC 1 y mediante el software desarrollado se puede determinar cada vez que se presiona una tecla.

Por otro lado, para realizar la conexión del visualizador LCD con el PIC 1 no fue necesario agregar hardware adicional, por lo que se implementó una conexión directa utilizando los puertos D y E del mismo para realizar la escritura de datos y control respectivamente. La figura 5.6 muestra el hardware implementado para realizar la conexión de estos dos periféricos al microcontrolador principal.

Los esquemáticos de los circuitos implementados para cada una de las etapas se encuentran en el apéndice A.2 donde además se explican las señales de control utilizadas.

La figura 5.7 muestra una imagen del hardware implementado. En ella se pueden observar los componentes utilizados, entre los cuales sobresalen dos microcontroladores PIC18LF458, un decodificador de teclado MMC74C922N, tres transceptores SN76175, un reloj en tiempo real, acoples ópticos y resistencias, además de los conectores que comunican con las tarjeta de adquisición de variables e interfaz de potencia. Se muestra además el visualizador LCD y el teclado utilizado para interactuar con el sistema.

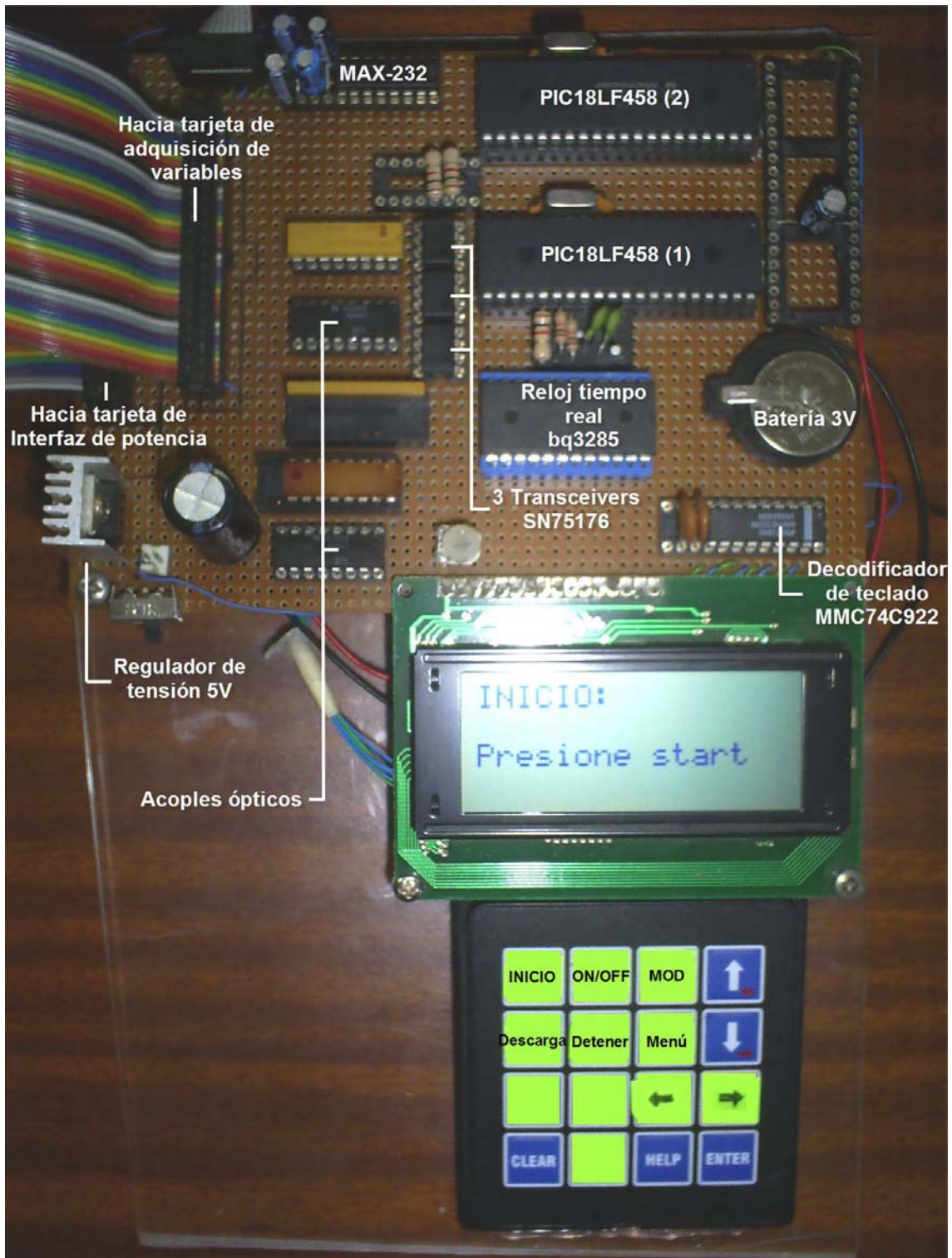


Figura 5.7 Hardware implementado.

5.3 Descripción del software

Se diseñaron rutinas de software encargadas de controlar el funcionamiento del hardware implementado. Debido a que el hardware de control fue desarrollado haciendo uso de dos microcontroladores, se describirán los programas de cada uno de ellos por separado.

5.3.1 Microcontrolador principal

Este microcontrolador controla el funcionamiento de los periféricos de interfaz con el usuario por lo que es quien responde a las órdenes ingresadas por medio del teclado, muestra los mensajes en el LCD y se comunica con el microcontrolador secundario para darle ordenes y monitorear el estado del sistema. Para la interacción con los periféricos, se tienen diferentes rutinas de control.

5.3.1.1 Teclado

Para leer los datos del teclado se habilitó una interrupción externa del PIC que indica el instante en que se presiona una tecla. Cada vez que se presenta esta interrupción, se ejecuta un procedimiento estándar que se encarga de leer la salida del decodificador de teclado para obtener el dato correspondiente a la tecla presionada. El decodificador de teclado se encuentra conectado al *byte* bajo del puerto C del microcontrolador principal. El diagrama de la figura 5.8 muestra el servicio de interrupción que se ejecuta al presionar una tecla. En el apéndice A.2.1 se muestra el diagrama esquemático del hardware implementado.

Al presionar una tecla, el decodificador genera una señal que es utilizada para activar la interrupción externa del PIC. Se lee el puerto C y el valor leído es desplazarlo cuatro bits a la izquierda y luego cuatro bits a la derecha de obtener como resultado el valor hexadecimal (valor decimal entre “0” y “15”) correspondiente a la tecla presionada, que es almacenado en una variable.

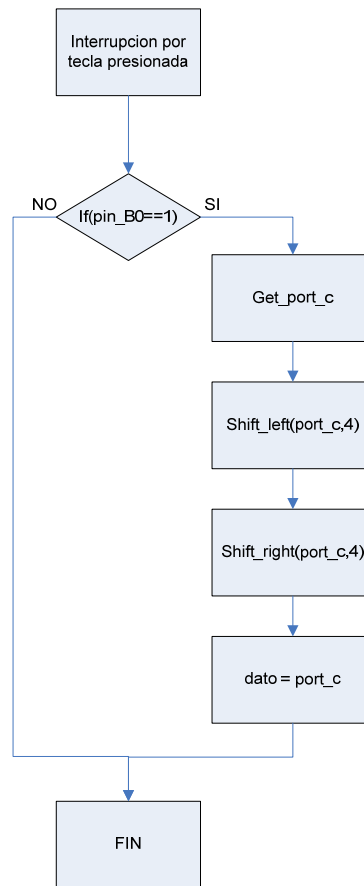


Figura 5.8 Diagrama de flujo de interrupción por teclado.

5.3.1.2 Conexión con reloj en tiempo real (RTC)

Se implementó una rutina de software para controlar un reloj en tiempo real (RTC) BQ3285EP. Esta rutina fue desarrollada con el fin de dejar el sistema listo para en un futuro agregar la opción de crear un historial de eventos del compresor. El RTC utilizado permite realizar tanto lecturas como escrituras en sus registros internos. Las lecturas se hacen para obtener los datos de tiempo, mientras que las escrituras configuran estos valores.

La lectura de un registro del RTC se hace mediante una rutina en la que se entrega como argumento la dirección del registro que se desea leer. El diagrama de la figura 5.9 muestra la realización de una lectura.

La señal RTC_DS (“Data Strobe”) es utilizada para indicarle al RTC que puede realizar el control del ciclo de transferencia de datos. La señal RTC_RW es la que determina la transferencia de datos (lectura o escritura) un valor de cero en esta señal hace una transferencia de lectura, mientras que un valor de

uno lógico significa una transferencia de escritura. La señal RTC_CS es la encargada de seleccionar el dispositivo para que se de la comunicación con el mismo.

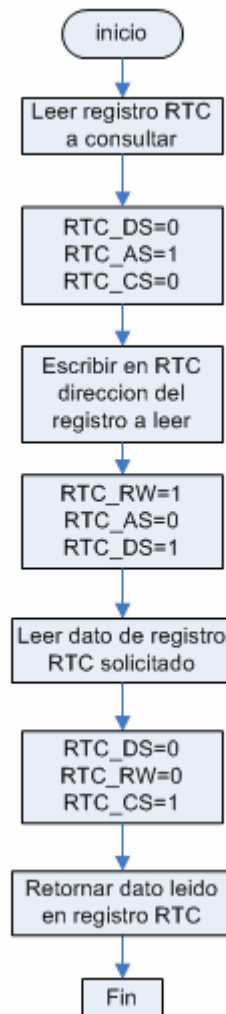


Figura 5.9 Diagrama de flujo de la rutina utilizada para la lectura de los registros del RTC.

La escritura del RTC se realiza siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la figura 5.10. Una vez que se escribe el dato en la dirección de memoria deseada, se restablecen las señales del RCT para que este quede en modo de espera por otro proceso.

Es posible modificar el valor de los registros del RTC para ajustar los datos de fecha y hora. Esto es útil para implementar una rutina que elabore un historial de los eventos ocurridos en el compresor.

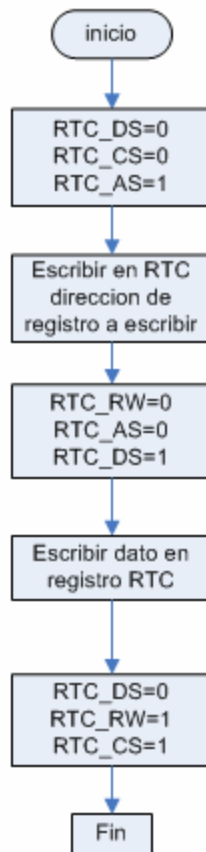


Figura 5.10 Diagrama de flujo de la rutina utilizada para escribir en los registros del RTC BQ3285EP.

5.3.1.3 Menú

A partir de las rutinas de control del LCD y el teclado se desarrolló una interfaz con el usuario que se basa en un menú donde el usuario puede escoger entre diferentes opciones.

El menú diseñado es dinámico ya que se controla por la acción del teclado (consultar los botones en figura 5.7). El teclado utilizado en este sistema cuenta con 16 teclas, 4 de las cuales son flechas (arriba, abajo), otra tecla esta marcada como “ENTER”. La forma seleccionar entre las opciones de este menú es con la acción de las flechas “arriba” y “abajo” para movilizar el menú, mientras que la tecla “ENTER” es la encargada de entrar a la opción seleccionada. Existe además una tecla marcada como “CLEAR” a la cual se le dio la función de salir de la función o submenú que se haya seleccionado previamente.

En el diagrama de la figura 5.11 se muestra la manera en que funciona el menú de programa.

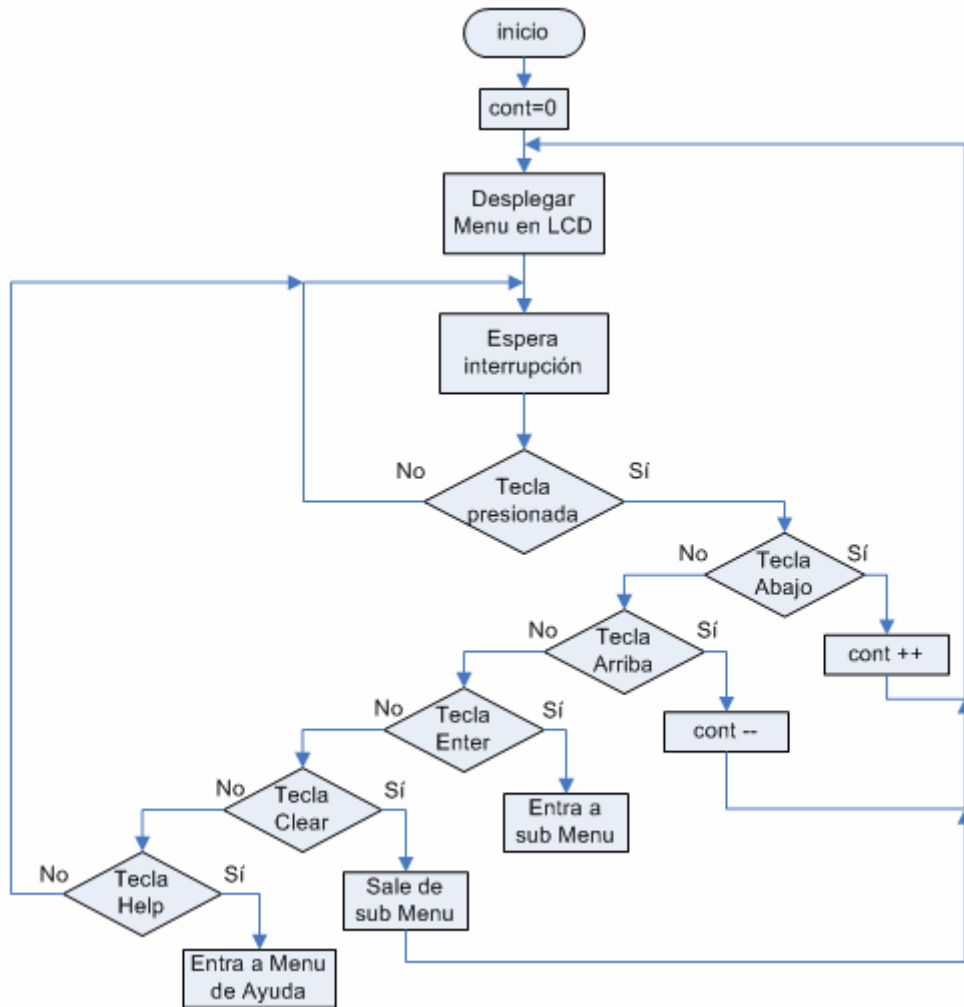


Figura 5.11 Diagrama de flujo de la rutina utilizada para mostrar el menú de opciones de programa en el visualizador LCD.

Los mensajes del menú se encuentran almacenados en un arreglo de posiciones en memoria ROM. Para mostrar los mensajes, el menú depende de una variable llamada de tipo entero llamada “cont”, su valor es inicializado en cero al iniciar el programa. Esta rutina lee el valor de “cont” para mostrar la opción de menú que corresponda. Por ejemplo, si cont=0 en el LCD se muestra el mensaje almacenado en la primera posición del arreglo. La función de las flechas “arriba” y “abajo” del teclado en esta parte del programa es la de incrementar o decrementar el valor de “cont” para cambiar entre los mensajes del menú. De manera que al presionar una de las flechas (arriba o abajo) el menú se actualiza y se muestra la opción seleccionada. Las flechas son utilizadas para la selección de las diferentes opciones en este menú.

La tecla “ENTER” funciona para seleccionar la opción del menú que se esté mostrando en el LCD. Al presionar esta tecla cuando se mantenga seleccionada determinada opción del menú, se ejecutará la función programada para esa opción.

Funciones del menú:

Las opciones programadas en este menú son:

- Mostrar valores de presión del compresor.
- Mostrar valores de temperatura del compresor.
- Configurar valor mínimo de presión de línea.
- Configurar valor máximo de presión de línea.
- Configurar fecha y hora del sistema.

Se implementó una rutina para desplegar los datos medidos en los sensores de temperatura y presión.

5.3.1.4 Mostrar datos medidos en transductores

La rutina encargada de desplegar en el LCD los datos medidos en los transductores se muestra en la figura 5.12. Esta rutina obtiene los datos que han sido medidos de los transductores por el microcontrolador secundario. Luego evalúa la opción del menú seleccionada que puede ser “Mostrar Presión” o “Mostrar Temperatura”. Dependiendo de la opción seleccionada se procede a aplicar la ecuación correspondiente para convertir los datos. Las ecuaciones aplicadas para el despliegue de datos se muestran en el capítulo 6. Una vez aplicada la ecuación al dato, se procede a mostrarlo en el LCD.

Cada vez que se va a mostrar un dato de presión o temperatura en el LCD se debe realizar la medición, convertir el dato de binario a decimal, luego se aplica la ecuación que corresponda para representar el valor medido y finalmente se envía el dato al LCD para ser desplegado.

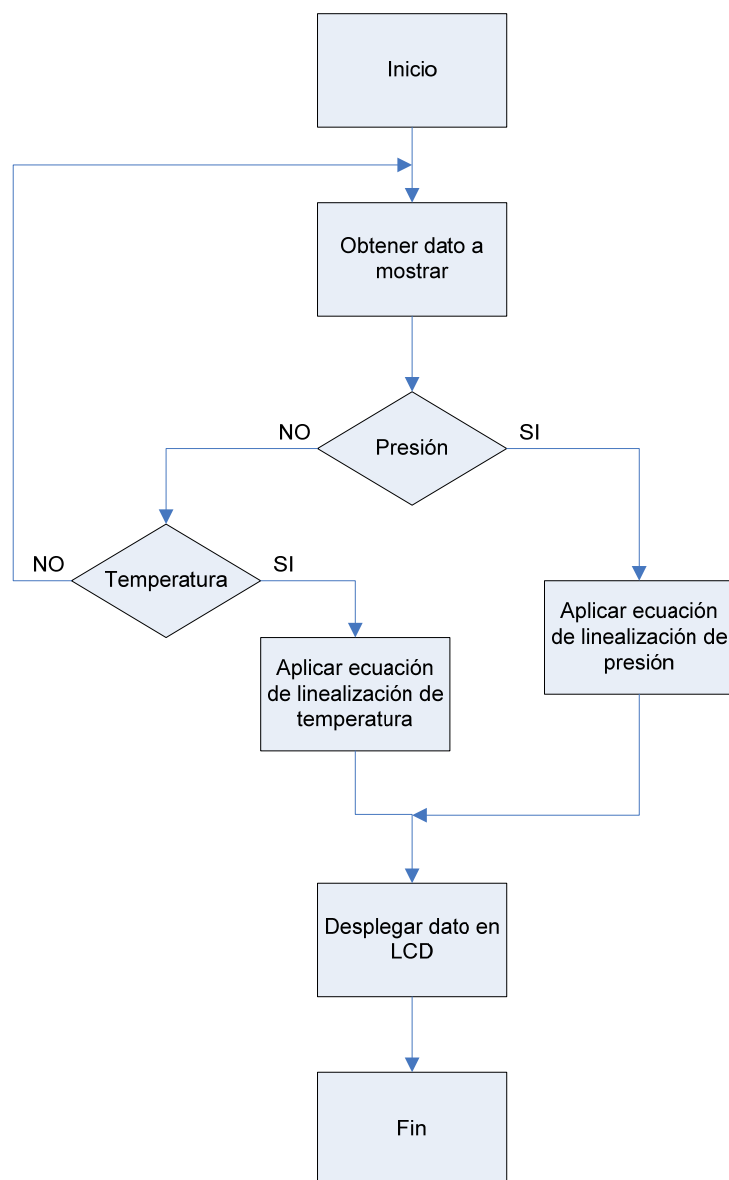


Figura 5.12 Diagrama de flujo de rutina para despliegue de datos medidos en LCD.

5.3.1.5 Configuración de presión mínima y máxima de operación

El usuario puede configurar los límites en los que se requiere la producción de aire, para lo cual se utilizan los *bytes* “MIN PRES” y “MAX PRES”. En el *byte* 17 (“MIN PRES”) se almacena el valor requerido de presión de línea a la cual se desea mantener operando el sistema, mientras que el *byte* 18 (“MAX PRES”) es utilizado para almacenar el valor máximo que se requiere para la presión de línea.

Las presiones mínima y máxima corresponden a los valores límite en los cuales el compresor determina entrar a carga o descarga. Para configurar

estos valores se desarrolló una rutina encargada de aceptar los valores que el usuario desee configurar.

En la figura 5.13 se muestra el diagrama de la rutina utilizada para ingresar el valor mínimo de presión. Esta rutina carga el valor que tiene en memoria como presión mínima. Luego espera a que se presione ya sea la tecla de arriba o abajo para modificar el valor. Una vez que se seleccionó el valor deseado se espera a que la tecla "Enter" sea presionada para proceder a guardar el dato en memoria.

