



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO
CON EL MICROCONTROLADOR PIC 16F887, UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA
BLUETOOTH PARA LA SALA DE SERVIDORES DEL CENTRO DE CÁLCULO E
INVESTIGACIÓN EDUCATIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC**

Hugo Leonel Tiul Valenzuela

Asesorado por el Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO
CON EL MICROCONTROLADOR PIC 16F887, UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA
BLUETOOTH PARA LA SALA DE SERVIDORES DEL CENTRO DE CÁLCULO E
INVESTIGACIÓN EDUCATIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HUGO LEONEL TIUL VALENZUELA

ASESORADO POR EL ING. GUILLERMO ANTONIO PUENTE ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. José Antonio de León Escobar
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO
CON EL MICROCONTROLADOR PIC 16F887, UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA
BLUETOOTH PARA LA SALA DE SERVIDORES DEL CENTRO DE CÁLCULO E
INVESTIGACIÓN EDUCATIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 12 de abril de 2013.



Hugo Leonel Tiul Valenzuela

Guatemala, 25 de septiembre de 2014.

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador de Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Guzmán:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO CON EL MICROCONTROLADOR PIC 16F887, UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA BLUETOOTH PARA LA SALA DE SERVIDORES DEL CENTRO DE CÁLCULO E INVESTIGACIÓN EDUCATIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC", desarrollado por el estudiante Hugo Leonel Tiul Valenzuela con carné No. 2004-13386, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
ASESOR
Colegiado 5898

Guillermo A. Puente R.
INGENIERO ELECTRONICO
COL. # 5898



Ref. EIME 45 2014
Guatemala, 30 de SEPTIEMBRE 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO CON EL MICROCONTROLADOR PIC 16F887, UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA BLUETOOTH PARA LA SALA DE SERVIDORES DEL CENTRO DE CÁLCULO E INVESTIGACIÓN EDUCATIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC,** del estudiante **Hugo Leonel Tiul Valenzuela,** que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑADA TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



SRO



REF. EIME 46. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; HUGO LEONEL TIUL VALENZUELA titulado: DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO CON EL MICROCONTROLADOR PIC 16F887, UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA BLUETOOTH PARA LA SALA DE SERVIDORES DEL CENTRO DE CÁLCULO E INVESTIGACIÓN EDUCATIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 15 DE OCTUBRE 2,014.



DTG. 637.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO CON EL MICROCONTROLADOR PIC 16F887, UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA BLUETOOTH PARA LA SALA DE SERVIDORES DEL CENTRO DE CÁLCULO E INVESTIGACIÓN EDUCATIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC**, presentado por el estudiante universitario **Hugo Leonel Tiul Valenzuela**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Decano en Funciones

Guatemala, 12 de noviembre de 2012.

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas sus bendiciones y por ser mi guía en este largo camino hacia la excelencia.
- Mis padres** Ricardo Tiul y Carmelina Valenzuela, por su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida.
- Mis hermanos** Por manifestarme siempre su cariño y apoyo.
- Mi tío** Federico Coy, por ser un ejemplo de vida y superación.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y por permitirme ser parte de esta casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme todas las herramientas necesarias para ser un profesional.
Mis amigos	Por los buenos y malos momentos vividos y por todas las experiencias que compartimos a lo largo de la carrera.
Centro de Cálculo e Investigación Educativa	Por permitirme realizar el diseño del sistema de control de temperatura y detección de humo para su sala de servidores.
Laboratorio de Electrónica	Por darme la oportunidad de laborar como auxiliar de cátedra.
Ing. Byron Arrivillaga	Por brindarme su amistad y la confianza depositada en mi persona.
Mi asesor	Ing. Guillermo Puente, por su amistad y todo su apoyo en la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. GENERALIDADES DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	1
1.1. Elementos principales de un sistema de control.....	2
1.2. Sistemas de lazo abierto	3
1.3. Sistemas de lazo cerrado	4
1.4. Retroalimentación.....	5
1.4.1. Efecto de la retroalimentación en la ganancia global.....	7
1.4.2. Efecto de la retroalimentación en la estabilidad.....	8
1.4.3. Efecto de la retroalimentación en la sensibilidad....	10
1.4.4. Efecto de la retroalimentación sobre el ruido.....	11
1.5. Clasificación de los controladores industriales	13
1.5.1. Control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)	13
1.5.2. Control proporcional	14
1.5.3. Control integral	14
1.5.4. Control proporcional-integral.....	15
1.5.5. Control proporcional-derivativo	15
1.5.6. Control proporcional-integral-derivativo	16

1.6.	Tipos de sistemas retroalimentados.....		17
1.6.1.	Sistemas de control lineales y no lineales		17
1.6.2.	Sistemas de control variantes e invariantes con el tiempo.....		18
1.6.2.1.	Sistemas de control en tiempo continuo.....		19
1.6.2.2.	Sistemas de control en tiempo discreto.....		22
2.	MICROCONTROLADOR PIC 16F887		23
2.1.	Características del PIC16F887		25
2.2.	Procesador.....		26
2.3.	Memoria de programa y datos		28
2.4.	Registros		29
2.5.	Puertos de entrada y salida.....		30
2.6.	Comunicación serial.....		31
2.7.	Módulo oscilador		36
3.	SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMO.....		39
3.1.	Tipos de sensores		40
3.1.1.	Sensores digitales		40
3.1.2.	Sensores análogos.....		41
3.2.	Sensores de temperatura.....		42
3.2.1.	Sensor digital DS18S20		42
3.3.	Sensores de humo		48
3.3.1.	Sensor análogo MQ-2		49