Para modificar el valor máximo de la presión se procede de la misma manera, pero con la diferencia de que el dato cargado y modificado es el de presión máxima

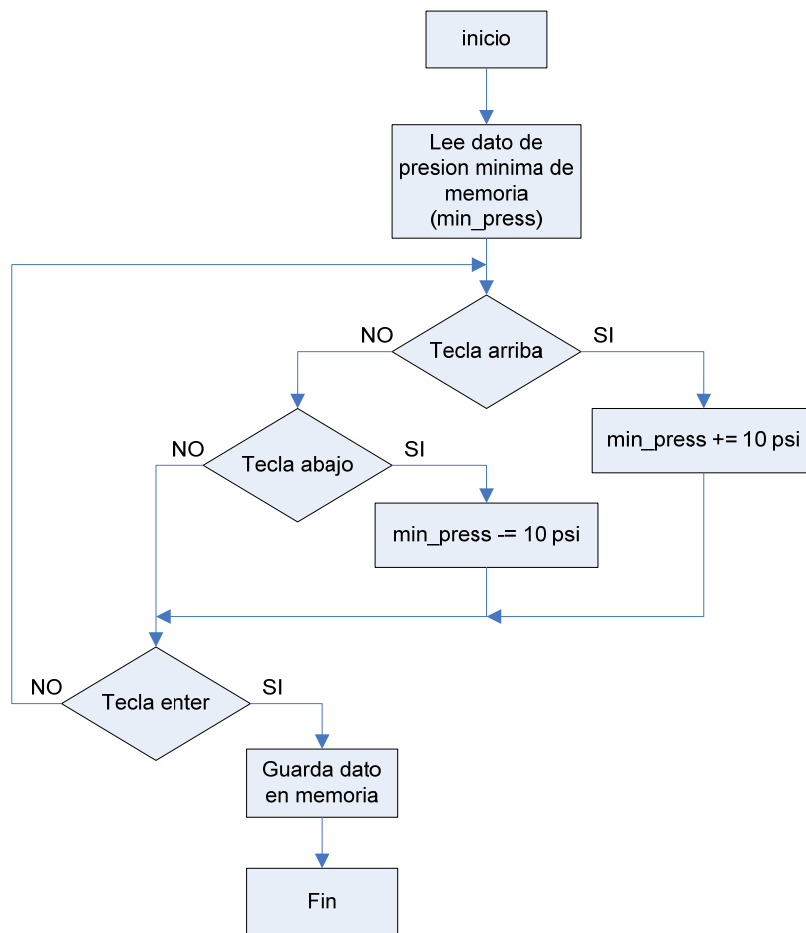


Figura 5.13 Diagrama de rutina par configuración de presión mínima de línea.

5.3.1.6 Operación del compresor

Para poner en funcionamiento el sistema se utilizan las teclas designadas para cada función del compresor, estas teclas son denominadas: “Inicio”, “ON/OFF”, “MOD”, “Descarga”, “Detener” y “Menú” (ver figura 5.7).

La figura 5.14 muestra el diagrama de flujo de las funciones a realizar con la acción de cada una de las teclas de operación del compresor. Al ser el microcontrolador secundario (PIC 2) quien está en contacto con la tarjeta de interfaz de potencia y tener el control sobre el compresor, siempre es monitoreado por el PIC 1 para verificar el estado operacional. Es de esta manera que se conoce el estado en que se encuentra el sistema para decidir si es posible ejecutar o no un comando.

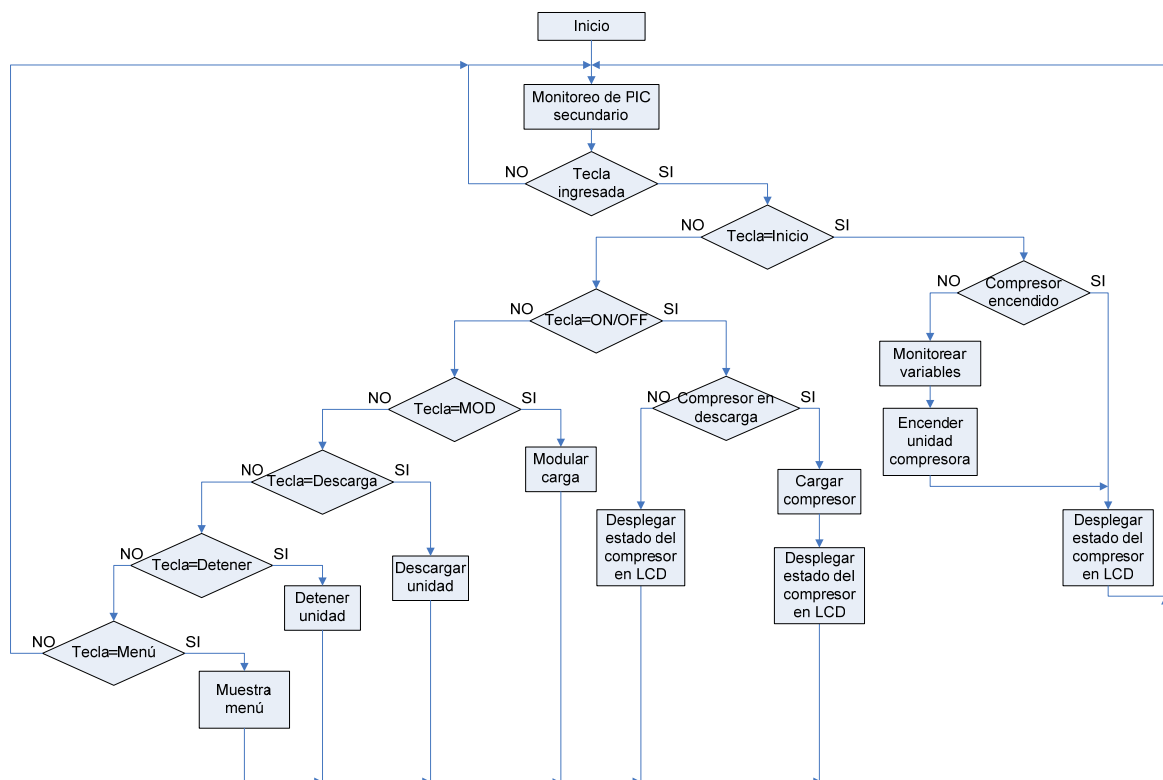


Figura 5.14 Diagrama de flujo de rutina para ingreso de comandos al compresor.

5.3.2 Comunicación con PIC secundario mediante I2C

Para llevar a cabo la comunicación con el PIC secundario se implementó una rutina que controla el hardware de comunicaciones I2C de los microcontroladores. La comunicación entre los microcontroladores se lleva a cabo mediante la lectura y escritura de un registro de estado. Este registro está

declarado en un espacio de memoria de 32 bytes dentro del PIC secundario, y puede recibir tanto lecturas como escrituras por parte del PIC principal.

El diagrama de la figura 5.15 muestra los primeros dieciséis *bytes* utilizados en este registro de estado, mientras que la figura 5.16 muestra los siguientes dieciséis *bytes* utilizados.

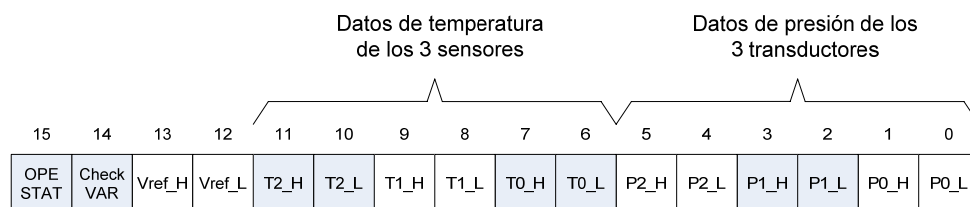


Figura 5.15 Parte baja del registro de control y estado del sistema.

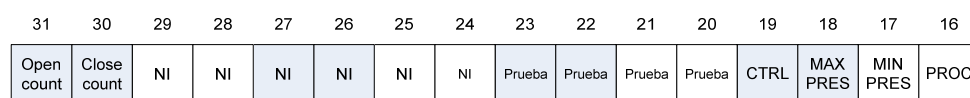


Figura 5.16 Parte alta del registro de control y estado del sistema.

Los datos de presión medidos en los transductores son almacenados en los primeros seis *bytes* de este registro, y los datos de temperatura son almacenados en los *bytes* que van desde el seis hasta el once de la figura 5.15. El *byte* llamado “Check VAR” se utiliza para monitorear el estado del sistema en condiciones iniciales, de forma que el PIC secundario escribe en él cada vez que verifica el sistema y a partir de éste se pueda determinar si se tiene algún problema con cualquiera de los sensores o partes del sistema.

El *byte* “OPE STAT” es escrito por el PIC secundario y en él se indica el estado de la unidad compresora, de forma que se puede determinar si en ese momento se puede iniciar la operación de la misma.

Mediante el *byte* 16 (“PROC” en figura 5.16) el microcontrolador principal monitorea el estado operacional en que se encuentra el compresor. De este modo se conoce si la unidad se encuentra apagada, encendida, cargando o descargando. Si se encuentra en alguno de estos modos y se presenta algún tipo de error o problema de operación, el PIC secundario escribe el indicador del problema detectado. El *byte* “PROC” es el medio por el cual la rutina descrita en el apartado 5.3.1.5 evalúa el estado del compresor. El diagrama de la figura 5.17 muestra los valores específicos leídos por el microcontrolador

principal para determinar el estado del compresor. El programa del microcontrolador principal se encuentra dentro de un ciclo infinito realizando lecturas del registro “PROC” para indicar al usuario el estado operacional del sistema. Si se detecta alguna falla en la comprobación del compresor, es por medio de este *byte* que el microcontrolador principal se actualiza y muestra el mensaje respectivo en el LCD.

Cuando se presiona alguna de las teclas de control (descritas en sección 5.3.1.5), el microcontrolador principal evalúa el estado del compresor (“PROC”) y luego escribe en el *byte* denominado “CTRL” (*byte* 19, ver figura 5.15) un caracter identificador que le dice al PIC secundario que acción se desea realice el compresor.

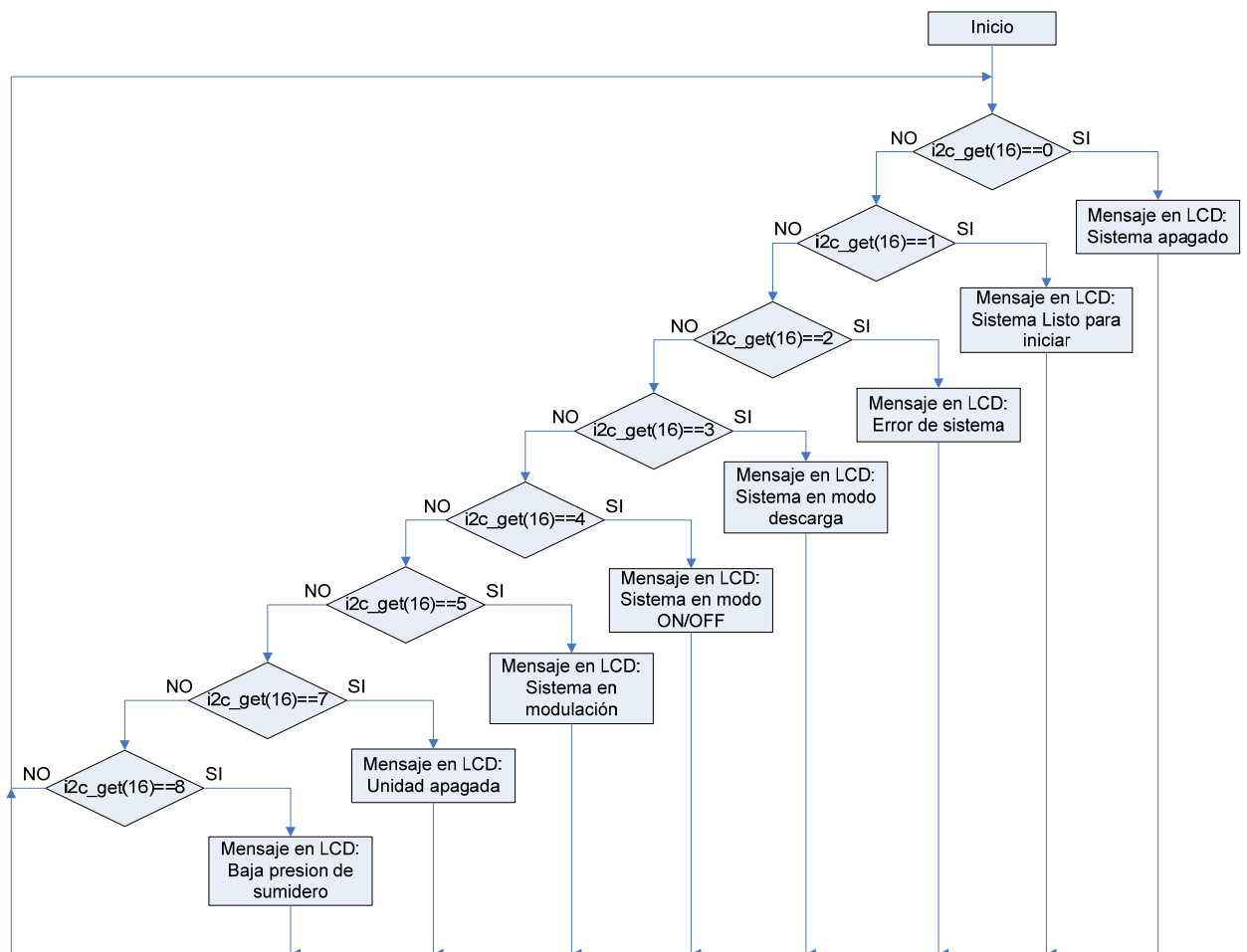


Figura 5.17 Diagrama de bloques de rutina para lectura de estado de PIC secundario.

El diagrama mostrado en la figura 5.18 muestra la manera en que se escriben los comandos de operación del compresor por parte del

microcontrolador principal. Para llevar a cabo las funciones descritas en el diagrama de la figura 5.14, el microcontrolador principal (PIC 1) escribe los caracteres mostrados en la figura 5.18, de manera que el PIC 2 interprete el caracter leído y así ejecute la función de control del compresor correspondiente al comando ingresado. Cada vez que se presiona una tecla, el PIC 1 escribe un caracter en el *byte* “CTRL” del registro de estado, lo cual le indica al PIC 2 que se tiene una solicitud para cambiar el estado operacional del compresor.

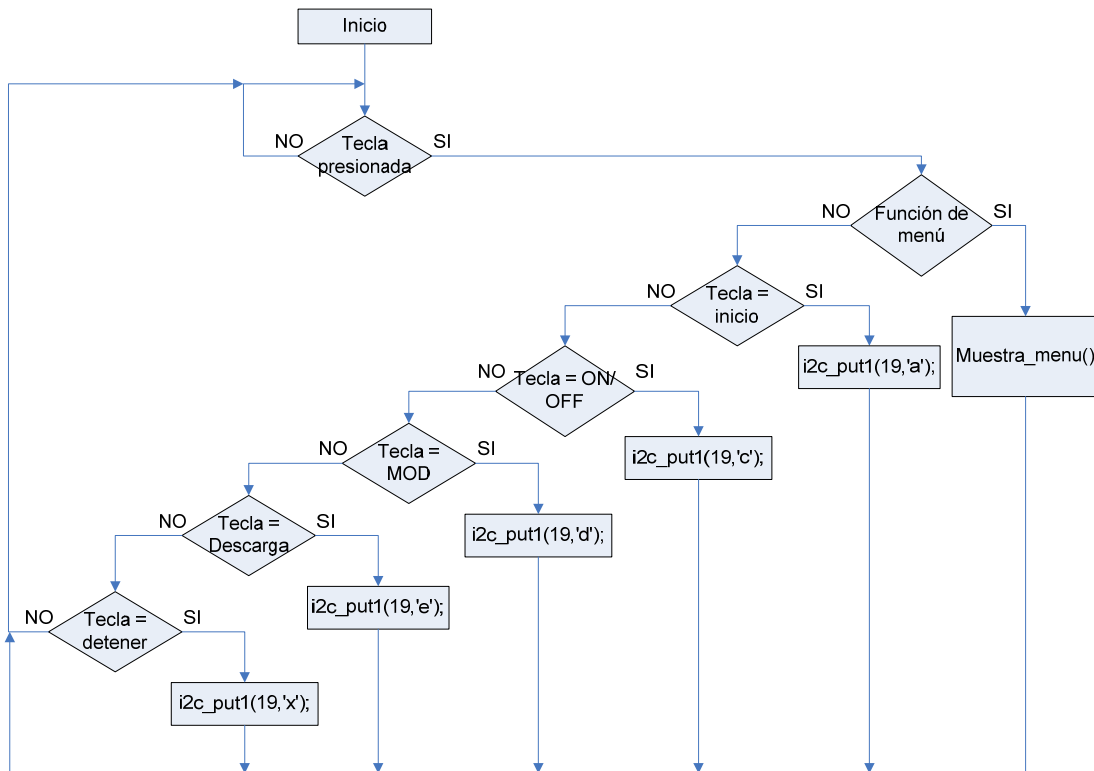


Figura 5.18 Diagrama de bloques de rutina para escritura de comandos para PIC secundario.

5.3.3 Comunicación con PC mediante el protocolo RS-232

Como un medio de verificación de estado de las variables del compresor y para corroborar que las señales se estaban generando, se escribió una rutina encargada de mostrar los valores del registro de estado del sistema implementado a través del hardware para comunicaciones con la PC (ver hardware en figura A.2.5). Para desplegar los datos en la computadora, se utilizó uno de los botones del teclado. Cada vez que se presionaba dicho botón, el microcontrolador principal lee el registro de estado e imprime los valores de cada *byte* en pantalla.

5.3.4 Microcontrolador secundario

Las funciones de este microcontrolador son:

- Medición de las señales de los transductores.
- Controlar la válvula de ingreso de aire.
- Arranque de los motores del compresor.
- Control de la válvula de descarga.
- Medición de las señales de control del compresor.

Para realizar estas funciones el microcontrolador secundario ejecuta una rutina de control que se encarga además de monitorear si se ha ingresado alguna orden por parte del microcontrolador principal. En la figura 5.19 se muestra el diagrama de flujo del software implementado para el control del PIC secundario.

Este PIC se encarga de llevar a cabo la ejecución de los comandos y control de las tarjetas de adquisición de variables e de interfaz de potencia. Con las figuras 5.15 y 5.16 se explicó la forma en que los dos microcontroladores se comunican entre sí a través del uso de un registro de lectura y escritura compartido entre ambos. De esta manera el microcontrolador secundario puede operar en función del principal y viceversa.