4.	SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INLÁMBRICA DE BAJA POTENCIA BLUETOOTH	55
4.1.	Historia	55
4.2.	Aplicaciones	57
4.3.	Arquitectura y rendimiento.....	58
4.4.	Bandas de frecuencias y canales de RF	61
4.5.	Características físicas.....	61
4.5.1.	Canales físicos	61
4.5.2.	Enlaces lógicos.....	64
4.5.3.	Combinaciones de enlace	65
4.6.	Direccionamiento.....	65
4.7.	Paquetes Bluetooth	66
4.8.	Control de error	67
4.8.1.	Códigos de control de error	67
4.8.2.	Comprobación de error de cabecera	67
4.8.3.	Comprobación de redundancia cíclica.....	68
5.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO	69
5.1.	Antecedentes.....	69
5.2.	Generalidades	70
5.3.	Características del SCTDH.....	72
5.4.	Módulos del SCTDH.....	74
5.4.1.	Módulo PIC16F887.....	74
5.4.2.	Módulo LCD.....	77
5.4.3.	Módulo sensores de temperatura DS18S20.....	81
5.4.4.	Módulo sensores de humo	82
5.4.5.	Módulo Bluetooth.....	83
5.5.	Diagramas y circuito impreso	85

5.6.	Diagrama de flujo	87
5.7.	Programación y grabación del microcontrolador	89
CONCLUSIONES.....		93
RECOMENDACIONES		95
BIBLIOGRAFÍA.....		97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Elementos principales de control	2
2.	Sistema de lazo abierto.....	4
3.	Sistema de lazo cerrado.....	5
4.	Sistema con retroalimentación	6
5.	Sistema con dos lazos de retroalimentación	9
6.	Sistema de retroalimentación con ruido externo	12
7.	Sistema de control de cd en lazo cerrado	20
8.	Sistema de control de ca en lazo cerrado	21
9.	Diagrama de bloques de un sistema de datos muestreados.....	22
10.	Microcontrolador como sistema cerrado	24
11.	Microprocesador como sistema abierto.....	25
12.	Arquitectura Harvard	27
13.	Diagrama de pines del PIC16F887	31
14.	Conexión USART con una PC	32
15.	Conexiones de un sistema SPI	34
16.	Conexiones de un sistema I ² C	35
17.	Señales del bus I ² C	36
18.	Segmentación del código de 64 bits	44
19.	Encapsulado y asignación de pines del DS18S20	45
20.	Conexión en modo parásito	47
21.	Conexión con fuente de alimentación externa	48
22.	Diagrama interno del MQ-2	50
23.	Configuración básica del MQ-2	52

24.	Módulo Bluetooth	56
25.	Red piconet maestro-esclavo	58
26.	Red dispersa.....	59
27.	Transmisión/recepción con <i>slot</i> simple	63
28.	Comparación de <i>slot</i> simple y <i>slots</i> múltiples	63
29.	Diagrama de bloques del SCTDH.....	71
30.	Microcontrolador PIC16F887	74
31.	Conexión básica del PIC16F887.....	75
32.	LCD de 16X2	78
33.	Conexión de LCD con el PIC16F887	80
34.	Sensor DS18S20	81
35.	Conexión de un DS18S20 con el PIC16F887	82
36.	Sensor MQ-2	83
37.	Módulo Bluetooth para microcontrolador	84
38.	Diagrama SCTDH 1	85
39.	Diagrama SCTDH 2	86
40.	Diagrama SCTDH 3	86
41.	Circuito impreso	87
42.	Diagrama de flujo del SCTDH.....	88
43.	Compilador mikroC	90
44.	PICkit 2 Programmer	91

TABLAS

I.	Descripción de pines del DS18S20.....	46
II.	Partes y materiales del MQ-2	51
III.	Especificaciones técnicas del MQ-2	53
IV.	Clases de dispositivos Bluetooth	60
V.	Bandas de frecuencia y canales de RF	61

VI.	Puerto A	76
VII.	Puerto B	76
VIII.	Puerto C	77
IX.	Puerto D	77
X.	Descripción de pines de la LCD	79
XI.	Descripción de pines del módulo Bluetooth	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Ganancia de retroalimentación
S	Ganancia de sensibilidad total del sistema
F	Ganancia negativa
G	Ganancia sin retroalimentación
m	metro
M	Salida del sistema
r	Señal de entrada
e	Señal de error
b	Señal de retroalimentación
n	Señal de ruido
y	Señal de salida

GLOSARIO

Bit	Unidad básica de información correspondiente al sistema binario y que puede tener solo dos valores lógicos.
Byte	Unidad de información utilizada como múltiplo del bit, conformada por 8 bits.
COM	Puerto de comunicación serial.
Compilador	Programa informático capaz de traducir un programa escrito en un lenguaje de programación a otro distinto, generando un programa equivalente capaz de ser interpretado por la máquina.
Controlador	Componente del sistema de control que detecta los desvíos existentes entre el valor medido por un transductor y el valor deseado.
CPU	Unidad central de procesamiento.
CRC	Comprobación de redundancia cíclica.
DB9	Conector serial de 9 pines.

Dongle	Dispositivo que permite transferir datos entre computadoras sin necesidad de usar cables.
Eeprom	Memoria de solo lectura programable y borrable electrónicamente.
Estabilidad	Capacidad de un sistema de control para seguir el comando o señal de entrada.
Flash	Memoria no volátil de bajo consumo y gran capacidad de almacenamiento.
FOSC	Frecuencia del oscilador.
GHz	Gigahertz.
GPR	Registro de propósito general.
Hardware	Conjunto de componentes físicos que integran un computador.
HEX	Código hexadecimal.
HFINTOSC	Oscilador interno de alta frecuencia.
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

I²C	Comunicación serial circuito inter-integrado.
I/O	Entrada/salida.
IP	Protocolo de internet.
ISM	Banda de frecuencia industrial, científica y médica.
Inherente	Concepto utilizado para referirse a una cualidad presente de forma natural, y que resulta imposible desligarse de ella.
Interdependencia	Concepto referente a la dependencia recíproca.
JSON	Formato Java para el intercambio de datos.
KHz	Kilohertz.
LED	Diodo emisor de luz.
LFINTOSC	Oscilador interno de baja frecuencia.
LSB	Bit menos significativo.
Máquina-herramienta	Máquina que se utiliza para dar forma a piezas sólidas como los metales, lo que hace posible fabricar nuevas máquinas.
Mbps	Megabits por segundo.