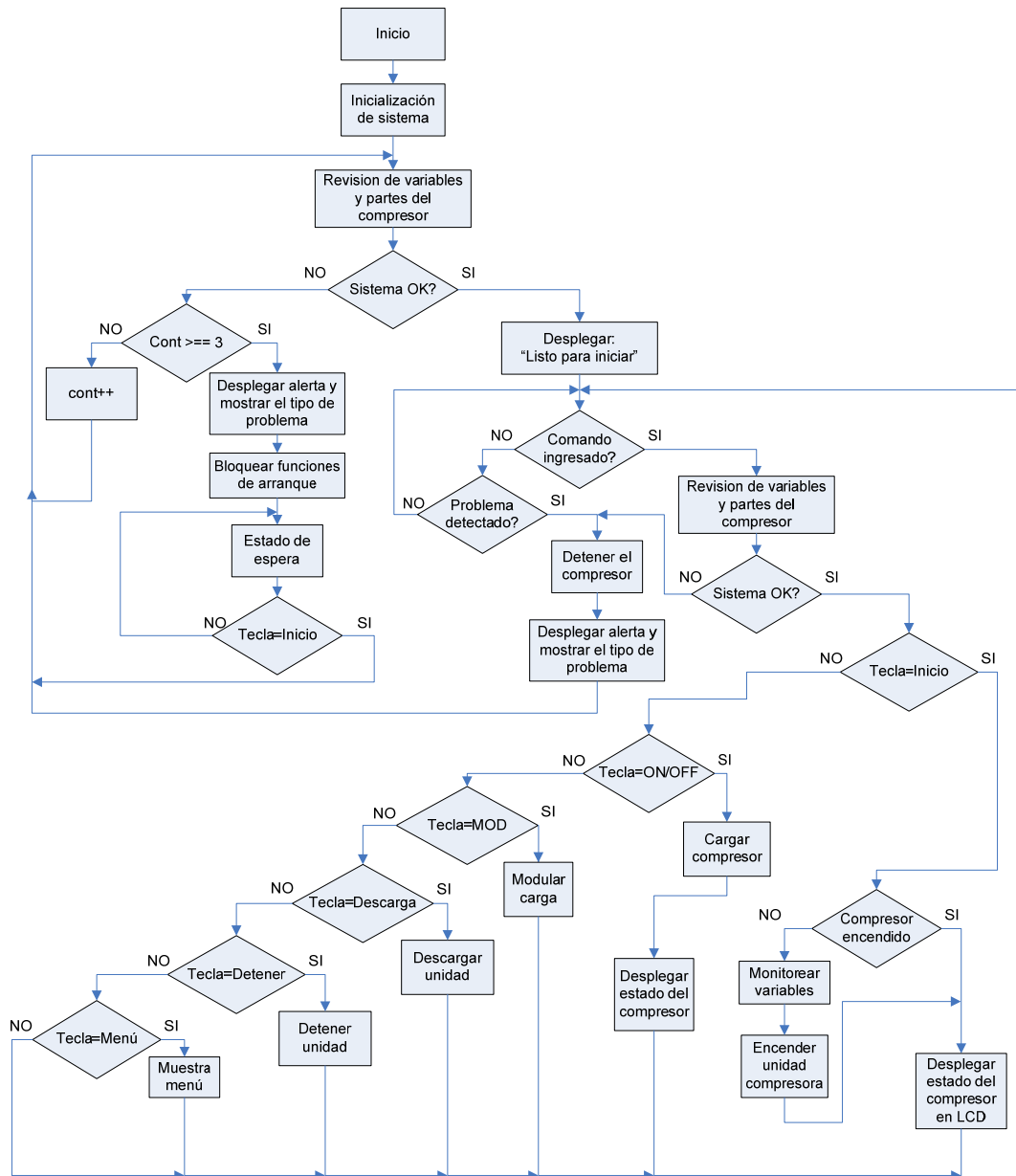


Figura 5.19 Diagrama de bloques de programa para control de microcontrolador secundario.

Para poner en funcionamiento el compresor, este microcontrolador se comunica con las tarjetas de adquisición de variables para obtener las mediciones de los transductores, y la de interfaz de potencia para poder accionar los actuadores del sistema.

5.3.4.1 Rutina para adquisición de variables

La comunicación con la tarjeta de adquisición de variables requirió de la implementación de una rutina de control para escribir y leer un convertidor analógico a digital. La figura 5.20 muestra el diagrama de flujo de la rutina implementada para llevar a cabo dicha comunicación.

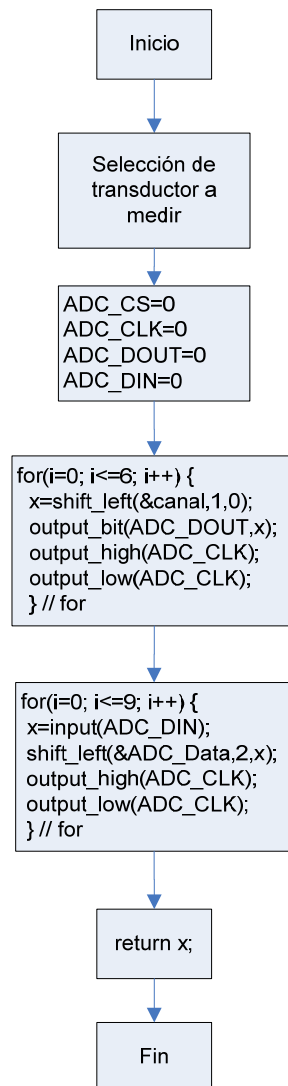


Figura 5.20 Diagrama de flujo de rutina para obtención de datos digitales del ADC.

La rutina desarrollada para hacer la lectura de las variables en los transductores recibe como argumento el sensor que se desea medir y el canal del ADC en que se encuentra conectado el mismo. El primer paso en ésta rutina es seleccionar el sensor a medir. Luego se selecciona el ADC y se inicializan las variables involucradas en el proceso. Después se escribe la palabra de control serie para este dispositivo. La palabra de control para este ADC consta de siete bits (consultar apéndice A.2). Una vez ingresada la palabra de control, se procede a leer el dato digitalizado por el ADC. Este dato tiene un tamaño de diez bits y cada uno de ellos es almacenado en la variable 'x' que al término de esta rutina es regresada como el valor medido del sensor seleccionado.

Al igual que el microcontrolador principal, el PIC secundario se encuentra ejecutando una rutina que contiene un ciclo infinito, de manera que

cada vez que se inicia este ciclo, se hace una llamada a la rutina de adquisición de datos para obtener el valor de presión y temperatura medido en cada uno de los transductores y de esta manera mantiene el registro de estado siempre actualizado.

5.3.4.2 Etapa de potencia

5.3.4.2.1 Control y verificación de válvula de ingreso

El control del compresor se lleva a cabo a partir de la comunicación con la tarjeta de interfaz de potencia. En esta tarjeta se controla la apertura de la válvula de ingreso de aire, los contactores de arranque del compresor y se monitorea el estado de estos.

Para controlar la válvula de ingreso se tiene actuar sobre un motor paso a paso que lleva a cabo su movimiento. La figura 5.21 muestra el diagrama de flujo utilizado para desarrollar el software de control de este motor. El control de este motor es simple, ya que solamente es necesario generar una señal que define el sentido de giro del motor. Para hacer que se recorra un paso en el sentido seleccionado basta con hacer una transición de alto a bajo en la señal de reloj del controlador de este motor (véase hoja de datos en anexo A)

Una vez que se obtuvo esta rutina, se implementó una rutina de verificación para esta válvula mediante la activación de los interruptores de límite de apertura y cierre. Esta rutina es utilizada únicamente para verificar el estado de la válvula, por lo que se ejecuta en la parte donde se revisa el estado del sistema en condiciones iniciales. La figura 5.22 muestra el diagrama de flujo, donde inicialmente se realiza un paso a la derecha (apertura), se comprueba si el sensor de límite ha sido activado. Caso contrario, se realiza otro paso a la derecha. Hasta el momento en que se detecte activo este sensor se procederá a realizar el giro del motor hacia la izquierda (cierre), monitoreando en este caso el sensor de válvula cerrada.

La rutina descrita en la figura 5.22 toma como punto de referencia dos sensores de límite que indican cuando esta se encuentra totalmente abierta y totalmente cerrada. Cuando esta rutina es ejecutada se prueba el estado del motor, de manera que se inicia un contador de pasos para verificar que el motor no se quede en un ciclo infinito. La condición de salida de la ejecución de

pasos es ya sea activar el sensor de final de carrera, o llegar al límite máximo de pasos permitidos, que en este caso es cien (100), lo cual equivale aproximadamente a noventa grados (90°). En el caso de que el contador llegue a su límite sin activar el final de carrera, se escribirá una alerta en el registro de estado. Pero en el caso de que se active el sensor de posición de la válvula sin haber excedido el límite, el proceso continúa para comprobar ahora el límite del sensor de posición totalmente cerrado de la válvula.

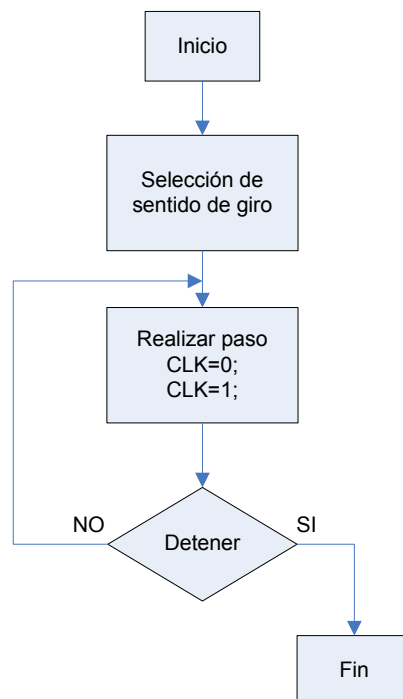


Figura 5.21 Diagrama de flujo de rutina para control de motor paso a paso.

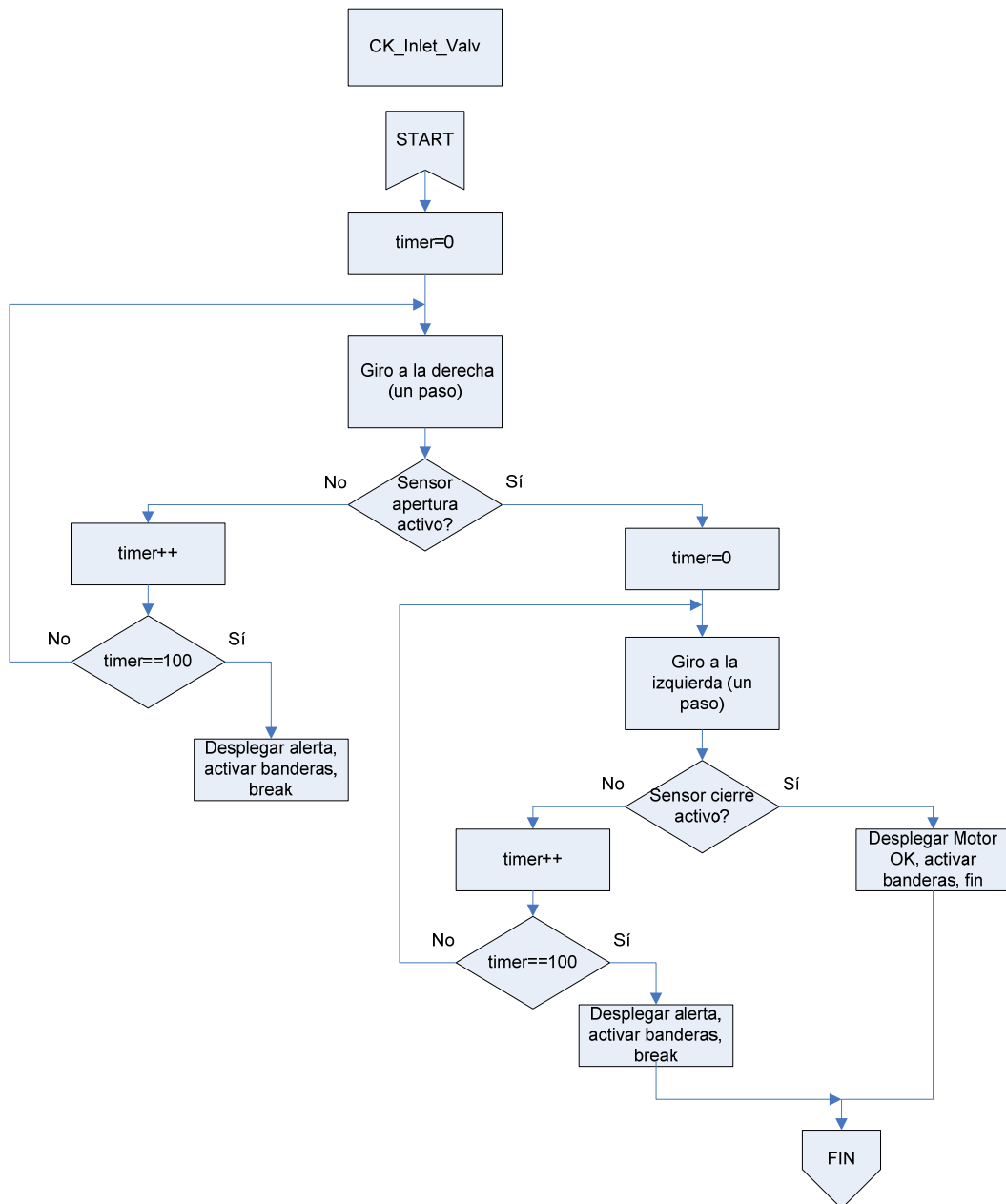


Figura 5.22 Diagrama de flujo de rutina para revisión de apertura y cierre de la válvula de ingreso.

5.3.4.2.2 Arranque de unidad compresora

Para realizar el arranque de la unidad compresora, el PIC secundario debe controlar las señales que cierran los contactos que suministran la potencia al motor principal del compresor.

En el arranque del motor de la unidad compresora, se considera el sentido de giro del mismo. Al no contar con un sensor para verificar el sentido de giro, se aprovecha el efecto causado en la presión de entrada. El diagrama

de la figura 5.23 muestra el proceso seguido para verificar el giro del motor de la unidad compresora.

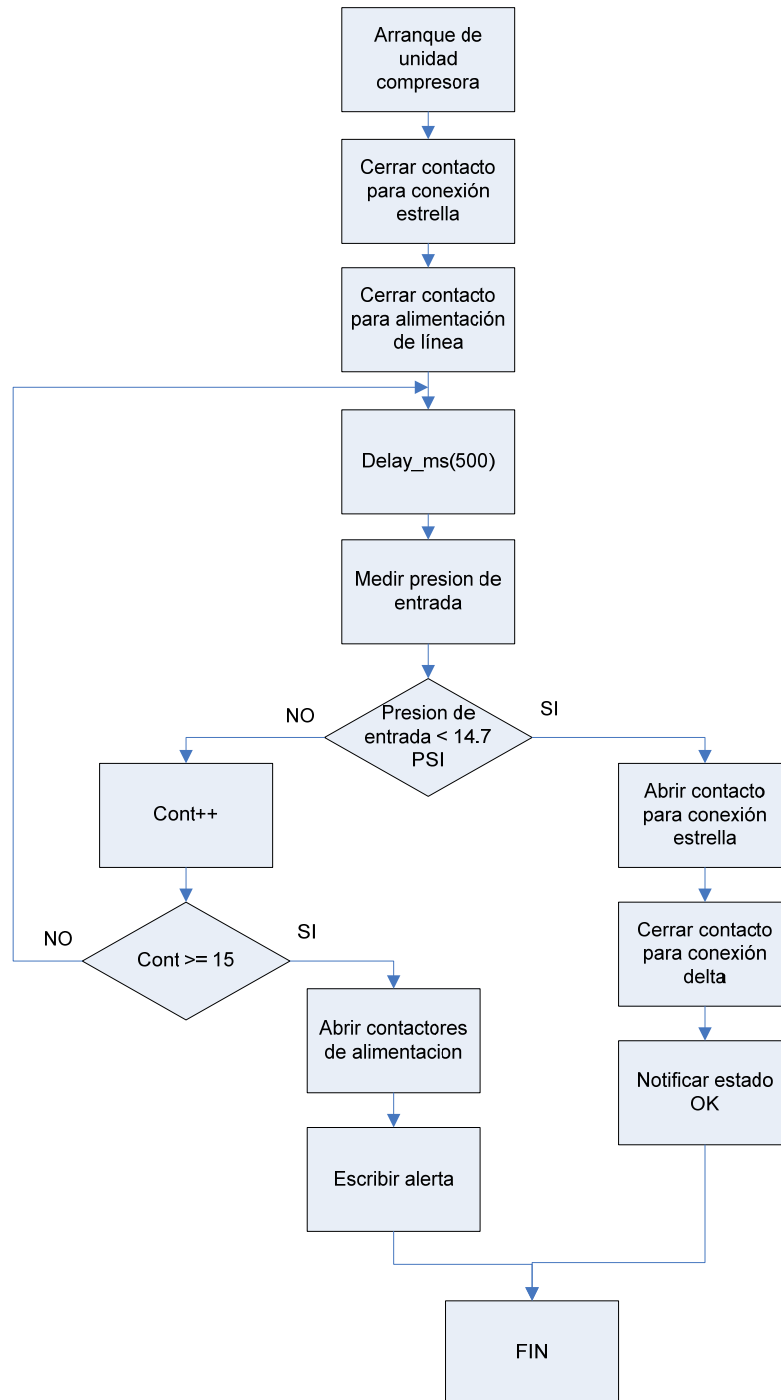


Figura 5.23 Diagrama de flujo de proceso de arranque del motor principal.

En este proceso inicialmente se realiza la conexión de la configuración en estrella del motor de la unidad compresora, seguidamente se hace la conexión de línea para alimentarlo. Con el arranque del motor se empieza a monitorear la presión de entrada. Si esta llega a ser menor que el valor 14.7

psi, se hace la configuración delta y se notifica que el sistema gira en el sentido correcto. Pero si la presión de entrada no llega a ser menor que el valor mencionado, el motor se apagará y se registra un error llamado: “Vacío alto de admisión”.

5.3.4.2.3 Modo de operación: “ON/OFF”

La figura 5.24 muestra el diagrama de flujo que sigue este modo de operación. Inicialmente se efectúa la revisión de variables y se evalúa si ha ocurrido algún desperfecto. Si es así, el programa apaga el compresor y sale de la rutina de operación. En caso contrario, revisa la presión de línea para evaluar si es necesario cargar o descargar.

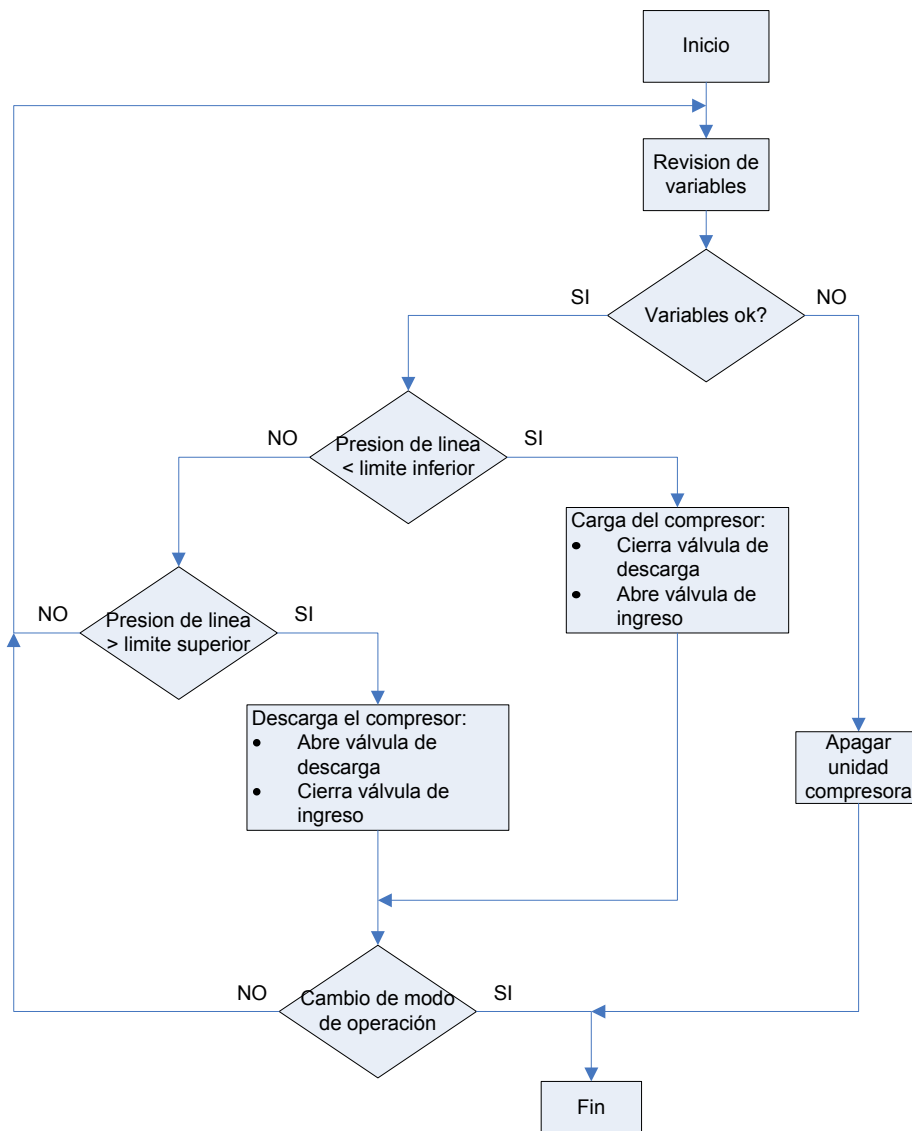


Figura 5.24 Diagrama de flujo de operación en modo “ON/OFF”.

Si se efectúa un cambio de modo de operación, el programa sale de esta rutina para realizar la función solicitada. Cuando el compresor se encuentra cargando, cierra la válvula de escape de aire y abre la válvula de ingreso. Mientras que en modo descarga, el compresor cierra la válvula de ingreso y abre la válvula de escape para que el aire comprimido tenga un camino de salida y no incremente la presión de línea.

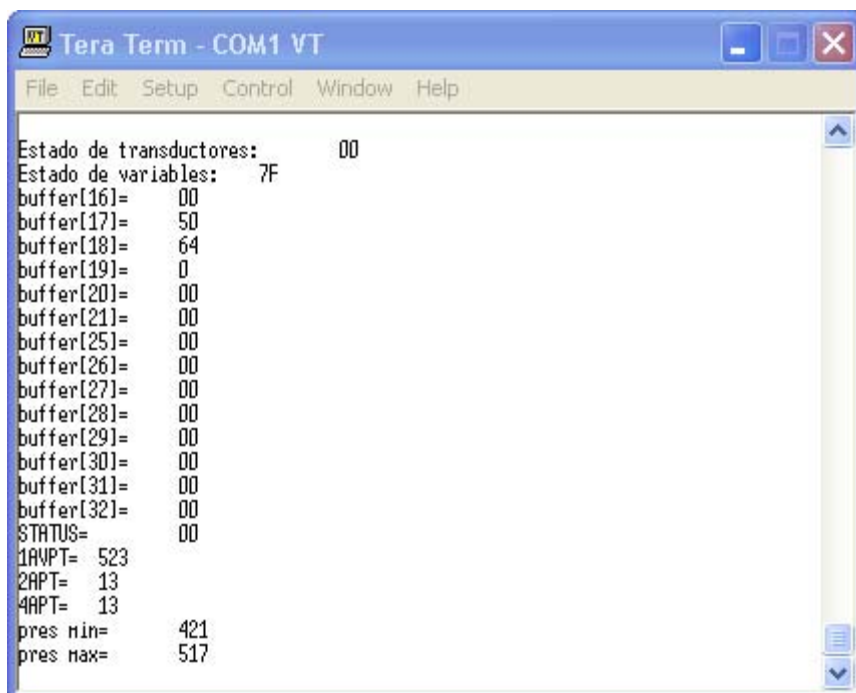
Capítulo 6. Análisis de resultados

Las figuras y tablas mostradas en este capítulo fueron obtenidas a partir de las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento de las rutinas de software implementadas.

6.1 Revisión de registros de estado mediante monitoreo a través del puerto RS-232.

En la figura 6.1 se muestra una pantalla con los valores almacenados en el registro de comunicaciones del sistema implementado en condiciones iniciales. Para obtener esos datos en la pantalla de la computadora se utilizó una rutina de software en el microcontrolador para comunicación con la PC (ver apartado de software implementado).

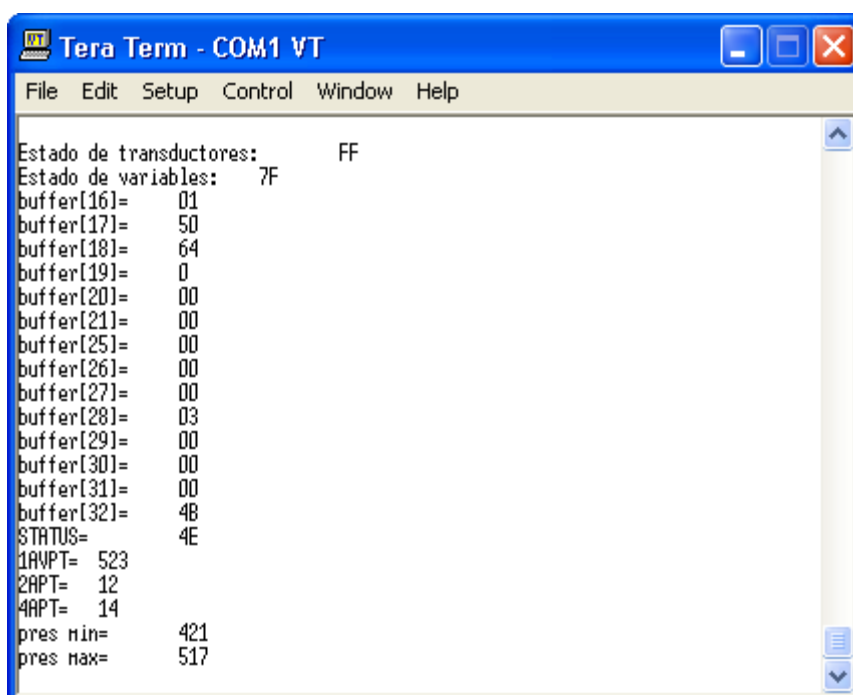
El estado de las variables se verifica al inicializar el sistema y se escriben los *bits* de la posición 15 del registro de estado (`buffer[15]`, ver figura 5.14). el valor mostrado (`7FH`) indica que todas las variables monitoreadas son correctas y que el sistema se encuentra listo para iniciar. `buffer[16] = 0` indica el estado inicial del sistema, por lo que en este instante es posible iniciar la operación del compresor presionando la tecla “Inicio”.



```
Tera Term - COM1 VT
File Edit Setup Control Window Help
Estado de transductores:      00
Estado de variables:        7F
buffer[16]=      00
buffer[17]=      50
buffer[18]=      64
buffer[19]=       0
buffer[20]=      00
buffer[21]=      00
buffer[25]=      00
buffer[26]=      00
buffer[27]=      00
buffer[28]=      00
buffer[29]=      00
buffer[30]=      00
buffer[31]=      00
buffer[32]=      00
STATUS=          00
1AVPT= 523
2APT= 13
4APT= 13
pres nin=      421
pres max=      517
```

Figura 6.1 Resultados obtenidos en condiciones iniciales mediante el monitoreo de registros de estado a través del puerto serie.

Al presionar la tecla de inicio de sistema, el PIC secundario ejecuta la rutina para la revisión de estado de los transductores en condiciones iniciales y a la vez verifica el funcionamiento del motor de pasos de la válvula de admisión. Una revisión de variables exitosa culmina con la escritura del valor FF_h en el registro de estado de los transductores (ver figura 6.2) y de esta manera, el PIC secundario escribe un uno en el buffer[16], indicando al microcontrolador principal que puede iniciar la operación del compresor al presionar nuevamente la tecla “Inicio”.



```
File Edit Setup Control Window Help
Estado de transductores:      FF
Estado de variables:      7F
buffer[16]=      01
buffer[17]=      50
buffer[18]=      64
buffer[19]=      0
buffer[20]=      00
buffer[21]=      00
buffer[25]=      00
buffer[26]=      00
buffer[27]=      00
buffer[28]=      03
buffer[29]=      00
buffer[30]=      00
buffer[31]=      00
buffer[32]=      4B
STATUS=      4E
1ANPT= 523
2APT= 12
4APT= 14
pres nin=      421
pres max=      517
```

Figura 6.2 Resultados obtenidos en registros de estado a través del puerto serie. Sistema listo para iniciar unidad compresora.

6.2 Mediciones realizadas con el analizador lógico LogicPort.

Para verificar el funcionamiento de la rutina de control del ADC de la tarjeta de adquisición de variables se realizó la medición mostrada en la figura 6.3 donde se muestran las señales utilizadas para llevar a cabo dicha comunicación. La señal de CS (activa en bajo) inicia el proceso. Mediante la escritura de la palabra de control (en señal Dout) y sincronizando los datos con CLK. Una vez terminada la escritura de la palabra de control, se procede a realizar la lectura (Din) del dato seleccionado. (ver funcionamiento del ADC en anexo A). A partir de la comparación de los datos obtenidos de la medición

mostrada la figura 6.3 con el diagrama de temporización obtenido de las hojas de datos del ADC que se muestra en la figura A.2.6, es notorio que efectivamente se está siguiendo el proceso de escritura de una palabra (Dout) dentro del ADC y éste responde con un dato que corresponde a la digitalización realizada (Din). De esta manera se comprobó que el procedimiento implementado para obtener datos del ADC funciona adecuadamente, ya que sincroniza los datos tal y como el fabricante especifica de se debe hacer en la hoja de datos.

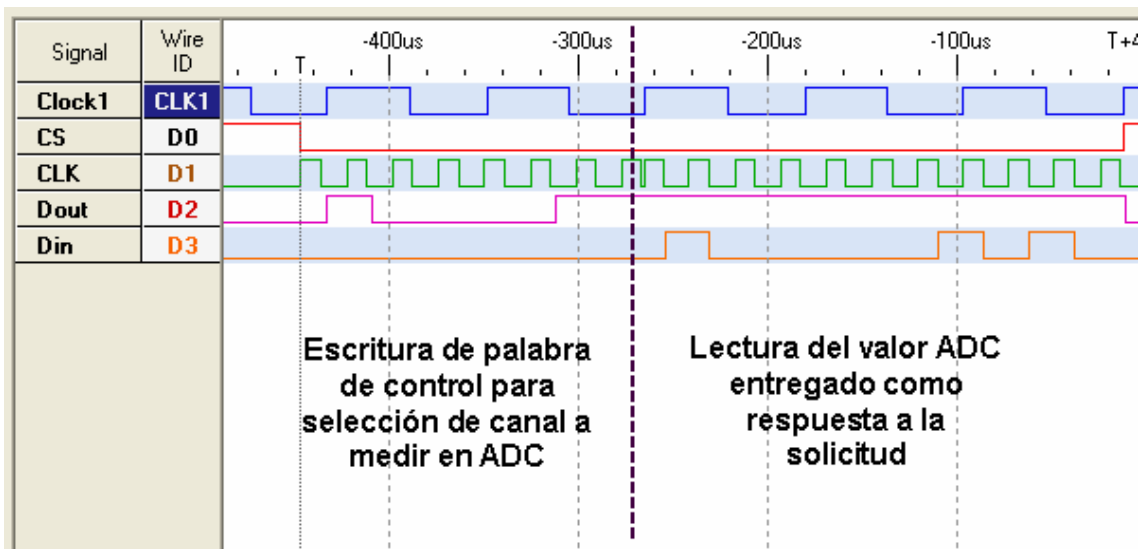


Figura 6.3 Ciclo de escritura de configuración y lectura de dato medido en ADC LTC1093CN.

La figura 6.4 muestra el diagrama lógico de las señales generadas por el PIC principal para escribir un comando en el registro de control del PIC secundario. La primera parte muestra como se escribe el dato 50_h que corresponde a la dirección del dispositivo: PIC secundario. Seguidamente se escribe el valor 13_h (buffer[19]) correspondiente a la dirección del registro de control en que se desea escribir. Una vez escritos estos datos, se procede a escribir el comando deseado en la dirección especificada (en este caso 30_h que corresponde al carácter '0' usado para limpiar los bits de error activos). Con este resultado y los obtenidos a partir de las lecturas de los registros vía PC, se determinó que la tanto la comunicación I2C como la RS-232 funciona adecuadamente, de manera que los datos se transfieren sin sufrir ningún cambio que produzca alteraciones en sus valores.

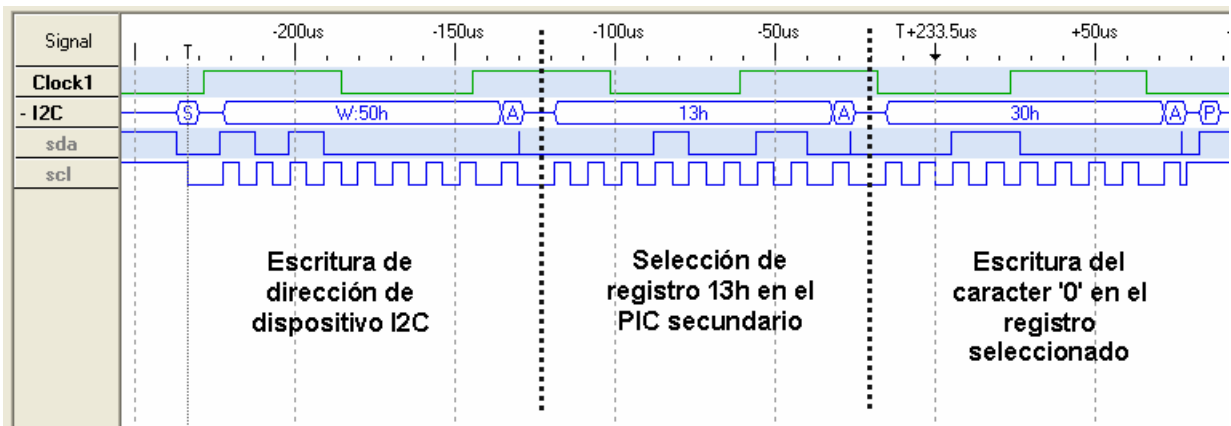


Figura 6.4 Ciclo de escritura de configuración I2C para el microcontrolador secundario.

Se realizaron pruebas para verificar el estado de la válvula de admisión. El estado de la válvula de admisión se monitorea a partir de los interruptores de límite. En este caso se aplicó la rutina explicada en el diagrama de la figura 5.22. El resultado obtenido se muestra en la figura 6.5 donde se monitoreó el estado de las señales relacionadas mientras se ejecutó la rutina de pruebas. La señal “Closed” en alto indica que el interruptor de final de carrera de la válvula cerrada se encuentra activo. Se activa la señal “Side” para seleccionar el sentido de giro del motor y se hace oscilar la señal “CLK” para que se den los pasos necesarios para llegar a abrir la válvula. La señal “Open” indica el momento en que la válvula llega a la posición de totalmente abierta, de manera que se cambia el sentido de giro, para proceder a cerrar la válvula hasta que “Closed” se activa nuevamente y así se salga de la rutina de prueba. De esta manera se comprueba el adecuado funcionamiento de esta rutina.

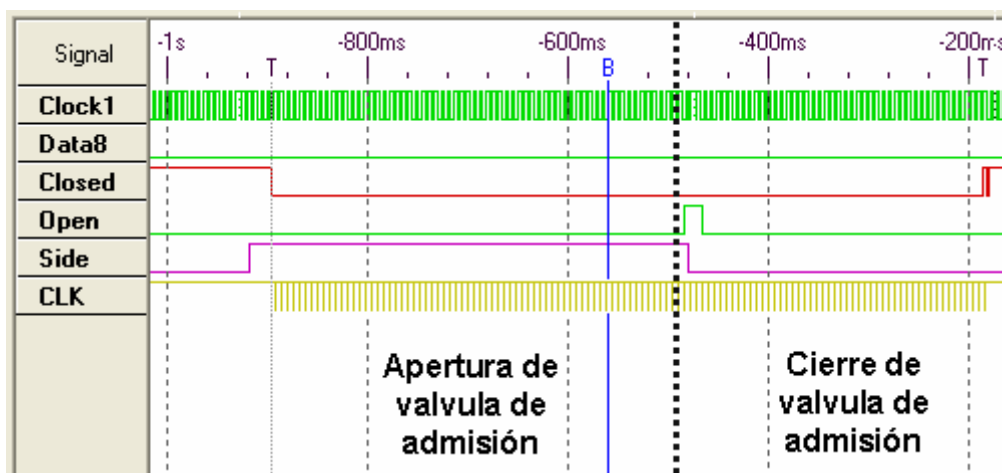


Figura 6.5 Prueba de apertura y cierre de válvula de admisión de aire.

6.3 Linealización de transductores de presión

A partir del hardware implementado y mediante un recipiente presurizable fue posible aplicar diferentes presiones a los transductores con el fin de obtener los respectivos valores medidos en el ADC. En la tabla 6.1 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 6.1 Valores medidos en la tarjeta de adquisición de variables para diferentes valores de presión en los transductores de presión de 0 a 200 PSI.

Presión (psi)	2APT_ADC	3APT_ADC	Promedio mediciones ADC
0	12	13	12,5
10	53	55	54
15	81	82	81,5
20	108	109	108,5
25	134	136	135
30	155	157	156
35	183	184	183,5
40	211	212	211,5
45	238	238	238
50	261	260	260,5
55	282	284	283
60	312	311	311,5
65	338	338	338
70	365	362	363,5
75	387	386	386,5
80	414	417	415,5
85	440	437	438,5
90	466	465	465,5
95	489	490	489,5
100	514	513	513,5
105	544	543	543,5

A partir de los datos de la tabla 6.1 se procedió a graficar el comportamiento del transductor estudiado. En la figura 6.6 se muestra la curva experimental obtenida, donde es notorio un comportamiento lineal que responde a la ecuación:

$$y = 5.0577x + 11.958 \quad (4)$$

que fue despejada para aplicar a las conversiones de presión en los transductores de la siguiente manera:

$$presión_transductor = \frac{Dato_ADC - 11.958}{5.0577} \quad (5)$$

Así, cada vez que se requiere mostrar los datos de presión en el LCD se utiliza esta expresión con el valor medido en el ADC para el transductor

deseado. La rutina explicada con la figura 5.12 es la encargada de utilizar esta expresión para mostrar el dato medido.

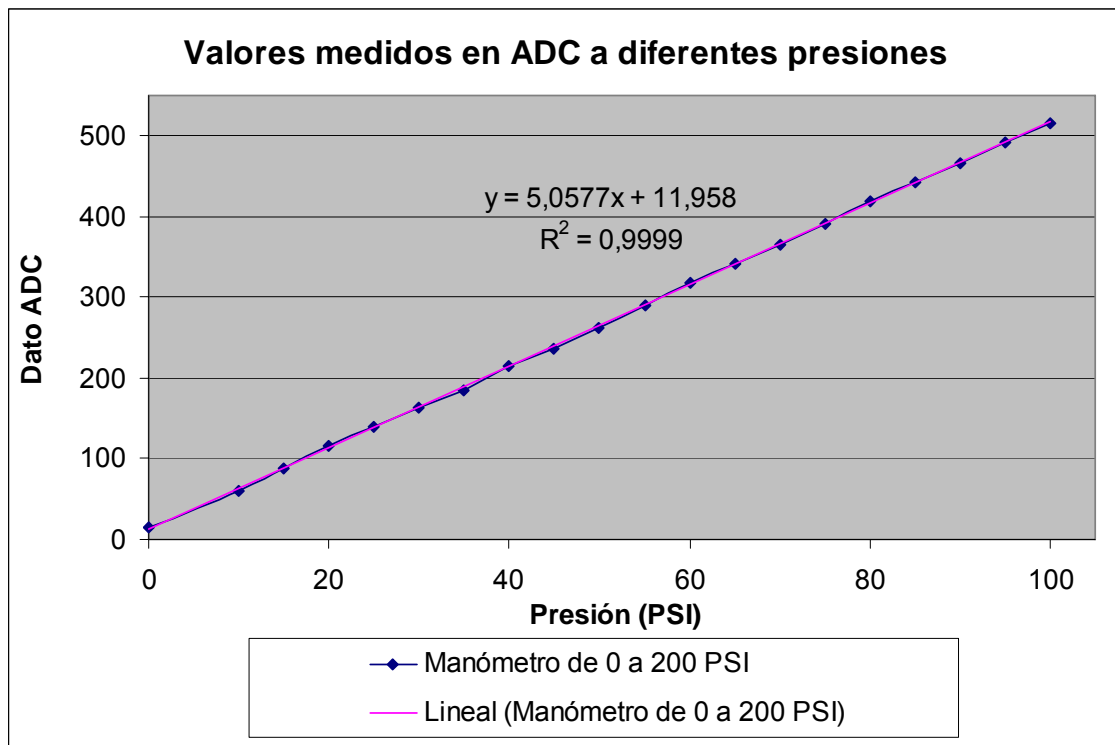


Figura 6.6 Gráfico de valores medidos en la tarjeta de adquisición de variables para el transductor de presión de 0 a 200 PSI en función de la presión aplicada.

6.4 Linealización de sensores de temperatura

Mediante la aplicación de diferentes temperaturas y utilizando el hardware y software implementados, fue posible obtener los valores de temperatura del ADC para cada caso. En la tabla 6.2 se registraron los datos medidos. El medio utilizado para aplicar calor a los sensores fue un instrumento cuyo fin es hacer pruebas de temperatura en aceites llamado viscosímetro.

Tabla 6.2 Valores medidos en ADC para uno de los termistores a diferentes temperaturas.

Temperatura en Viscosímetro	Valor medido en ADC
23,5	43
25	46
26	49
27	52
28	53
30	58
32	63
34	68
36	74

Tabla 6.2 Continuación.