MHz	Megahertz.
Microcontrolador	Circuito integrado programable de alta escala, capaz de realizar procesos complejos.
Modulación	Técnica que se utiliza para transportar información sobre una onda portadora que, generalmente es de tipo senoidal.
MSB	Bit más significativo.
MSSP	Puerto serial maestro síncrono.
Neumática	Tecnología que utiliza aire comprimido como medio de transmisión de energía, para hacer funcionar un mecanismo.
OSC	Oscilador.
OSCON	Control del oscilador.
Piconet	Tipo de red que comprende un maestro y siete esclavos como máximo.
Perturbación	Tipo de señal no deseada en la entrada y que afecta directamente la salida del sistema.
PIC	Controlador de interfaz periférico.

PC	Computadora personal.
Protocolo	Conjunto de normas y procedimientos que permiten la comunicación entre dos sistemas.
PWM	Modulación por ancho de pulso.
Registro	Pequeña partición de la memoria interna del microcontrolador.
RF	Radiofrecuencia.
RISC	Computador de juego de instrucciones reducido.
Router	Dispositivo capaz de elegir la mejor ruta para la conectividad y transferencia de información en una red.
RS232	Protocolo estándar de comunicación serial.
RX	Receptor.
SCTDH	Sistema de Control de Temperatura y Detección de Humo.
Sensibilidad	Capacidad que tiene un sistema para detectar pequeñas variaciones en la señales de entrada para luego procesarlas.

Sensor	Dispositivo capaz de detectar señales físicas o químicas y convertirlas en señales eléctricas.
SFR	Registro de función especial.
SIG	Grupo con especial interés.
Sincro	Tipo de motor cuyo rotor es capaz de adoptar de forma precisa cierto ángulo que coincide con el ángulo de giro del eje del controlador.
SMD	Dispositivo de montaje superficial.
Software	Conjunto de componentes lógicos que conforman el soporte de un sistema informático.
SOIC	Encapsulado SMD que ocupa menor área.
SPI	Interfaz serial periférica.
SRAM	Memoria estática de acceso aleatorio.
TDD	Multiplexión por división de tiempo dúplex.
TTL	Lógica transistor a transistor.
TX	Transmisor.
UART	Transmisor-receptor asíncrono universal.

USART	Transmisor-receptor síncrono-asíncrono universal.
USB	Bus serie universal.
Wi-Fi	Tecnología inalámbrica para la comunicación entre dispositivos electrónicos.
WiMAX	Tecnología de inalámbrica para transmisión de datos por medio de microondas.
XOR	Operación OR exclusiva.
ZigBee	Conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica de alto nivel para transmisión digital.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como principal objetivo proporcionar el diseño de un sistema de control de temperatura y detección de humo, para la sala de servidores del Centro de Cálculo e Investigación Educativa de la Facultad de Ingeniería, USAC.

En el primer capítulo se describen las generalidades de un sistema de control, así como los elementos que lo componen, también se da una breve introducción a los diferentes tipos de sistemas retroalimentados. De la misma manera se presenta la clasificación de los controladores industriales y se hace énfasis en los efectos que provoca la retroalimentación sobre un sistema de control.

En el segundo capítulo se presentan las características de un microcontrolador, la arquitectura interna de este y los tipos de memoria que se utilizan en la fabricación del mismo. Se describen los tipos de registros internos del microcontrolador, los puertos de entrada y salida, y se da mayor importancia a la comunicación serial, ya que es fundamental conocer los diferentes tipos de comunicación que puede manejar este módulo para la transmisión por medio de cables o inalámbrico.

En el tercer capítulo se da una introducción general de los sensores, aunque hay muchos tipos de sensores, se da prioridad a los de temperatura y humo por ser parte fundamental de este diseño. Asimismo se presentan las especificaciones del sensor digital DS18S20 y del sensor analógico MQ-2.

En el cuarto capítulo se presentan las comunicaciones inalámbricas de baja potencia, una introducción general y la historia de cómo surgió la tecnología inalámbrica Bluetooth, se tratan brevemente temas como la arquitectura, aplicaciones, las bandas de frecuencia de operación y los diferentes métodos que se utilizan para el control de errores en esta tecnología.

En el capítulo final y más importante se plantea el desarrollo y diseño del sistema de control de temperatura y detección de humo, en donde se incluyen diagramas, conexión del microcontrolador, placa de circuito impreso, módulos utilizados, características del sistema, diagrama de flujo, y conexiones de los puertos del microcontrolador.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema para el control de temperatura y detección de humo, utilizando el microcontrolador PIC16F887 y sensores digitales, para el Centro de Cálculo en Investigación Educativa de la Facultad de Ingeniería, USAC.

Específicos

1. Dar a conocer las características principales de un sistema de control.
2. Presentar el microcontrolador PIC16F887 y sus características.
3. Presentar las características de los sensores de temperatura y humo.
4. Dar una introducción a las comunicaciones inalámbricas de baja potencia, Bluetooth.
5. Diseñar el sistema de control de temperatura y detección de humo.

INTRODUCCIÓN

Centro de Cálculo en Investigación Educativa de la Facultad de Ingeniería es la entidad encargada de almacenar y asegurar en sus servidores toda la información de la Facultad de Ingeniería, debido a esto surge la necesidad de automatizar el proceso de control de temperatura del aire acondicionado en su sala de servidores, con la finalidad de convertirse en un centro de datos calificado. El propósito de este trabajo de graduación es plantear una solución a esta necesidad, proporcionando el diseño del sistema de control para esta sala.

Un sistema de control es el conjunto de elementos capaces de regular señales, para luego manipularlas y procesarlas, obteniendo así un resultado deseado; para lograr esto, el sistema necesita de sensores para obtener las señales que va a procesar. Los sensores son dispositivos capaces de detectar distintos tipos de magnitudes físicas o químicas, que luego son convertidas a señales eléctricas.

Los microcontroladores son circuitos integrados que contienen en su interior una pequeña unidad central de proceso, una memoria de programa y otra de datos, estos dispositivos se pueden programar para realizar diversas aplicaciones como procesamiento de señales, además consumen poca energía.

Las comunicaciones inalámbricas, también son bastante utilizadas en los sistemas de control, tal es el caso de la tecnología bluetooth, que además de ser de baja potencia, permite enviar información hacia un computador hasta una distancia máxima de 100 metros, lo cual permite su aplicación en dispositivos electrónicos portátiles.