38	81
39,9	88
42	95
43,9	103
45,9	112
47,9	121
49,9	130
51,9	141
53,9	152
55,9	163
57,9	176
59,9	188
61,9	197
63,9	216
65,9	232
67,9	248
69,9	265
71,9	283
73,9	302
75,9	322
77,9	343
79,9	365
81,9	387
83,9	412
85,9	436
87,9	462
89,9	489
91,9	516
93,9	546
95,9	575
97,9	605
99,9	637
101,9	669
103,9	703
105,9	736
107,9	772
109,9	808
111,9	845
113,9	881
115,9	921

De manera similar a como se procedió para obtener la ecuación de linealización de los transductores de presión. A partir de los valores registrados en la tabla 6.2 y 6.3 se elaboró el gráfico de la figura 6.7 que expresa el comportamiento de los sensores de temperatura. A partir de los datos posibles expresiones a utilizar para linealizar los valores medidos. El coeficiente de

correlación entre ambos casos tiene una diferencia de 0.0004, por lo que se utilizó la ecuación menos compleja (ecuación de segundo grado).

$$x = \frac{5.0318 + \sqrt{25.315 - 48.4456 - 0.41y}}{0.205} \quad (6)$$

$$TEMP = \frac{5.0318 + \sqrt{25.315 - 48.4456 - 0.41 * DAT0_ADC}}{0.205} \quad (7)$$

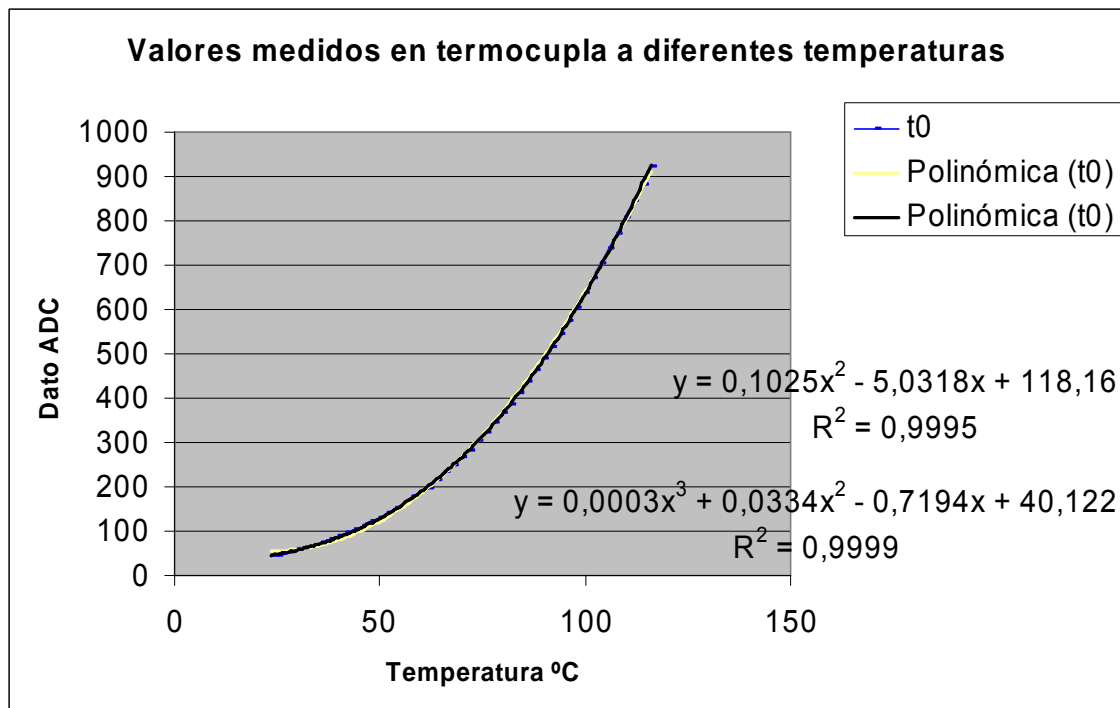


Figura 6.7 Gráfico de temperatura contra dato medido en ADC.

Con los resultados obtenidos en este capítulo fue posible determinar que tanto el hardware como las rutinas de software implementadas realizan las funciones necesarias para llevar a cabo el control de las partes del compresor. Los datos de los transductores son obtenidos sin problema, la apertura y cierre de la válvula de ingreso se da tal y como lo hace la tarjeta controladora Intellisys. La comunicación entre los microcontroladores funciona correctamente. El funcionamiento en conjunto de los bloques desarrollados conlleva a que el prototipo de control para compresor desarrollado sea operacional y quede listo para ser instalado en una unidad compresora.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

A partir de dos microcontroladores PIC18LF458 y algunos periféricos fue posible implementar el hardware necesario para realizar la comunicación con las tarjetas de adquisición de variables e interfaz de potencia del compresor. Obteniendo como resultado el prototipo de un sistema controlador electrónico para un compresor estacionario Ingersoll Rand SSR-EP200 que cumple con las dos funciones principales de compresión. Además es capaz de monitorear y detener el funcionamiento del compresor en caso de que se presente alguna falla.

La presión de operación máxima y mínima del compresor puede ser configurada mediante la interfaz de usuario implementada, haciendo que el compresor no se vea limitado a la utilización de valores fijos para su operación.

El sistema desarrollado puede ser modificado para agregar nuevas funciones como lo puede ser la comunicación con otros compresores o la implementación de un módulo adicional que permita hacer uso del reloj en tiempo real con que está equipado el sistema para la generación de historiales de eventos ocurridos.

Se instaló el sistema implementado dentro de un compresor que estaba fuera de operación, el cual ahora es funcional gracias a que el controlador implementado opera adecuadamente.

El sistema diseñado puede ser reproducido mediante la creación de más tarjetas con la finalidad de tener repuestos disponibles en caso de que se presente una falla en el controlador de otro compresor SSR-EP200.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda analizar la posibilidad de implementar un módulo para la operación remota a través de una computadora.

Es posible automatizar la operación de un banco de compresores, por lo que se sugiere estudiar las características de cada uno de ellos y revisar la compatibilidad de comunicación de los mismos.

Se recomienda capacitar a los operarios de los compresores para que aprendan acerca del funcionamiento del controlador desarrollado y de esta manera puedan utilizarlo fácilmente.

Bibliografía

- [1] Avallone, Eugene A., *Manual del ingeniero mecánico* Tomo 2. 9ª Edición, México: McGraw-Hill, 1996.
- [2] Coughlin, Robert F., *Amplificadores operacionales y circuitos integrados* 4ª Edición, Mexico: Pentice Hall Hispanoamericana S.A., 1993.
- [4] Ingersoll Rand Company. *Operators/Instruction Manual Options*. USA: Ingersoll Rand – Co. 1990.
- [5] Protocolo RS-232. Enciclopedia en línea Wikipedia. Sitio Web: <<http://es.wikipedia.org/wiki/RS-232>> [Consulta: 3 mayo 2007].
- [6] Protocolo I2C. Enciclopedia en línea Wikipedia. Sitio Web: <<http://es.wikipedia.org/wiki/I2C>> [Consulta: 3 mayo 2007].
- [7] Termistores y mediciones de temperatura Sitio Web: [En línea]. <http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termistores.htm> [Consulta: 5 mayo 2007].
- [8] Presión. Sitio Web: < <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>> [Consulta: 23 mayo 2007].

Hojas de datos

- [9] ADC LTC1093CN, Sitio Web <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/70608/LINER/LTC1093CN.html>> [Consulta: 13 abril 2007].
- [10] Multiplexor analógico, Sitio Web <<http://www.ortodoxism.ro/datasheets/motorola/MC14053BCP.pdf>> [Consulta: 15 abril 2007].
- [11] PIC18F458. Sitio Web: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41159e.pdf>> [Consulta: 7 abril 2007].
- [12] RTC bq3285. Sitio Web: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/bq3285e.pdf>
- [13] Controlador L297. Sitio Web: <<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/1334.pdf>>
- [14] Decodificador de teclado hexadecimal. Sitio Web: <<http://pdf1.alldatasheet.co.kr/datasheet-pdf/view/53732/FAIRCHILD/MM74C922N.html>>

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Estator: Parte fija de una máquina rotativa.

Memoria Flash: Forma evolucionada de la memoria EEPROM que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una misma operación de programación mediante impulsos eléctricos.

Motor paso a paso: El motor eléctrico paso a paso es un actuador conversor de tren de impulsos en movimiento angular giratorio

Microcontrolador: Circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de un ordenador: CPU, Memoria y Unidades de E/S.

Rectificador de onda completa: Es el elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua.

Resistencias de “pull-up”: Son resistencias que en general se conectan entre una señal lógica y el positivo y su función es asegurar que esa señal no quede en un estado flotante.

Rotor: La parte giratoria de una máquina.

Torque: Es la fuerza que producen los cuerpos en rotación

EEPROM: “*Electrical Erasable Programmable Read Only Memory*”.

I2C: Inter Integrated Circuit.

PIC: Peripheral Interface Controller.

RAM: Random Access Memory.

RISC: Reduced Instruction Set Computer.

TTL: “*Transistor Transistor Logic*”.

Viscosímetro: instrumento empleado para medir la viscosidad y algunos otros parámetros de flujo de un fluido.

PSI: “*Pounds per square Inch*” (Libras por pulgada cuadrada).

BFV: “*Buterfly inlet valve*” (Válvula Mariposa de Ingreso).

A.2 Descripción detallada de las señales utilizadas en el sistema desarrollado

Las señales a controlar por los microcontroladores fueron divididas en dos grupos: el primer grupo está conformado por las señales para controlar los periféricos del sistema, mientras que el segundo grupo esta formado por las señales a controlar en las tarjetas del compresor. De esta manera, se definió que el microcontrolador principal controla los periféricos, mientras que el microcontrolador secundario controla las tarjetas electrónicas del compresor.

A.2.1 Microcontrolador principal

Inicialmente se procedió a conectar un teclado hexadecimal con el que se controlaría el sistema. Para lograr esta conexión ahorrando algunos pines del microcontrolador, se utilizó un decodificador de teclado MM74C922N. Este decodificador se conecta a las 8 patillas del teclado, cuando se presiona alguna tecla, este circuito integrado se encarga de generar una señal de interrupción, y entregar a su salida 4 bits que identifican la tecla que fue presionada.

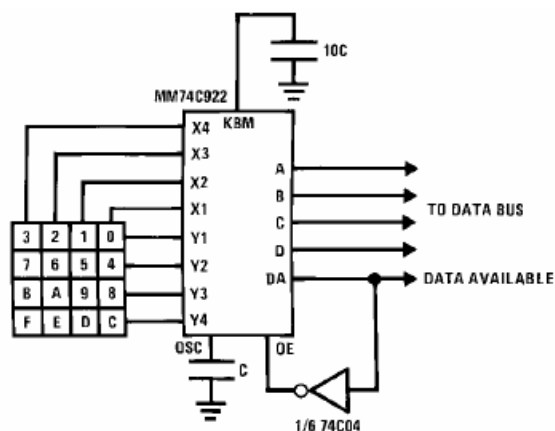


Figura A.2.1 Conexión del decodificador de teclado MM74C922N [14].

En la figura A.2.1 se muestra la conexión utilizada para conectar el teclado hexadecimal en el sistema. Los pines que indican la conexión al bus de datos se conectan al microcontrolador de manera que este recibe la interrupción de tecla presionada y luego procede a interpretar cual de todas ellas fue presionada. Los pines A, B, C y D del decodificador fueron conectados al byte bajo del puerto C del microcontrolador (pines 15, 16, 17 y 18), mientras que el pin denominado como “Data Available” fue conectado al pin B0 (pin 33) el cual es configurable para recibir una interrupción externa. De esta manera,

cada vez que se presione una tecla el microcontrolador ejecutará una interrupción que leerá el dato de la parte baja del puerto C, con lo cual obtendrá el valor de la tecla presionada con el fin de realizar la acción que corresponda.

Para mostrar las acciones del sistema y poder seleccionar los procesos a realizar, se implementó la conexión con un display LCD de manera que el usuario del sistema tenga la facilidad de observar las funciones a configurar.

El “*display*” utilizado cuenta con 4 líneas de 16 caracteres cada una para mostrar mensajes y el menú de opciones. Este “*display*” cuenta con 8 pines de conexión, de manera que para realizar la comunicación de datos y de control, se dispuso del puerto D (8 bits) del microcontrolador principal. El puerto E (3 bits) del microcontrolador fue utilizado para controlar la habilitación, lectura y escritura de datos en el LCD.

En el diagrama de la figura A.2.2 se muestra la conexión del microcontrolador principal con los periféricos LCD, teclado hexadecimal y decodificador de teclado. Las líneas de salida del teclado hexadecimal son 8 y se conectan directamente al decodificador de teclado MMC74C922. Este decodificador entrega como salida el valor binario de la tecla que se presiona además de una señal de interrupción para indicar al microcontrolador que se tiene un nuevo dato en su salida.

La conexión con el “*display*” LCD se hace directamente al microcontrolador, de manera que por medio del puerto E se hace la selección de la función a realizar y mediante el puerto D se escribe el dato o palabra de control.

Para comunicar los dos microcontroladores fue utilizado su hardware de comunicaciones I2C, de manera que se conectó el pin 24 del microcontrolador principal al pin 24 del microcontrolador secundario. En estos microcontroladores el pin 24 corresponde a la señal llamada SCL (Serial Clock) y se utiliza en el protocolo I2C para lograr la comunicación de los datos. La transmisión de los datos en este protocolo se hace a través del pin 23 (SDA), por lo que en ambos microcontroladores se conectaron estos pines directamente. En la figura se marcó la línea “SDA” con color azul, mientras que la línea “SCL” fue marcada con color verde.

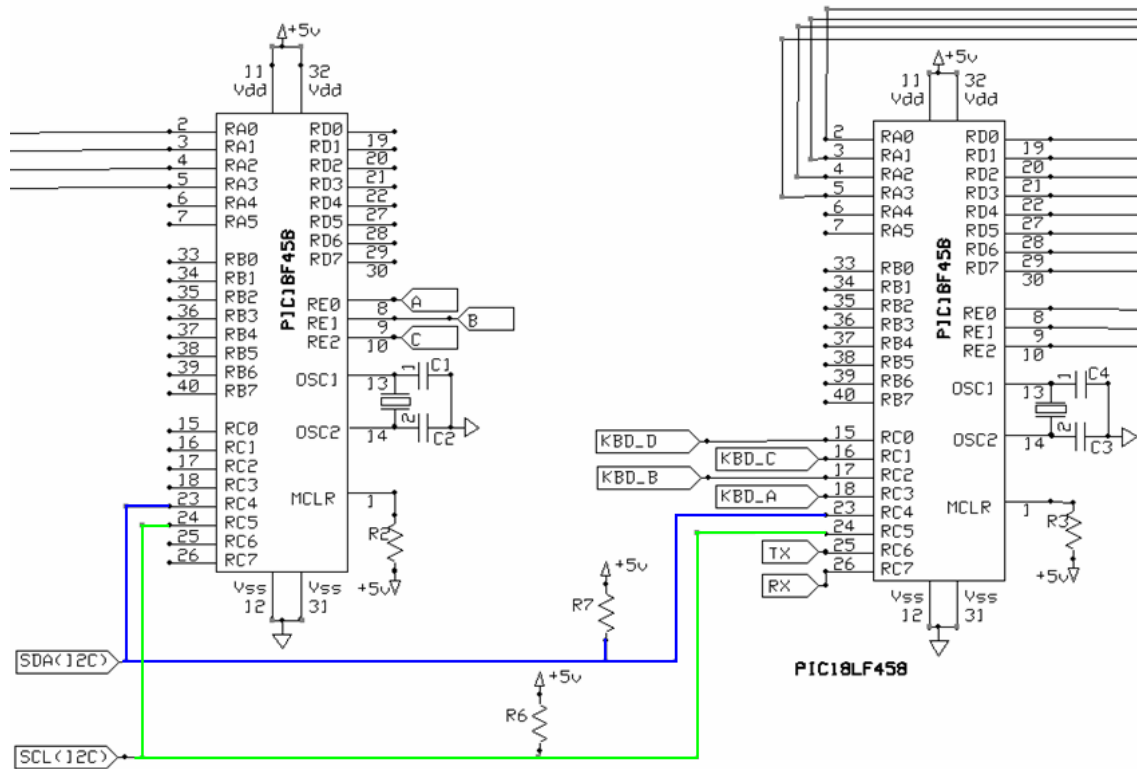


Figura A.2.2 Conexión de los PIC para comunicarse mediante I2C.

En el diagrama de la figura A.2.2 se muestra la conexión de los microcontroladores para lograr comunicarse mediante el protocolo I2C. Para lograr esta comunicación fue necesario conectar dos resistencias de pull up cuyo valor es de 5 K Ω .

La conexión del PIC principal con el reloj en tiempo real se muestra en la figura A.2.3. Este RTC es el BQ3285EP Texas Instruments, cuenta con características especiales que permiten llevar un control del tiempo. El BQ3258EP cuenta con 14 registros internos cuya función es mantener los datos referentes a hora, minutos, segundos, alarmas, y los datos de fecha.

La figura A.2.4 muestra las direcciones a acceder para obtener los diferentes datos disponibles en el BQ3285EP.

Para tener acceso a estos registros se tiene que escribir la dirección del registro a leer y seguidamente hacer la lectura o escritura del mismo según se requiera. En la sección de descripción de software se explicará a fondo la manera de utilizar este RTC.

Los registros de control y estado del reloj en el BQ3285 se encuentran ubicados en las direcciones a partir de la 00Hex hasta la 0DHex. Los registros A y B sirven para configurar la operación del reloj en tiempo real (RTC), mientras que los registros C y D son de estado. Los registros ubicados entre las direcciones 0 y 9 son utilizados para actualizar los datos de fecha y hora con sus respectivas alarmas. Estos registros son de lectura y escritura, por lo que sus valores pueden ser modificados utilizando una rutina de escritura externa para establecer tanto la fecha como la hora.

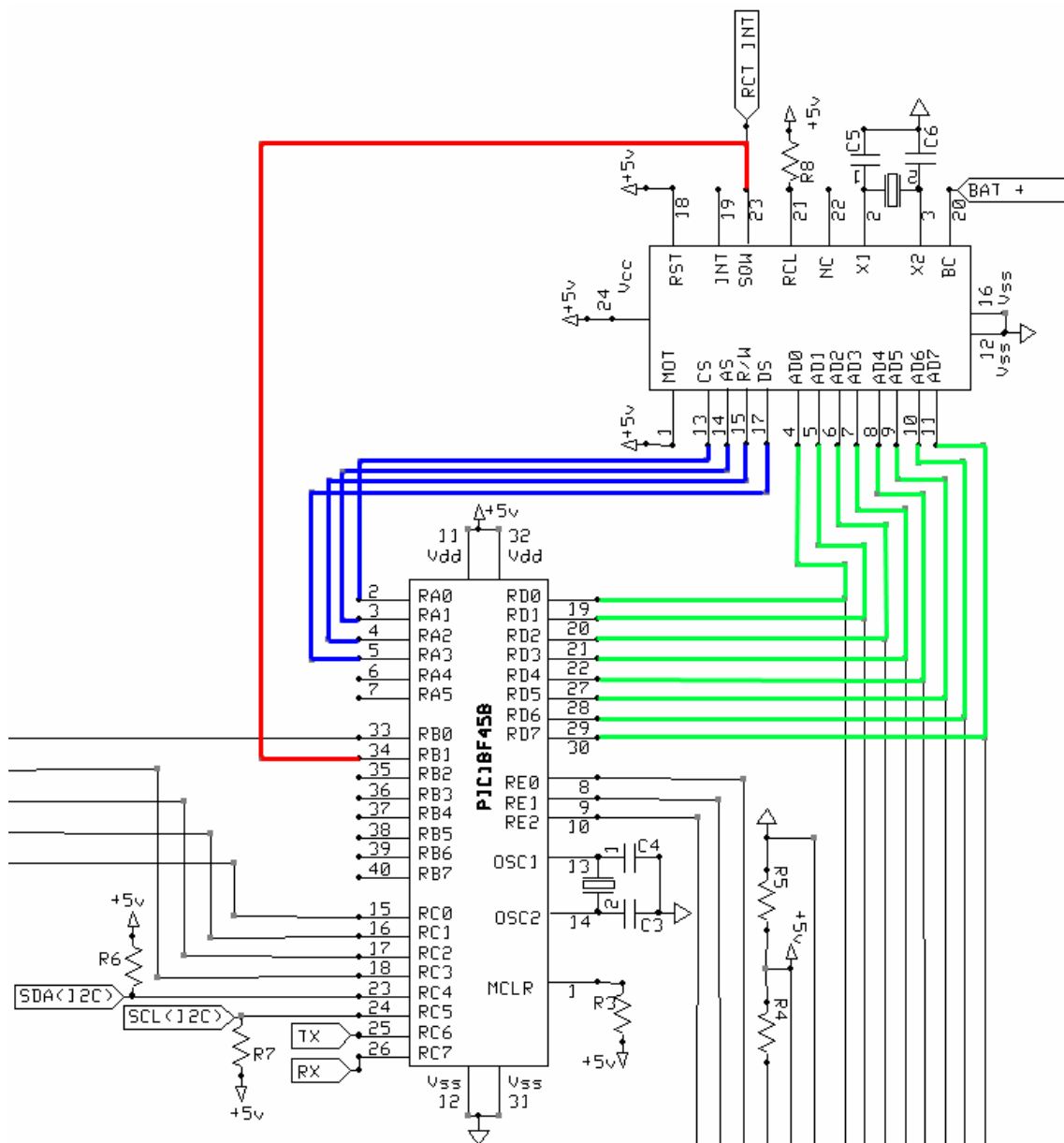


Figura A.2.3 Conexión del PIC principal con el RTC.