1. GENERALIDADES DE UN SISTEMA DE CONTROL

Se puede decir, que los sistemas de control han jugado un papel muy importante en el ámbito de la ingeniería y la ciencia, además de su gran importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robóticos y similares; los sistemas de control se han vuelto imprescindibles tanto en los procesos modernos industriales como de manufactura. Por ejemplo, los sistemas de control son esenciales en el control numérico de las máquinas-herramienta de las industrias de manufactura, también en el diseño de pilotos automáticos, en la industria aeroespacial, y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz.

A decir verdad, el hombre no es el único creador de estos sistemas de control; dichos sistemas también existen en la naturaleza misma. Dentro del propio cuerpo humano hay infinidad de sistemas de control, como el páncreas, que se encarga de regular la cantidad de azúcar en la sangre; en situaciones de vida o muerte, se sabe que la adrenalina aumenta conjuntamente con el ritmo cardíaco, y por lo tanto, esto hace que llegue más oxígeno a las células; los ojos siguen un objeto en movimiento para poder mantenerlo visible; las manos toman un objeto y lo colocan de forma precisa en un lugar determinado. De esta forma se pueden mencionar muchos ejemplos, sin embargo, lo importante es tener un concepto sobre qué es un sistema de control.

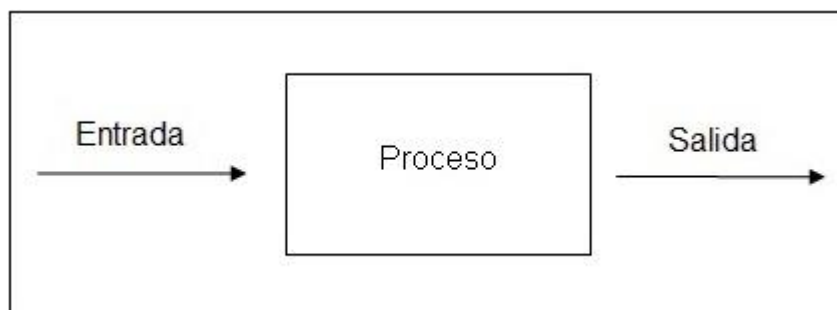
1.1. Elementos principales de un sistema de control

En general, un sistema de control básico está formado por subsistemas y procesos, los cuales se unen con el fin de controlar las salidas de los procesos; para resumir lo anterior se puede afirmar que, para obtener un sistema de control es necesario contar con tres elementos fundamentales, los cuales se mencionan a continuación:

- Entradas/objetivos de control
- Procesos/sistemas
- Salidas/resultados

Hasta el momento se han definido los elementos principales de un sistema de control, pero algo muy importante es la relación que guardan entre sí, las entradas ingresan al sistema para ser procesadas y generar así un resultado, el cual se determina de acuerdo a las necesidades que el sistema requiere. En la figura 1 se ilustra la relación de los elementos de control.

Figura 1. Elementos principales de control



Fuente: elaboración propia.

Debido al comportamiento y funcionamiento de los sistemas de control, pueden clasificarse en dos grandes grupos, los cuales se nombran como sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado. A continuación se da una breve descripción de los mismos.

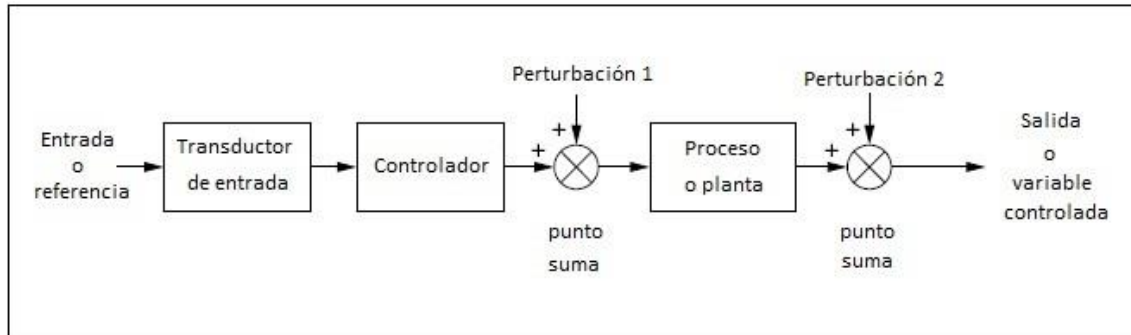
1.2. Sistemas de lazo abierto

Son aquellos que controlan un proceso sin tomar en cuenta el resultado de la salida, en otras palabras, se puede decir, que la acción que realiza el control de un proceso, no se ve afectada por los cambios en la salida sino que únicamente depende de la entrada.

Generalmente, un sistema de lazo abierto tiene la característica distintiva que no puede compensar ninguna perturbación que se sume al control de un proceso, por ejemplo, si el controlador es un amplificador electrónico y la perturbación es ruido, entonces cualquier ruido que ingrese al sistema se sumará y será procesado, corrompiendo de esta forma la salida del sistema.

Cabe mencionar que ningún sistema está libre de perturbaciones, puesto que estas se encuentran de forma inherente en el control de un proceso, muchas veces pueden ser de carácter físico, derivadas del propio diseño o de sus componentes, además pueden presentarse tanto en la entrada como en la salida e incluso dentro del proceso mismo. En la figura 2 se presenta un sistema de lazo abierto.

Figura 2. **Sistema de lazo abierto**



Fuente: NISE, N. *Control Systems Engineering*. p. 8.