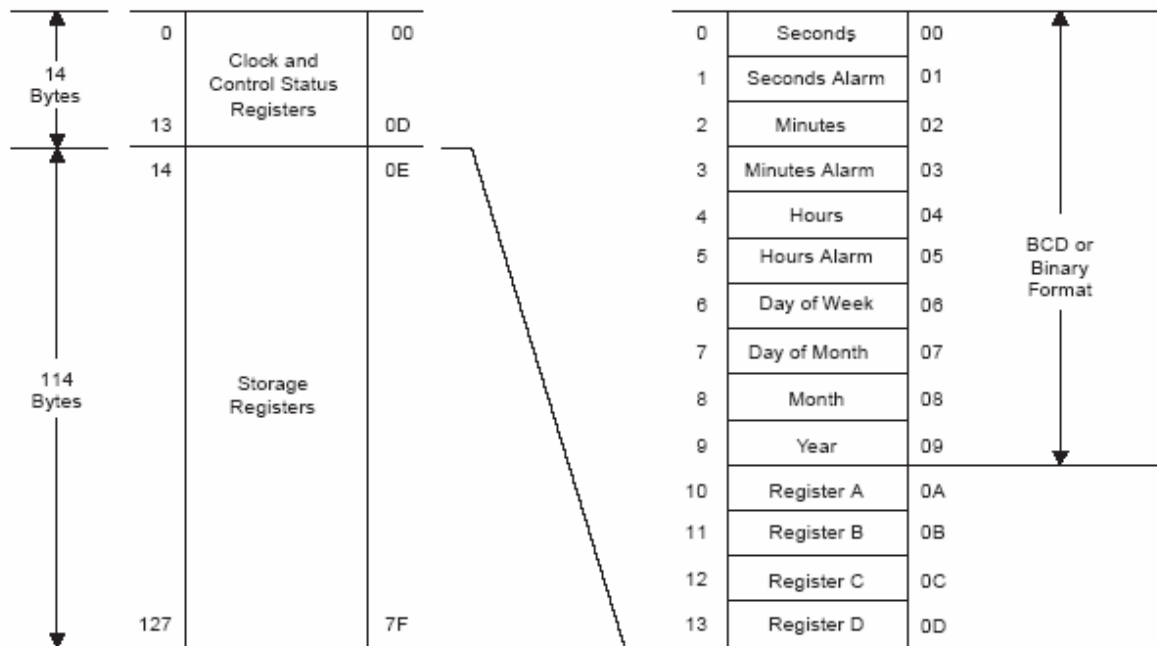


Figura A.2.4 Direcciones de los registros del BQ3285EP [12].

El BQ3285EP cuenta con la opción de instalar una batería de respaldo que le permite mantener el dato de la hora aún cuando falte el fluido eléctrico (Ver figura A.2.3). Además cuenta con 214 registros de memoria RAM que pueden ser utilizados para almacenar los datos respectivos a estos eventos y mantenerse disponibles para ser visualizados posteriormente.

Para efectos de pruebas y monitoreo del funcionamiento del sistema se implementó una interfaz con la PC mediante el protocolo RS-232. Esta interfaz sirvió para ver en la PC el estado de las rutinas y los resultados producidos por las mismas, en el caso de que fueran cálculos u operaciones de obtención de variables. El hardware utilizado para implementar esta etapa se muestra en la figura A.2.5.

El MAX232 es un circuito integrado que se encarga de convertir los niveles de voltaje de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. El estándar RS232 necesita de tensiones de +12 V y -12 V para funcionar.

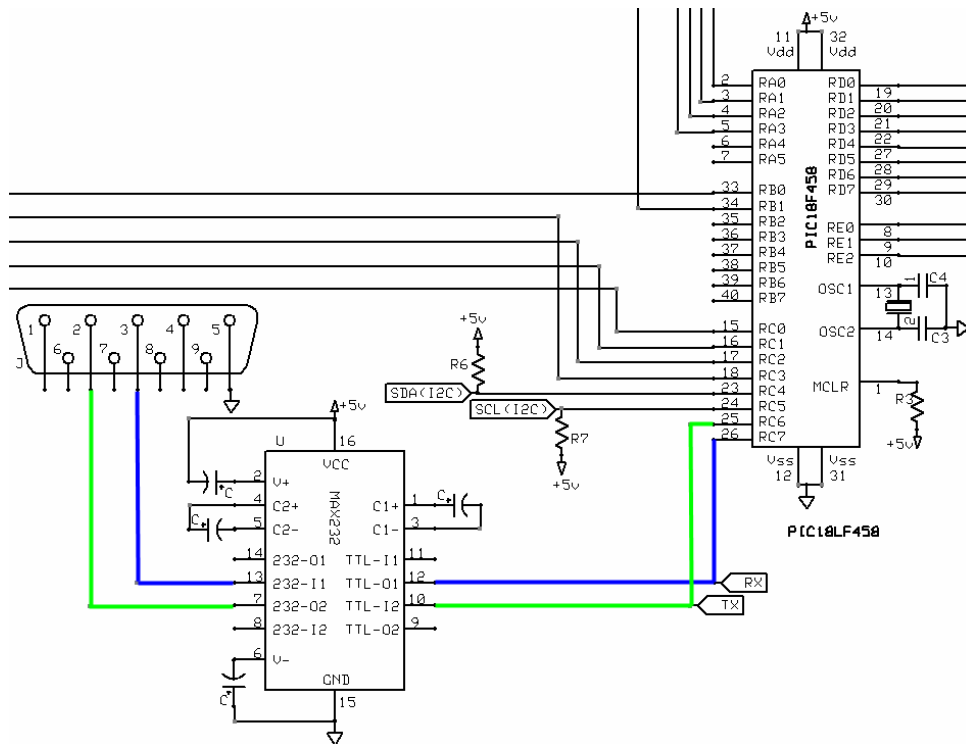


Figura A.2.5 Conexión del MAX232 al PIC18LF458.

A.2.2 Microcontrolador secundario

Como se mencionó anteriormente, el diseño del hardware para el control del compresor fue dividido en dos partes para distribuir las señales a controlar. El microcontrolador secundario es el que se encarga de controlar las señales de comunicación con las tarjetas de adquisición de variables y de interfaz de potencia. A partir del análisis realizado a las tarjetas en cuestión se desarrolló el hardware necesario para lograr la comunicación con las mismas.

A.2.2.a Conexión con tarjeta de adquisición de variables

El primer paso fue la elaboración de la etapa de comunicación con la tarjeta de adquisición de variables. Para esto se tomó como punto de partida las señales a controlar en esta tarjeta para interactuar con ella y así obtener los datos de los transductores.

La tarjeta de adquisición de de datos consta de un convertidor de datos analógicos a digitales LTC1093CN. Este es un periférico que funciona serialmente, de manera que recibe comandos a través de uno de sus pines utilizando como medio de sincronización (reloj) otro pin (ver funcionamiento en anexo A). El LTC1093CN tiene seis entradas analógicas y posee una entrada

extra que funciona como voltaje de referencia. Tiene la capacidad de hacer lecturas de tensiones tanto positivas como negativas. Los datos medidos en sus entradas son digitalizados a 10 bits, lo cual hace que tenga un nivel de precisión aceptable a la hora de realizar muestreos de datos. Este dispositivo es configurable y para hacer una medición se debe escribir una palabra de control que se ingresa por su pin llamado "D_{IN}" (data in) sincronizado por la señal "CLK" (clock). La palabra de control le indica al ADC el canal que se desea medir y el modo de medición (puede ser unipolar o bipolar). Una vez que el LTC1093CN recibe e interpreta la palabra de control, este pone en el pin "Dout" el dato solicitado que se midió, sincronizado por la señal de reloj generada por el microcontrolador.

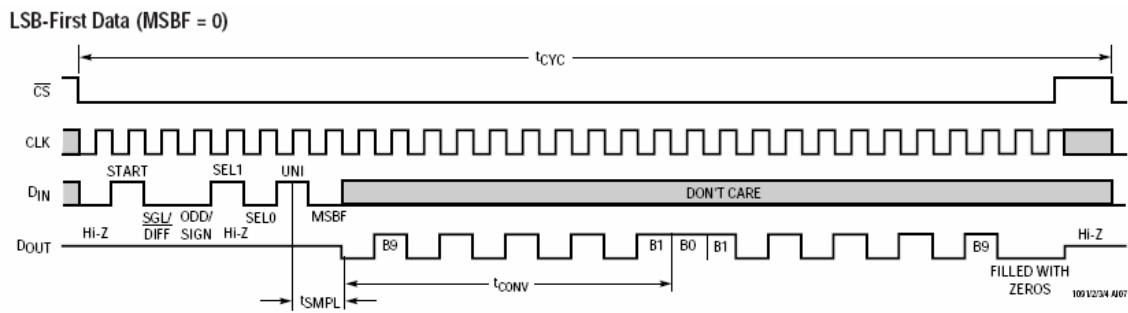


Figura A.2.6 Señales a controlar para la obtención de datos del LTC1093CN [9].

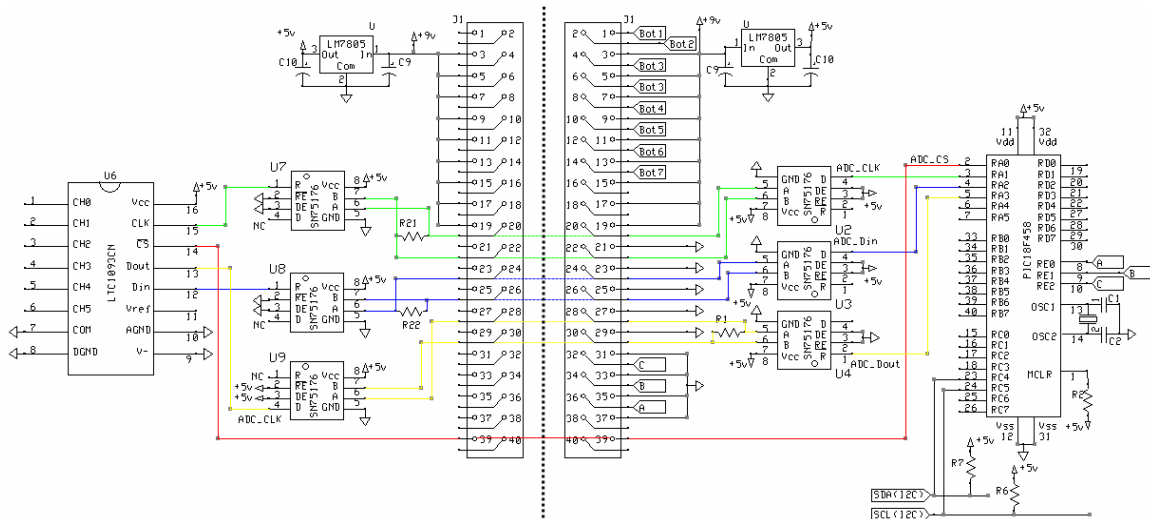


Figura A.2.7 Señales a controlar para la obtención de datos del LTC1093CN.

El diagrama de la figura A.2.7 muestra la manera en que se conectaron las señales de control del LTC1093CN al PIC. La línea punteada

del centro indica la división de una tarjeta a la otra, en la parte izquierda se muestran los circuitos de la tarjeta de adquisición de variables, mientras que a la derecha se muestra la tarjeta diseñada.

La conexión de una tarjeta a la otra se hace por medio de un conector multicable de 40 hilos. Se resaltaron con colores las señales conectadas en este caso. Para indicar la señal de reloj se utilizó el color verde (pin 15 del LTC1093CN). La señal de selección de chip "CS" (chip select) fue marcada con color rojo. Por otro lado, la señal de salida de datos "Dout" fue marcada con color amarillo mientras que la de entrada de datos "Din" se coloreó con azul.

El pin de "CS" se encuentra conectado directamente al microcontrolador, ya que los cambios de nivel en esta señal no son tan frecuentes como las señales "CLK", "Din" y "Dout" que sufren transiciones en el tiempo del orden de los nano segundos, por esta razón fue necesaria la utilización de transceivers para la comunicación las mismas, para que no sufrieran variaciones en sus valores debidas a ruidos electromagnéticos en el ambiente.

Una vez que se implementó la etapa de comunicaciones con el ADC, se procedió a implementar la etapa de hardware necesaria para controlar la selección de la señal a medir. Para seleccionar la señal a medir, en la tarjeta de adquisición de datos se cuenta con tres circuitos integrados MC14051B los cuales se encargan de multiplexar señales analógicas y son controlados digitalmente.

Ellos cuentan con ocho entradas analógicas y una salida que tendrá el valor de una de sus entradas dependiendo de tres señales que seleccionarán cual de las entradas se presentará a la salida. Para la selección de la señal a medir se utilizan las señales E0, E1 y E2 del PIC (pines 8, 9 y 10) mostradas en la figura A.2.8.

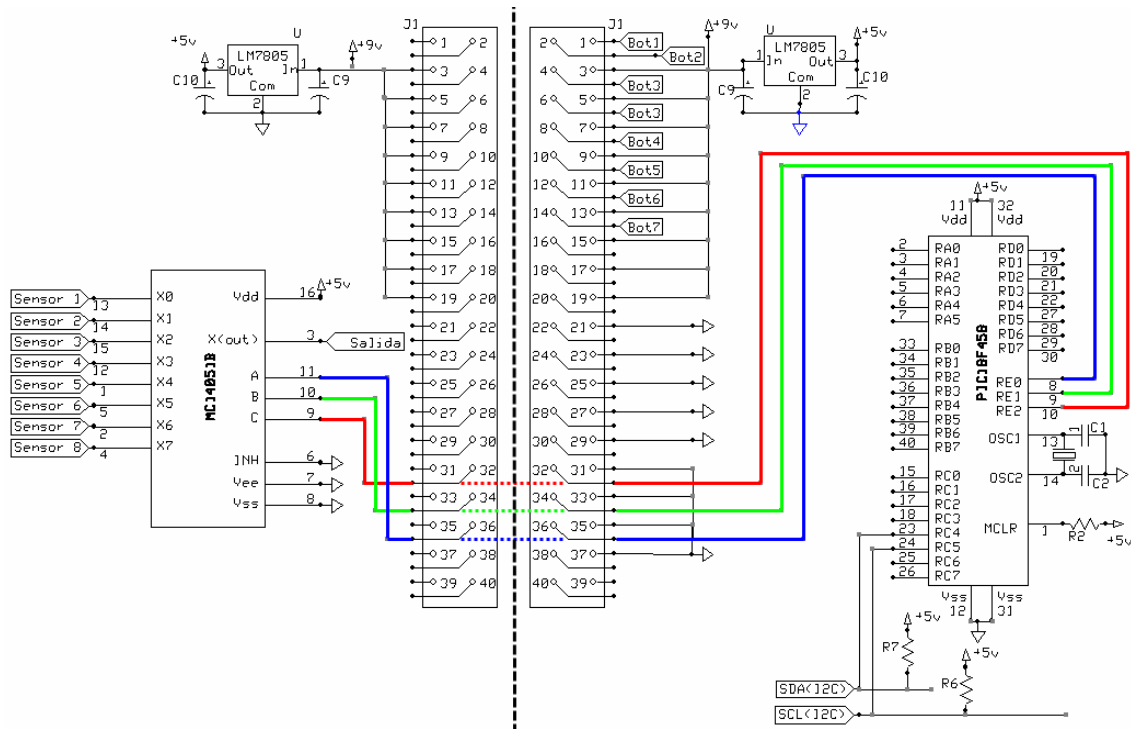


Figura A.2.8 Señales a controlar para la obtención de datos del LTC1093CN.

Tabla A.2.1 Tabla de verdad para salidas del MC14051B [10].

Control Inputs				Salida MC14051B
Inhibit	Select			
	C*	B	A	
0	0	0	0	X0
0	0	0	1	X1
0	0	1	0	X2
0	0	1	1	X3
0	1	0	0	X4
0	1	0	1	X5
0	1	1	0	X6
0	1	1	1	X7
1	x	x	x	None

En la tabla A.2.1 se puede apreciar la configuración de los bits de control A, B y C para seleccionar cualquiera de las 8 salidas con las que se cuenta. Como se muestra en la figura A.2.8, estos pines se encuentran conectados directamente al PIC, por lo que basta con hacer que la salida del puerto E corresponda al valor del sensor deseado.

Para llevar a cabo la medición de las variables del sistema, se cuenta con transductores de presión y temperatura. Los transductores de presión utilizados son del tipo llamado galgas extensiométricos las cuales están conformadas por un arreglo de puente Weatstone (ver circuito equivalente en figura 3.4). Estos sensores al recibir una tensión de alimentación de 5 V entregan a su salida un voltaje proporcional a la presión medida. Estos son transductores de presión manométrica, de manera que a la hora de realizar una medición sin haberles aplicado presión, estos deben medir cero psi. Dos de estos transductores sirven para medir presiones que van de 0 a 200 psi. Mientras que el tercero realiza las mediciones en el rango de 0 a 15 psi. La salida de estos va de 0 a 50 milivoltios dependiendo del valor de presión aplicada.

Las mediciones de temperatura son realizadas por medio de termistores tipo NTP (ver apartado 3.4). Los circuitos utilizados para acondicionar las señales obtenidas de los transductores se explicaron en el apartado 4.2.1.

A.2.b Conexión con tarjeta de interfaz de potencia

Para la conexión con esta tarjeta se utilizaron los pines de entrada y salida del microcontrolador secundario. La primera etapa implementada fue la conexión el motor paso a paso que controla la apertura de la válvula de ingreso de aire. La razón principal de utilizar un motor paso a paso para controlar la válvula de ingreso es la habilidad que estos tienen para realizar pasos precisos según se requiera, además de su capacidad para quedar enclavados en una sola posición al energizar sus bobinas. El motor utilizado en esta aplicación cuenta con dos bobinados y es de tipo bipolar.

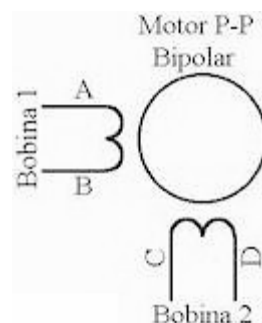


Figura A.2.9 Bobinados de un motor paso a paso bipolar.

Para poder controlarlo es necesario utilizar arreglos electrónicos llamados “puente h” que se encargan de cambiar la polaridad de las dos bobinas. En el mercado existen controladores para el poder manejar el flujo de corriente en las bobinas de este tipo de motores. En este caso se utilizó un circuito integrado especial para controlar los bobinados del motor a utilizar.

El L6203 es un controlador en puente completo que permite hacer que las bobinas del motor se alimenten en forma bipolar. Como el motor cuenta con dos bobinas, se tienen dos L6203 instalados en la tarjeta de interfaz de potencia. Estos circuitos integrados toman el nivel de tensión al cual debe ser alimentado el motor y lo regulan para producir el flujo de corriente necesario. Para que estos dispositivos actúen necesitan recibir algunas señales de control que son proveídas por un circuito llamado L297.

El L297 se encarga de hacer la interfaz entre la etapa de control y la etapa de potencia que hace que el motor gire.

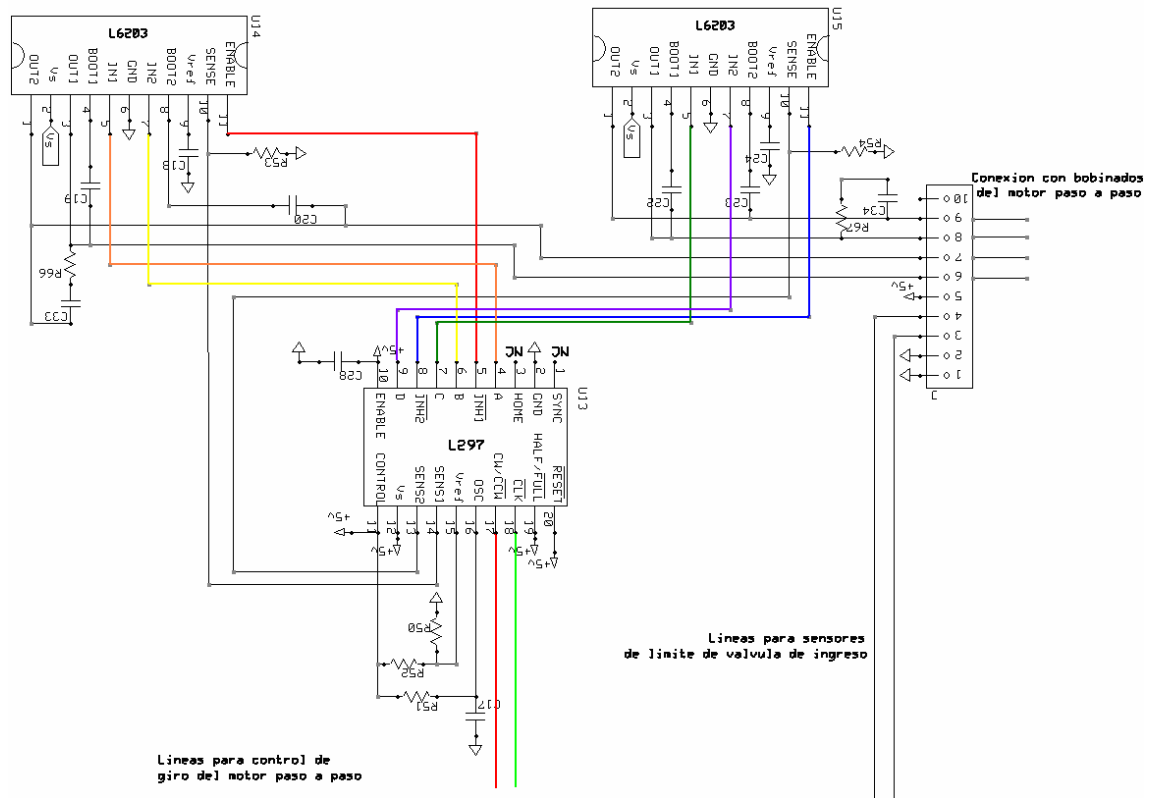


Figura A.2.10 Bobinados de un motor paso a paso bipolar.

En la figura 5.2.10 se muestra la conexión de los controladores encargados de suplir las señales de accionamiento del motor paso a paso. En la parte superior se muestran las conexiones de los L6203 con el L297, donde

se demarcó con color rojo y azul las líneas que habilitan a los L6203, mientras que las líneas marcadas con color naranja y amarillo son las que hacen que se energice la bobina 1 del motor. Las líneas marcadas con colores verde y morado hacen que se energice la bobina 2 del motor.

Para que se pueda dar el adecuado control de esta etapa, el L297 necesita de la activación de dos señales para hacer que se presente el giro del motor. Lo anterior se hace mediante la selección del sentido de giro en el pin 17 llamado " CW / \overline{CCW} " (marcado con rojo en parte inferior de figura A.2.10). Al aplicar una señal de 5 V en esta terminal, se seleccionará que el motor gire en el sentido de las agujas del reloj (horario). Mientras que si se aplica una señal de 0 V a este pin, se seleccionará que el motor gire en sentido contrario a las agujas del reloj (antihorario).

El motor dará un paso en el sentido seleccionado solamente en el caso de que se aplique un pulso en la terminal llamada CLK marcada con color verde. El paso se dará en el momento que se de la transición de alto a bajo (flanco de caída de la señal). Las señales de control que determinan el sentido de giro de este motor son generadas por la conexión con el microcontrolador secundario.

Otro bloque controlado por el microcontrolador secundario es la interfaz de accionamiento de los contactores para arranque de los motores de la unidad compresora, el ventilador del radiador que enfría el aceite y las válvulas de control de paso de aire y aceite.

Las conexiones marcadas con colores indican los pines del microcontrolador utilizados para realizar la conexión de las interfaces actuadoras con el PIC secundario. Se utilizan cinco pines del puerto D para realizar esta conexión. El pin D0 se encarga de realizar la conexión de la línea de alimentación principal (línea color rojo) para alimentar los motores de la unidad compresora y el ventilador del radiador. Al cerrar el contactor encargado de realizar esta conexión, el motor del ventilador empieza a girar. Para realizar el arranque del motor de la unidad compresora, se tienen dispuestos los pines D1 y D2, los cuales se encargan de controlar los contactores para hacer la conexión estrella y delta para que este motor opere. El pin D1 coloreado con

aranja se encarga de cerrar el contactor que hace la conexión estrella para que este motor arranque, mientras que el pin D2 (color amarillo) realiza el control del contactor que hace la configuración en delta para la corrida del motor.

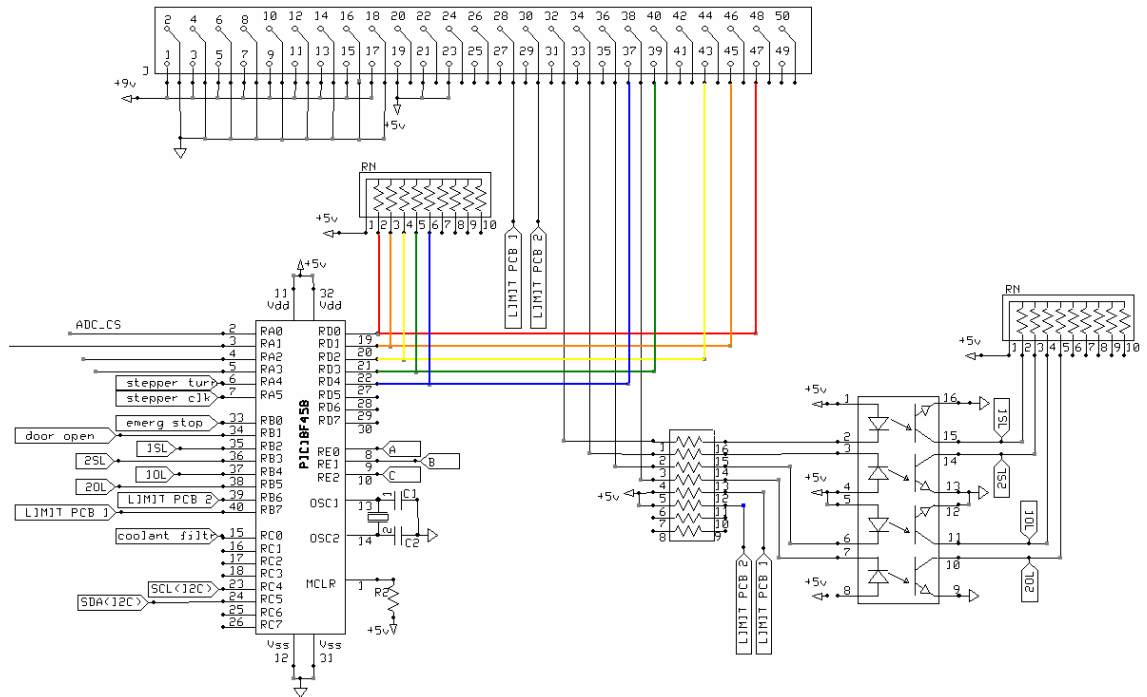


Figura A.2.11 Esquemático de la conexión PIC secundario con Interfaz de potencia.

La línea coloreada con verde esta conectada al pin D3 y se encarga de accionar la válvula de alivio de aire de la unidad compresora, mientras que la conexión al pin D4 (azul) se encarga del control del contactor que controla la válvula de paso del sistema de lubricación del compresor.

Para activar estos dispositivos, en la tarjeta de control se cuenta con una etapa de potencia controlada por triacs, cuyas compuertas se activan a partir de las señales generadas por el PIC secundario.

Como se puede apreciar en la figura A.2.12, la etapa de control que se encarga de activar los contactores y electroválvulas está conformada por un optotriac que recibe la señal del PIC secundario, este optotriac controla la compuerta del triac para que su carga sea alimentada a 120 V_{ac}.

Para evitar problemas de operación, este compresor cuenta con sensores que detectan si se presenta una sobrecarga de los motores además

del estado de los contactores del sistema. Para monitorear estas señales se dispuso de los pines del puerto B del PIC secundario.

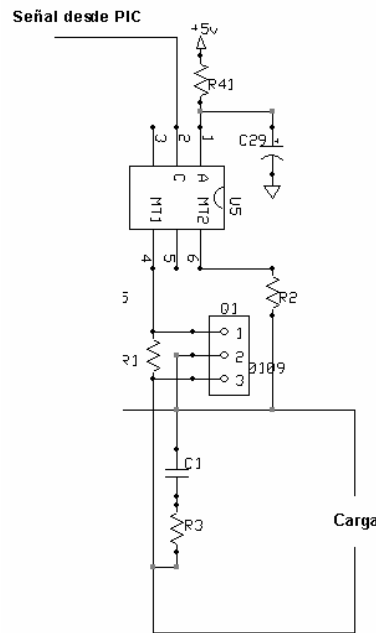


Figura A.2.12 Interfaz de potencia para control de actuadores.

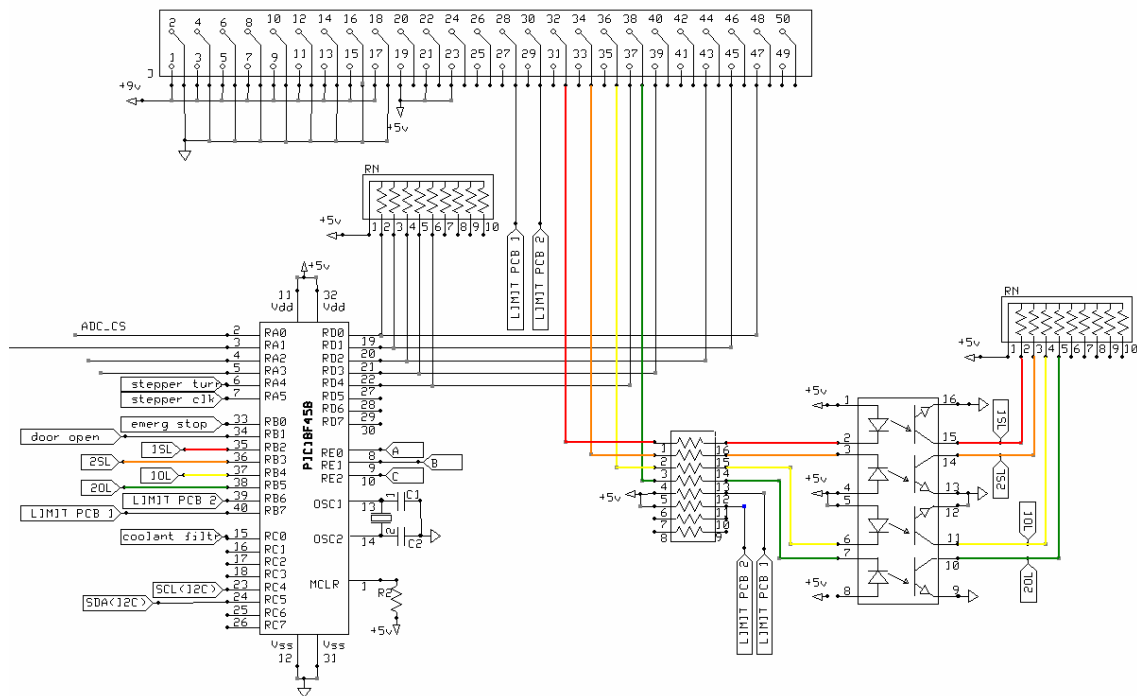


Figura A.2.13 Esquemático de la conexión PIC secundario con Interfaz de potencia.

En el diagrama de la figura A.2.13 se muestran las conexiones realizadas en el PIC secundario para poder monitorear las variables de estado de operación de la etapa de interfaz de potencia del compresor.

El pin B2 se encarga de monitorear el estado de la línea de alimentación, por lo que si por algún motivo se desconecta la alimentación de los motores, el microcontrolador podrá detectarlo.

La conexión marcada con color naranja en el pin B3 tiene a cargo monitorear el estado del contactor de corrida (configuración delta) del motor de la unidad compresora. Por otro lado, se tienen sensores térmicos conectados en la alimentación de los motores de la unidad compresora y el ventilador del radiador. El estado de estos sensores térmicos es monitoreado a través de las señales marcadas con color amarillo y naranja en los pines B4 y B5.

El prototipo de hardware diseñado para llevar a cabo el control de este compresor contempló dos microcontroladores PIC18LF458 y algunos periféricos. El esquemático de este circuito se muestra en la figura A.2.14.

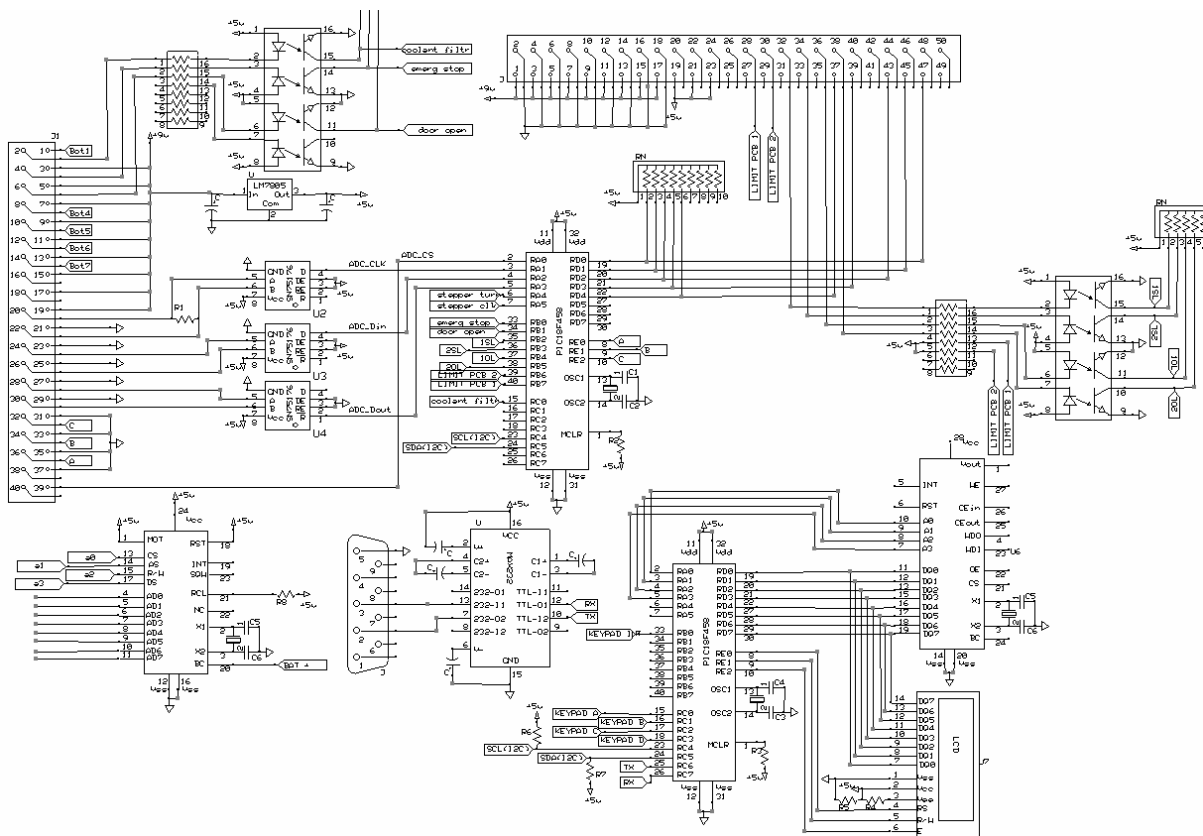


Figura A.2.14 Esquemático del circuito diseñado.

Tal y como se muestra en el diagrama de la figura A.2.14, este convertidor requiere de una interfaz con un microcontrolador o microprocesador para poder operar. Este circuito integrado cuenta con un

pin de selección de chip (\overline{CS}), un pin de reloj (CLK), un pin de datos de entrada y un pin para datos de salida.

Con lo anterior se logró determinar que para tener comunicación con esta tarjeta es necesaria la utilización de 10 señales de las cuales 3 son para la selección del sensor a medir, una es utilizada para monitorear el estado del botón de paro de emergencia, una se usa para revisar el estado de la puerta del panel de control, otra es utilizada para monitorear el estado del filtro del aceite y las cuatro restantes son para el manejo de la adquisición de datos en el ADC.

En la figura A.2.15 se muestra el diagrama esquemático del circuito de la tarjeta de adquisición de variables.

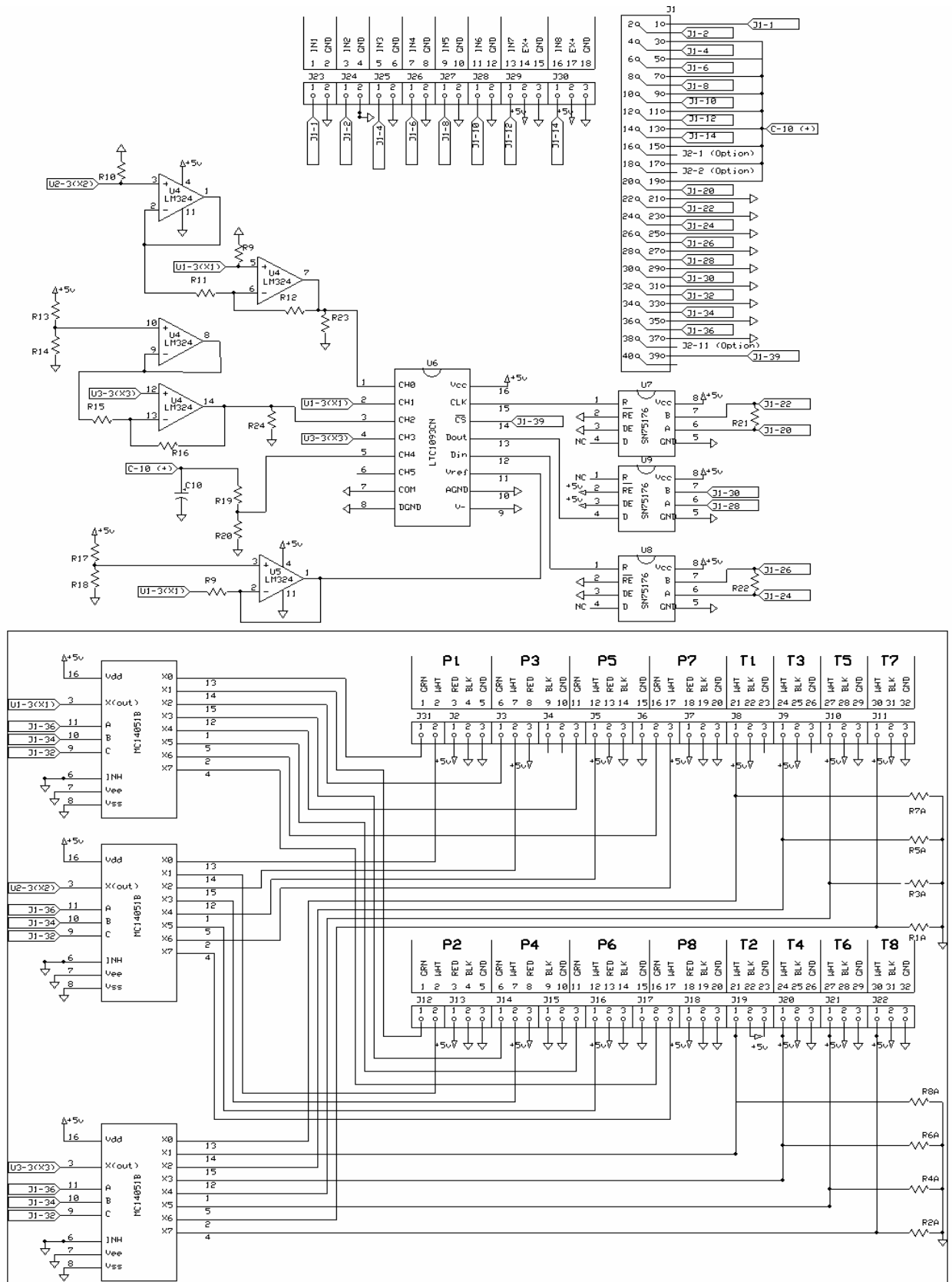


Figura A.2.15 Esquemático de la tarjeta de adquisición de variables.

A.3 Información sobre la institución

A.3.1 Descripción de la institución

Este proyecto tuvo su desarrollo en el Instituto Costarricense de Electricidad, Sector Energía (ICELEC); es una institución autónoma del Estado que tiene como fin el desarrollo racional de las fuentes productoras de energía en Costa Rica, especialmente los recursos hidrológicos y estimular el uso de la electricidad para el desarrollo industrial y mejora de la calidad de vida de sus habitantes. De hecho, una de las funciones del ICE es la construcción de proyectos de generación de energía, operación y mantenimiento de los mismos.

Debido al amplio campo de trabajo de la institución, ésta cuenta con un departamento llamado MET (Maquinas, Talleres y Equipos), el que se dedica a brindar servicios de apoyo en la parte de mantenimiento y diseños mecánicos de equipos, a los proyectos del ICE en el Sector Electricidad.