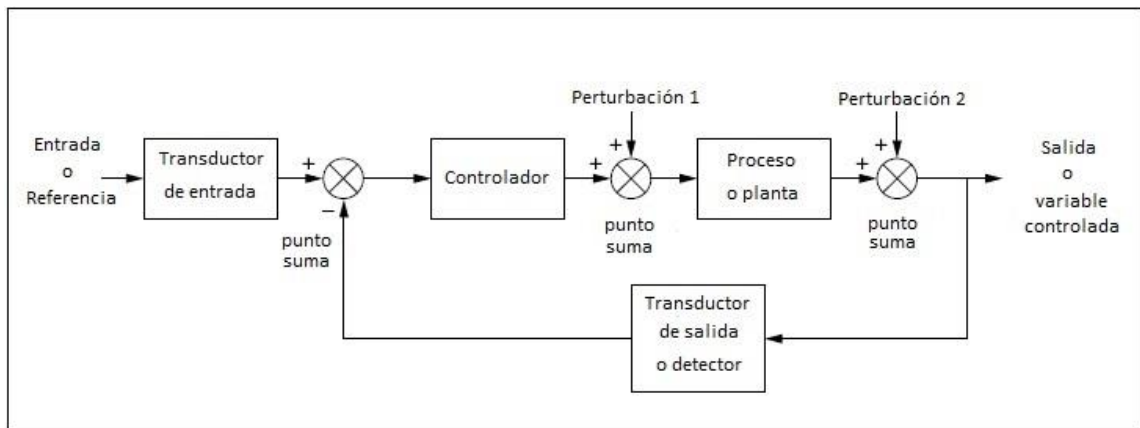
1.3. **Sistemas de lazo cerrado**

Para definir este tipo, se puede tomar como referencia a los sistemas de lazo abierto, los cuales son susceptibles a perturbaciones o ruido, la característica distintiva de un sistema de lazo cerrado, es que se agrega una etapa de retroalimentación de la salida hacia la entrada.

Esta retroalimentación proporciona una señal de error, la cual se define mediante la diferencia de la señal de la salida con la de entrada, esta señal alimenta al controlador con el fin de reducir el error en el sistema. Al utilizar retroalimentación se logra reducir en un gran porcentaje las interferencias provocadas por perturbaciones y, además se logra obtener la salida deseada. Por ejemplo, en un horno tostador ¿cómo sabe alguien que se ha quemado el pan?, simplemente no se sabe, porque el sistema está diseñado para que el pan tostado esté más oscuro mientras más tiempo sea sometido al calor, si se agrega retroalimentación para medir el color del pan y la humedad en la salida, el sistema se convertiría en uno de lazo cerrado.

Los sistemas de lazo cerrado son más confiables que los abiertos, porque permiten controlar los procesos de una forma más eficiente, ya que al agregar una etapa de retroalimentación es posible manipular más variables de control, obteniendo así más precisión y menos ruido en la salida. Sin embargo, muchos sistemas utilizados actualmente son de lazo abierto o cerrado y muchas veces mezcla de ambos, debido a esto al momento de diseñar un sistema se toman en cuenta las características y las aplicaciones para las que es requerido. En la figura 3 se presenta un sistema de lazo cerrado.

Figura 3. **Sistema de lazo cerrado**



Fuente: NISE, N. *Control Systems Engineering*. p. 8.

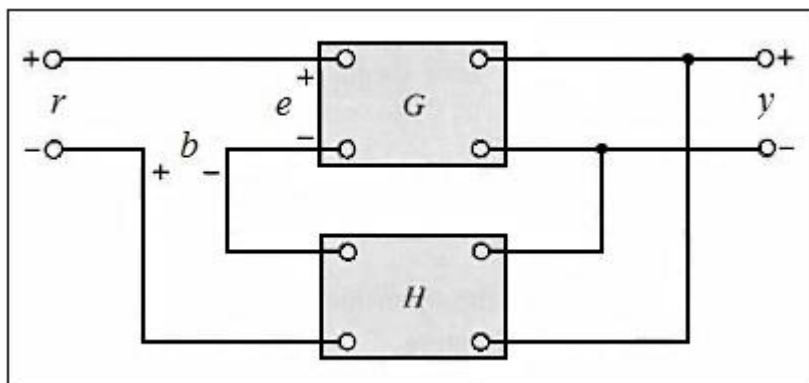
1.4. Retroalimentación

Es el proceso de tomar una muestra de la señal de salida de un sistema, amplificarla, compararla con la señal de entrada y efectuar una suma algebraica de señales, el resultado de esta operación ingresa de nuevo al sistema para obtener así una salida con el menor error posible y más acorde a las necesidades del sistema, para lograr esto es fundamental utilizar un transductor o detector en este proceso.

Como se dio a conocer anteriormente, el motivo de utilizar retroalimentación es para reducir el error entre la entrada de referencia y la salida del sistema, sin embargo, un sistema de retroalimentación es mucho más complejo que esto, debido a que la reducción del error es uno de los efectos que la retroalimentación realiza sobre el sistema.

Generalmente se puede decir, que cuando se produce una secuencia cerrada de relaciones causa y efecto entre las variables de un sistema, es porque existe retroalimentación. Para poder comprender los efectos de la retroalimentación, es de suma importancia examinar el fenómeno de forma más amplia, más adelante se investigarán estos efectos en varios aspectos del funcionamiento de los sistemas, para el análisis es necesario tener conocimientos matemáticos avanzados, sin embargo, para el propósito de este estudio bastará con analizar un sistema simple. En la figura 4 se ilustra el diagrama de un sistema con retroalimentación.

Figura 4. **Sistema con retroalimentación**



Fuente: GOLNARAGHI, F; KUO, B. *Automatic Control Systems*. p. 8.

Donde:

G = ganancia del sistema sin retroalimentación.

H = ganancia de retroalimentación.

r = señal de entrada.

y = señal de salida.

e = señal de error.

b = señal de retroalimentación.

La expresión de salida del sistema viene dada por:

$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1+GH} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

1.4.1. Efecto de la retroalimentación en la ganancia global

Se observa que en la ecuación 1.1, la retroalimentación afecta directamente la ganancia G de un sistema no retroalimentado por medio del factor $1 + GH$. El sistema de la figura 4 es catalogado como un sistema con retroalimentación negativa, esto es debido a que se le asigna un signo menos a la señal retroalimentada. La cantidad GH puede incluir el signo menos, por lo tanto se concluye que el efecto general de la retroalimentación es que puede incrementar o disminuir la ganancia G.

En un sistema muy práctico, G y H son funciones de la frecuencia, lo cual sugiere que la magnitud de $1 + GH$ puede ser mayor que 1 para un intervalo de frecuencia y menor que 1 para otro. Como consecuencia de esto, la retroalimentación puede incrementar la ganancia global del sistema en un intervalo de frecuencia, pero de igual forma reducirla en otro, por esta razón la frecuencia es un factor determinante en los sistemas de control.