A.3.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto

El MET partió de la idea de pequeños talleres realizados en la ubicación de cada proyecto en construcción, llamados SETEC (Servicios Técnicos). El objetivo del MET es realizar una centralización de los antiguos SETEC en un punto geográfico fijo, en este caso se realizó en Turrúcares de Alajuela, continuo a la Planta Hidroeléctrica Garita. Todavía se cuenta con pequeños SETEC, en condiciones muy reducidas a las originales, con las que se trabajo durante muchos años, puesto que el MET lleva aproximadamente tres años de haberse fundado, y todavía se encuentra en desarrollo. Por tanto los SETEC existentes pertenecen al MET.

Producción

La función principal del MET es darle un soporte de producción y mantenimiento a los proyectos realizados y los que están en proceso.

En el caso de este departamento se realiza proyectos de desarrollo de equipos los que tendrán como fin satisfacer un objetivo en específico. Por lo

general la producción realizada en este departamento es muy variada, por tanto se dan proyectos pilotos de desarrollo ya sea mecánico, eléctrico, etc.

Mercado

El mercado de este departamento es totalmente interno de la empresa, dado que solamente se enfoca en la producción, investigación y mantenimiento a proyectos pertenecientes al Instituto Costarricense de Electricidad, esto debido a la política de la Institución.

Anexos

Anexo A Periféricos a controlar en la tarjeta de adquisición de datos:

A.1 MC14051B, multiplexor / demultiplexor analógico

Este tipo de multiplexores analógicos son interruptores analógicos controlados digitalmente. Para el control de este dispositivo es necesaria la generación de tres señales que serán decodificadas según sea la necesidad. Estas señales se conectan a los pines A, B y C, y el valor de este dato de 3 bits determina cual será el canal seleccionado para la salida X.

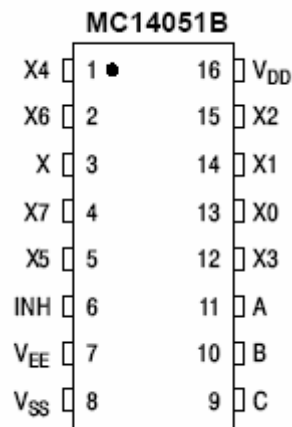


Figura A.1 Diagrama de pines del MC14051B [10].

Tabla A.1 Tabla de tabla de verdad para el MC14051B, MC14052B, y MC14053B [10].

Control Inputs				ON Switches					
Inhibit	Select			MC14051B	MC14052B		MC14053B		
	C*	B	A		Y0	X0	Z0	Y0	X0
0	0	0	0	X0	Y0	X0	Z0	Y0	X0
0	0	0	1	X1	Y1	X1	Z0	Y0	X1
0	0	1	0	X2	Y2	X2	Z0	Y1	X0
0	0	1	1	X3	Y3	X3	Z0	Y1	X1
0	1	0	0	X4			Z1	Y0	X0
0	1	0	1	X5			Z1	Y0	X1
0	1	1	0	X6			Z1	Y1	X0
0	1	1	1	X7			Z1	Y1	X1
1	x	x	x	None	None	None	None	None	None

A.2 LTC1093CN, Sistema de adquisición de datos de 6 canales con entrada y salida digital.

Este dispositivo convierte señales analógicas a digitales con una resolución de 10 bits y permite la extracción de los datos de forma digital por parte de cualquier microprocesador o microcontrolador.

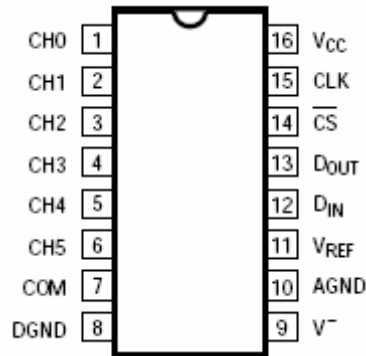


Figura A.2 Diagrama de pines del LTC1093CN [9].

Funciones de los pines LTC1093

- **CH0 a CH5:** entradas analógicas. Las entradas analógicas deben estar libres de ruido respecto a AGND.
- **COM (Pin 7):** el pin común define la referencia a cero para todas las entradas. Debe estar libre de ruido y usualmente se conecta al plano de tierra analógico.
- **DGND (Pin 8):** tierra digital. Esta es la tierra para la lógica interna.
- **V⁻ (Pin 9/Pin 11):** fuente negativa. V⁻ se conecta a la parte negativa del circuito. (Tierra en aplicaciones con fuente unipolar.)
- **AGND (Pin 10):** tierra analógica. AGND.
- **V_{REF} (Pin 11)(LTC1093):** entrada de referencia. La entrada de referencia debe ser aislada de ruido respecto a AGND.
- **D_{IN} (Pin 12):** entrada de datos digital. La palabra de configuración A/D es desplazada en este pin.
- **D_{OUT} (Pin 13):** salida de datos digital. El resultado de la conversión A/D es desplazado como salida.
- **CS (Pin 14):** selección de chip. Un cero lógico en este pin habilita el LTC1093.

- **CLK (Pin 15):** Reloj para desplazamiento de datos. Este reloj sincroniza la transferencia de datos serie.
- **Vcc (Pin 16)(LTC1093):** fuente de alimentación positiva. Esta fuente debe mantenerse libre de ruidos.

Para lograr la comunicación con este dispositivo es necesario generar 4 señales: CS para seleccionar el dispositivo, Din para escribir la palabra de control, Dout para recibir los datos convertidos y CLK para sincronizar los datos tanto de entrada como de salida.

Para controlar este dispositivo se utiliza una palabra de control que es ingresada a través del pin Din. La palabra de configuración se conforma por 7 bits.

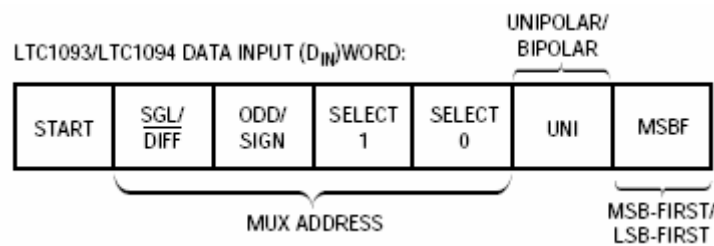


Figura A.3 Palabra de control para obtener los datos del LTC1093CN [9].

Los datos en el pin Din son ingresados con las transiciones de bajada de cada ciclo de reloj. A continuación se hará una descripción de los bits utilizados en la palabra de control.

- **Start:** el primer “uno lógico” ingresado en la entrada D_{in} luego de poner el pin CS en cero es el bit de inicio (Start). Este bit de Start inicia la transferencia de datos. Todos los ceros antes de recibir este bit son ignorados. Luego de recibir el bit Start, los demás bits de la palabra de configuración serán ingresados.
- **Mux Address:** los bits siguientes luego del bit de Start son los que asignan la conversión del multiplexor para la siguiente conversión. Para una selección de canal dada, el convertidor medirá el voltaje entre los dos canales indicados por el signo + y el signo – en la tabla 2. En el

modo de salida única, todos los canales de entrada son medidos con respecto a COM.

Tabla A.2.a Tabla de verdad para la selección de canales a medir en el LTC1093CN [9].

MUX ADDRESS				DIFFERENTIAL CHANNEL SELECTION					
SGL/ DIFF	ODD/ SIGN	SELECT		0	1	2	3	4	5
		1	0						
0	0	0	0	+	-				
0	0	0	1			+	-		
0	0	1	0					+	-
0	0	1	1	NOT USED					
0	1	0	0	-	+				
0	1	0	1			-	+		
0	1	1	0					-	+
0	1	1	1	NOT USED					

Tabla A.2.b Tabla de verdad para la selección de canales a medir en el LTC1093CN [9].

MUX ADDRESS				SINGLE-ENDED CHANNEL SELECTION						
SGL/ DIFF	ODD/ SIGN	SELECT		0	1	2	3	4	5	COM
		1	0							
1	0	0	0	+						-
1	0	0	1			+				-
1	0	1	0					+		-
1	0	1	1	NOT USED						
1	1	0	0		+					-
1	1	0	1				+			-
1	1	1	0						+	-
1	1	1	1	NOT USED						

- MSB-First/LSB-First (MSBF):** los datos de salida del LTC1093 son programados para que salga en la secuencia primero el bit más significativo (MSB-first) o el bit menos significativo (LSB-first) usando el bit MSBF. Cuando el bit MSBF es un “uno lógico”, los datos aparecerán en la salida DOUT presentando el formato MSB-first. “Ceros lógicos” serán colocados siguiendo al último bit de datos. Cuando el bit MSBF es un “cero lógico”, el primer dato a la salida D_{out} será en formato LSB-first y luego de esta secuencia se presenta nuevamente los datos en formato normal MSB-first.

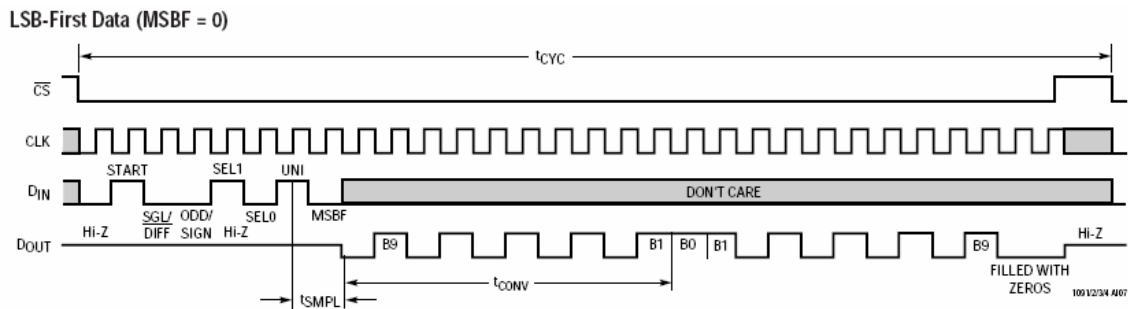


Figura A.4.a. Secuencia de operación del LTC1093CN en modo unipolar con entradas diferenciales (CH4+ y CH5-) y salida en formato LSB-first [9].

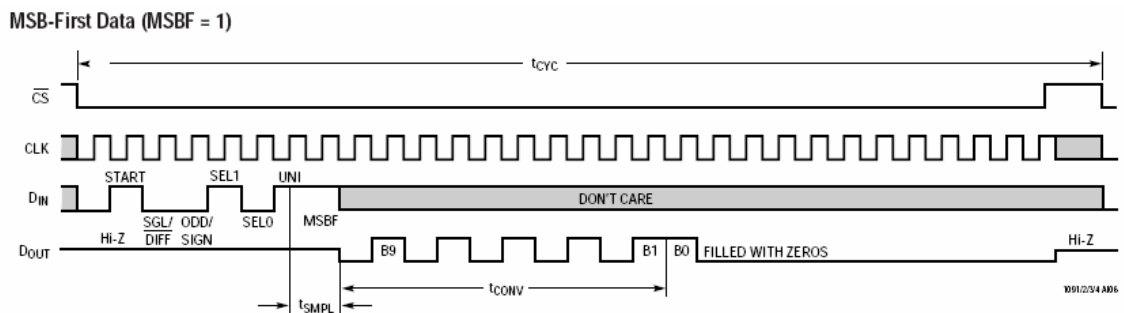


Figura A.4.b Secuencia de operación del LTC1093CN en modo unipolar con entradas diferenciales (CH4+ y CH5-) y salida en formato MSB-first [9].

- Unipolar/Bipolar (UNI):** el bit UNI del LTC1093 determina si la conversión será unipolar o bipolar. Cuando UNI es un “uno lógico”, se llevará a cabo una conversión unipolar en el voltaje de entrada seleccionado. Cuando UNI es un “cero lógico”, resultará una conversión bipolar. El span de entrada y la asignación de código para cada tipo de conversión se muestran a continuación.

Unipolar Output Code (UNI = 1)

OUTPUT CODE	INPUT VOLTAGE	INPUT VOLTAGE ($V_{REF} = 5V$)
1111111111	$V_{REF} - 1LSB$	4.9951V
1111111110	$V_{REF} - 2LSB$	4.9902V
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
0000000001	1LSB	0.0049V
0000000000	0V	0V

Figura A.5.a Span de entrada y asignación de código para conversión bipolar [9].

Bipolar Output Code (UNI = 0) LTC1093/LTC1094 Only

OUTPUT CODE	INPUT VOLTAGE	INPUT VOLTAGE ($V_{REF} = 5V$)
0111111111	$V_{REF} - 1LSB$	4.9902V
0111111110	$V_{REF} - 2LSB$	4.9805V
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
0000000001	1LSB	0.0098V
0000000000	0V	0V
1111111111	-1LSB	-0.0098V
1111111110	-2LSB	-0.0195V
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
1000000001	$-(V_{REF}) + 1LSB$	-4.9902V
1000000000	$-(V_{REF})$	-5.000V

Figura A.5.b Span de entrada y asignación de código para conversión bipolar [9].

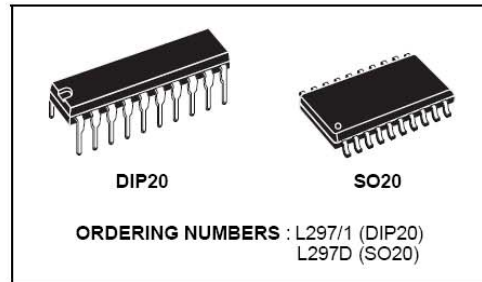
Anexo B. Hojas de datos del controlador del motor paso a paso



L297

STEPPER MOTOR CONTROLLERS

- NORMAL/WAVE DRIVE
- HALF/FULL STEP MODES
- CLOCKWISE/ANTICLOCKWISE DIRECTION
- SWITCHMODE LOAD CURRENT REGULATION
- PROGRAMMABLE LOAD CURRENT
- FEW EXTERNAL COMPONENTS
- RESET INPUT & HOME OUTPUT
- ENABLE INPUT



DESCRIPTION

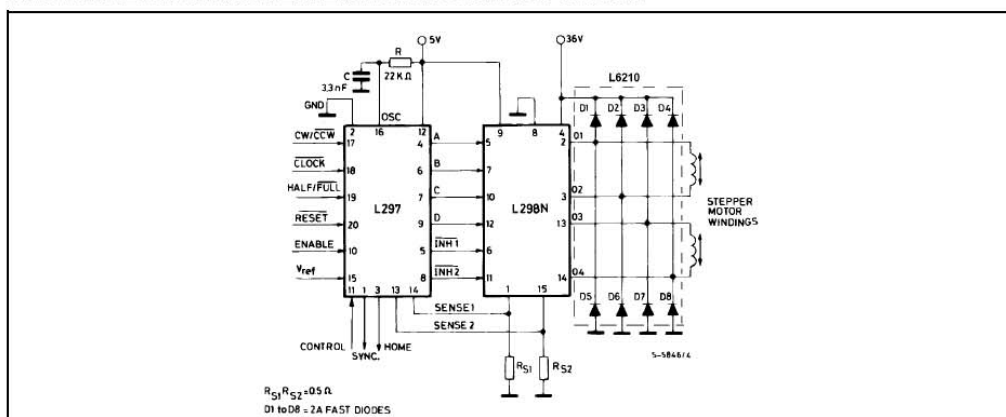
The L297 Stepper Motor Controller IC generates four phase drive signals for two phase bipolar and four phase unipolar step motors in microcomputer-controlled applications. The motor can be driven in half step, normal and wave drive modes and on-chip PWM chopper circuits permit switch-mode control of the current in the windings. A feature of

this device is that it requires only clock, direction and mode input signals. Since the phase are generated internally the burden on the microprocessor, and the programmer, is greatly reduced. Mounted in DIP20 and SO20 packages, the L297 can be used with monolithic bridge drives such as the L298N or L293E, or with discrete transistors and darlingtonts.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_s	Supply voltage	10	V
V_i	Input signals	7	V
P_{tot}	Total power dissipation ($T_{amb} = 70^\circ\text{C}$)	1	W
T_{stg}, T_j	Storage and junction temperature	-40 to + 150	$^\circ\text{C}$

TWO PHASE BIPOLAR STEPPER MOTOR CONTROL CIRCUIT

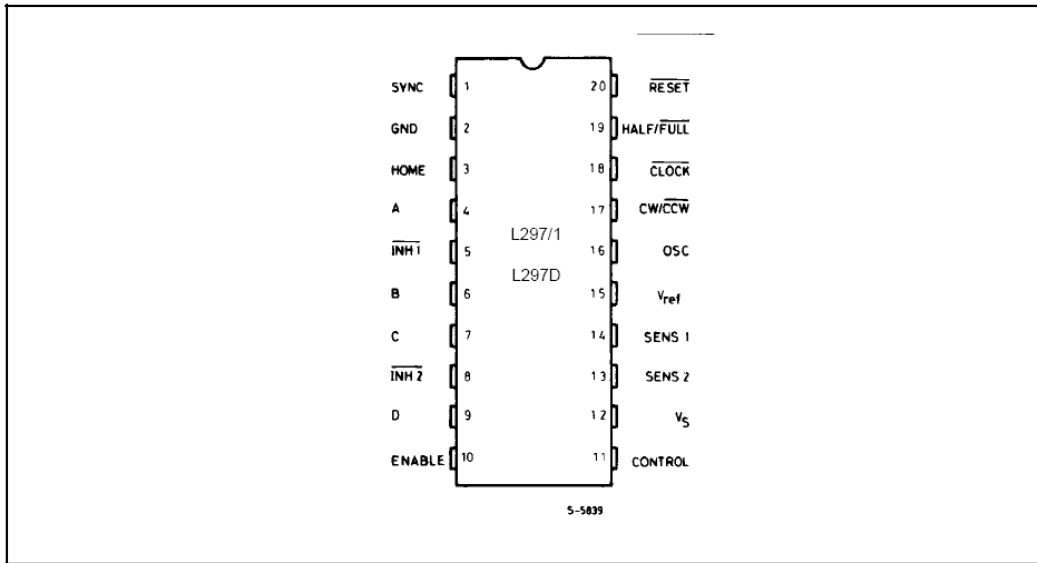


December 2001

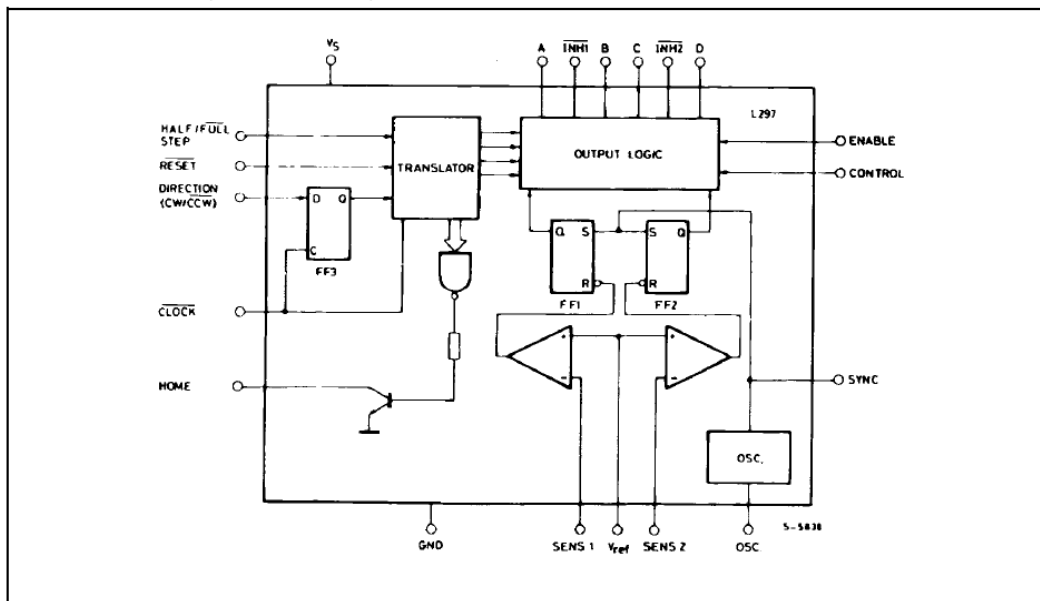
1/11

L297

PIN CONNECTION (Top view)



BLOCK DIAGRAM (L297/1 - L297D)



Anexo C. Hojas de datos del microcontrolador PIC18F458

PIC18FXX8

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	Comparators	CCP/ ECCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI™	Master I ² C™		
PIC18F248	16K	8192	768	256	22	5	—	1/0	Y	Y	Y	1/3
PIC18F258	32K	16384	1536	256	22	5	—	1/0	Y	Y	Y	1/3
PIC18F448	16K	8192	768	256	33	8	2	1/1	Y	Y	Y	1/3
PIC18F458	32K	16384	1536	256	33	8	2	1/1	Y	Y	Y	1/3

Pin Diagrams