1.4.2. Efecto de la retroalimentación en la estabilidad

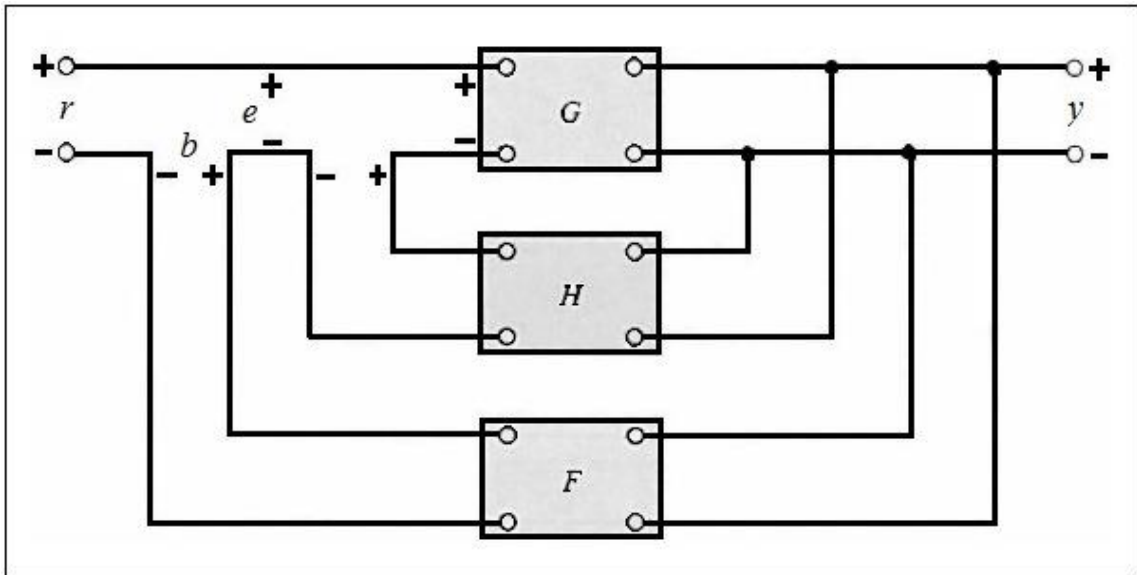
La estabilidad como tal es una idea que puede describir si un sistema tiene la capacidad de seguir el comando de entrada, o en otros términos, si dicho sistema es útil para realizar una tarea específica. En forma concreta, un sistema se dice inestable si sus salidas se salen de control, esto supone que una entrada no es capaz de controlar la salida adecuadamente.

Para hacer un análisis riguroso sobre el efecto de la retroalimentación sobre la estabilidad, se ha de retomar la expresión de la ecuación 1.1. Si se supone $GH = -1$, la salida del sistema tiende a ser infinita para cualquier entrada finita, y se dice que el sistema es inestable. Por lo tanto, se debe establecer que la retroalimentación puede ocasionar que un sistema que originalmente es estable, se convierta en inestable. Es obvio que la retroalimentación es entonces un arma de dos filos, si no se usa correctamente, puede ocasionar daños al sistema.

En general, $GH = -1$ no es la única condición para la estabilidad de un sistema, se puede hacer énfasis en que una de las ventajas de utilizar la retroalimentación, es que puede corregir la inestabilidad de un sistema haciéndolo estable. Se puede demostrar la ventaja de incorporar retroalimentación a un sistema inestable para volverlo estable, suponer que el sistema retroalimentado de la figura 4 es inestable debido a que $GH = -1$. Al introducir otro lazo de retroalimentación por medio de una ganancia negativa F , como se muestra en la figura 5 la relación entrada-salida del sistema total es:

$$\frac{y}{r} = \frac{G}{1+GH+GF} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Figura 5. Sistema con dos lazos de retroalimentación



Fuente: GOLNARAGHI, F; KUO, B. *Automatic Control Systems*. p. 9.

Es evidente que las propiedades de G y H son tales que el sistema retroalimentado de lazo interno es inestable debido a que $GH = -1$, sin embargo, el sistema general puede volverse estable mediante una selección adecuada de la ganancia F de lazo de retroalimentación externo. En un sistema real, GH depende de la frecuencia, de igual forma, la condición para que un sistema de lazo cerrado tenga estabilidad, depende de la magnitud y la fase de GH . Se puede concluir que la retroalimentación puede representar una mejora en la estabilidad o causarle daño si no se aplica de forma correcta. Debido a esto, aunque un diseño matemático cumpla con ciertos parámetros, en la práctica siempre habrá que realizar ajustes de ganancia y retroalimentación.

1.4.3. Efecto de la retroalimentación en la sensibilidad

Actualmente, cuando se diseñan sistemas de control es de gran importancia hacer las consideraciones de la sensibilidad, esto se debe en gran parte a que todos los elementos físicos tienen propiedades que cambian con el ambiente y con la edad, esto no significa que los parámetros de un sistema de control sean estacionarios durante toda la vida útil del sistema.

Por ejemplo, la resistencia del embobinado de un motor eléctrico cambia a medida que la temperatura del motor se eleva durante la operación, otro ejemplo es una máquina de escribir electrónica, algunas veces no funciona correctamente cuando se le enciende por primera vez, este proceso es debido a que los parámetros cambian durante el calentamiento.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede decir que todo sistema de control funcional debe presentar insensibilidad a la variación de parámetros, y sensibilidad a las señales de entrada. Para analizar los efectos de la retroalimentación sobre la sensibilidad a la variación de parámetros, hay que observar de nuevo la figura 4 donde se considera a G como la ganancia de los parámetros y puede ser variable. La sensibilidad de la ganancia del sistema total S , de M con respecto a la variación de G se define como:

$$S \frac{M}{G} = \frac{\partial M/M}{\partial G/G} = \frac{\text{Porcentaje de cambio en } M}{\text{Porcentaje de cambio en } G} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

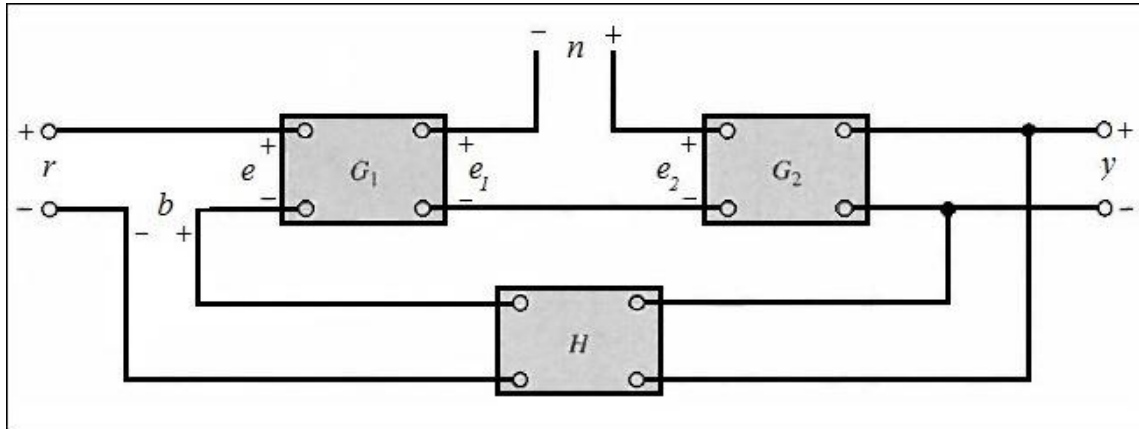
Utilizando la ecuación 1.1 y mediante manipulación algebraica, se puede demostrar que si GH es una cantidad positiva, la magnitud de la sensibilidad se puede hacer bastante pequeña cuando GH se incrementa, no obstante el sistema se mantiene estable.

1.4.4. Efecto de la retroalimentación sobre el ruido

En la práctica, todos los sistemas físicos son susceptibles a señales externas o ruido durante el proceso de operación, ejemplos de tales señales son el voltaje de ruido térmico en circuitos electrónicos y el ruido de conmutación en circuitos eléctricos, también las perturbaciones externas como el viento que tiene acción sobre una antena, o la misma luz del sol puede provocar ruido a un sistema, estos factores pueden tener mucha variedad y ser muy comunes en los sistemas de control.

De esta forma, al diseñar sistemas de control, se deben plantear consideraciones para que el sistema sea en mayor medida inmune al ruido o perturbaciones externas, por otra parte, también debe ser sensible a los parámetros de entrada. El efecto de la retroalimentación sobre el ruido y las perturbaciones tiene una gran dependencia sobre en qué parte del sistema actúan las señales externas, por lo mismo, en muchos casos la retroalimentación puede reducir los efectos del ruido y las perturbaciones en el desempeño del sistema. Para mostrar esto, se hace referencia al sistema de la figura 6 en la que r denota la señal de entrada y n es la señal de ruido.

Figura 6. Sistema de retroalimentación con ruido externo



Fuente: GOLNARAGHI, F; KUO, B. *Automatic Control Systems*. p. 10.

Al analizar el sistema y tomando en cuenta la condición de ausencia de retroalimentación, $H = 0$, y únicamente la acción de n , se puede observar en la salida $y = G_2 n$, por lo que el ruido que ingresa al sistema es amplificado por un factor de ganancia G_2 , provocando así que el sistema no entregue la señal de salida deseada. Si se realiza un nuevo análisis del sistema tomando en cuenta a n y los efectos de la retroalimentación H , se obtiene la ecuación 1.4, donde se puede ver que n también se ve afectado por un factor $1 + G_1 G_2 H$, es claro que todo esto puede cambiar drásticamente dependiendo del diseño y del tipo de sistema por analizar.

$$y = \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} n \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

1.5. Clasificación de los controladores industriales

Los controladores industriales se clasifican de acuerdo con las acciones de control que realizan y se dividen en seis tipos que son:

- De dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)
- Proporcional
- Integral
- Proporcional-integral
- Proporcional-derivativo
- Proporcional-integral-derivativo

1.5.1. Control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente de encendido y apagado, este tipo de control es relativamente barato, es por esta razón que su uso es muy extendido tanto en sistemas de control industriales como domésticos.

Si se supone, que la salida del controlador es $u(t)$ y, que la señal de error es $e(t)$, la señal $u(t)$ permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa, de este modo:

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0 \text{ y } U_2, \text{ para } e(t) < 0.$$

$$U_1 = \text{constante.}$$

$$U_2 = \text{constante de valor mínimo cero o } -U_1.$$

Es muy común que los controladores de dos posiciones sean eléctricos, por ejemplo, válvulas eléctricas, solenoides, relevadores, y en ocasiones se toman en cuenta los controladores neumáticos de dos posiciones.

1.5.2. Control proporcional

Para un controlador con acción proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

En donde K_p se considera como la ganancia proporcional, cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de la operación, el controlador proporcional es en esencia, un amplificador que posee una ganancia ajustable.

1.5.3. Control integral

En un controlador con acción de control integral, el valor de salida del controlador $u(t)$, cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$ y se representa como:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

En donde:

K_i = constante ajustable.

Si se duplica el valor de $e(t)$ el valor de $u(t)$ varía dos veces más rápido, para un error de cero el valor de $u(t)$ permanece estacionario, en ocasiones la acción de control integral se denomina de reajuste (reset).

1.5.4. Control proporcional-integral

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) se define como:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

En donde:

K_p = ganancia proporcional.

T_i = tiempo integral.

Tanto K_p como T_i son ajustables, el tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral T_i se denomina velocidad de reajuste, la velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control, la velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto.

1.5.5. Control proporcional-derivativo

La acción de control de un controlador proporcional-derivativo (PD) se define como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

En donde:

K_p = ganancia proporcional.

T_d = constante denominada tiempo derivativo.

Tanto K_p como T_d son ajustables, la acción de control derivativo en ocasiones se denomina como control de velocidad, esto ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error, el tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo durante el cual, la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. La acción de control derivativo tiene la ventaja de ser de previsión, sin embargo, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador, es por eso que no se utiliza nunca sola.

1.5.6. Control proporcional-integral-derivativo

La combinación de una acción de control proporcional, control integral, y control derivativo se denomina como acción de control proporcional-integral-derivativo (PID). Esta acción combinada tiene la ventaja de la suma de cada una de las tres acciones de forma individual, la ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

En donde:

K_p = ganancia proporcional.

T_i = tiempo integral.

T_d = tiempo derivativo.

Gracias a esta combinación, el control PID es muy utilizado en sistemas de control complejos y en muchas otras aplicaciones industriales.

1.6. Tipos de sistemas retroalimentados

Existe una gran variedad de sistemas retroalimentados, estos a su vez se pueden clasificar dependiendo de su aplicación, análisis, diseño, tipo de señales, las variables que controlan, y de forma más específica de acuerdo al propósito para el que será creado el sistema.

Una clasificación general es la siguiente:

- Sistemas de control lineales y no lineales.
- Sistemas de control variantes e invariantes con el tiempo.

1.6.1. Sistemas de control lineales y no lineales

Al hablar de sistemas lineales se puede inferir que los sistemas lineales no existen en la práctica, esto se debe a que todos los sistemas físicos son inherentemente no lineales en algún grado, por otra parte, los sistemas de control retroalimentados son idealmente fabricados para simplificar el análisis y el diseño.

Sin embargo, muchas veces los sistemas se encuentran limitados en ciertos tramos, lo cual puede considerarse muchas veces como una respuesta lineal.

No obstante, si las señales de entrada sobrepasan estos límites, el sistema ya no podrá considerarse como lineal, por ejemplo, los amplificadores que se utilizan en sistemas de control a menudo presentan un efecto de saturación cuando la señal de entrada es muy grande, también el campo magnético de un motor presenta características de saturación. Entre otros efectos no lineales se pueden mencionar: el juego entre dos engranes acoplados, las propiedades de un resorte no lineal, la fuerza de fricción no lineal, y el par de acción ejercido entre dos elementos en movimiento.

1.6.2. Sistemas de control variantes e invariantes con el tiempo

Un sistema de control retroalimentado se puede considerar invariante con el tiempo, si las señales de entrada son estacionarias durante la operación del sistema con respecto al tiempo. Los sistemas físicos muchas veces contienen elementos que dependen y varían con el tiempo, por ejemplo, la resistencia del bobinado de un motor eléctrico varía cuando el motor es accionado por primera vez y su temperatura aumentará progresivamente, también se puede considerar un sistema de control de un misil guiado en donde la masa decrece conforme el combustible interno se agota durante su vuelo. Por lo tanto, aunque un sistema pueda variar en el tiempo y carecer de no linealidades se puede considerar aún como un sistema lineal.

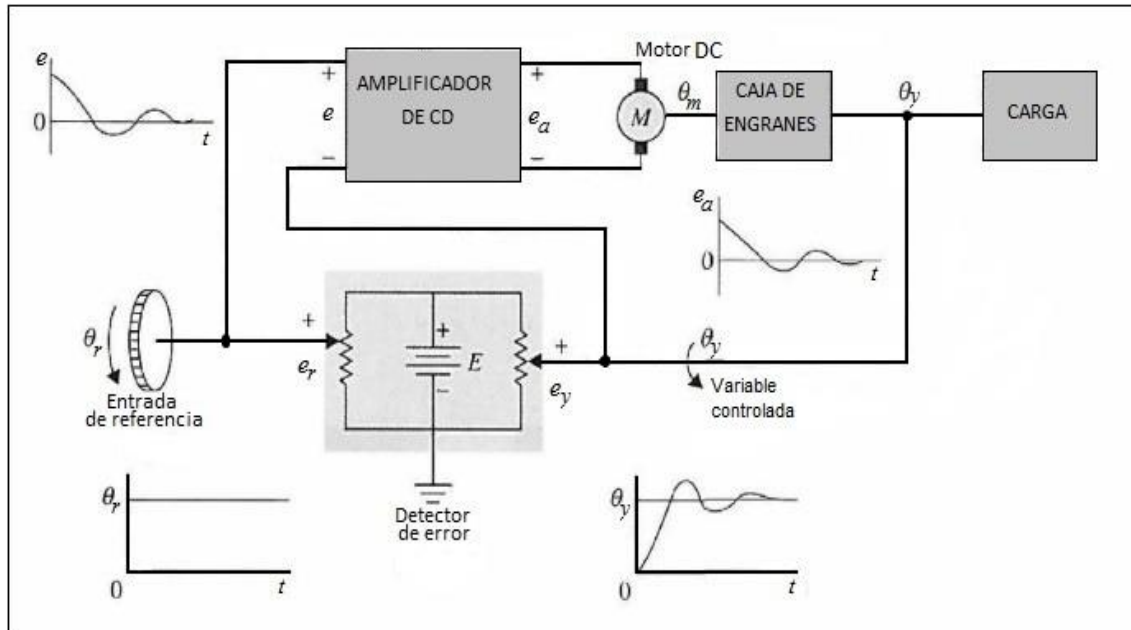
1.6.2.1. Sistemas de control en tiempo continuo

Un sistema en donde todas las señales en varias partes del sistema son funciones de la variable continua, tiempo t , se define como un sistema en tiempo continuo. Las señales en este tipo de sistemas se pueden clasificar como señales de ca o cd, sin embargo, no hay que caer en el error de confundir este tipo de señales con las señales de ca y cd utilizadas en el área de la ingeniería eléctrica, ya que en lo referente a sistemas de control tienen un significado muy diferente.

Al referirse a un sistema de control de ca, generalmente significa que las señales están moduladas mediante algún esquema de modulación, Por otra parte, si se trata de un sistema de control de cd, no significa que todas las señales son unidireccionales, ya que si se presentara este caso no habría ninguna acción correctiva en el sistema de control.

En otras palabras, un sistema de control de cd trabaja con señales no moduladas, sin embargo, aún siguen siendo señales de ca. En la figura 7 se muestra el diagrama de un sistema de control de cd en lazo cerrado.

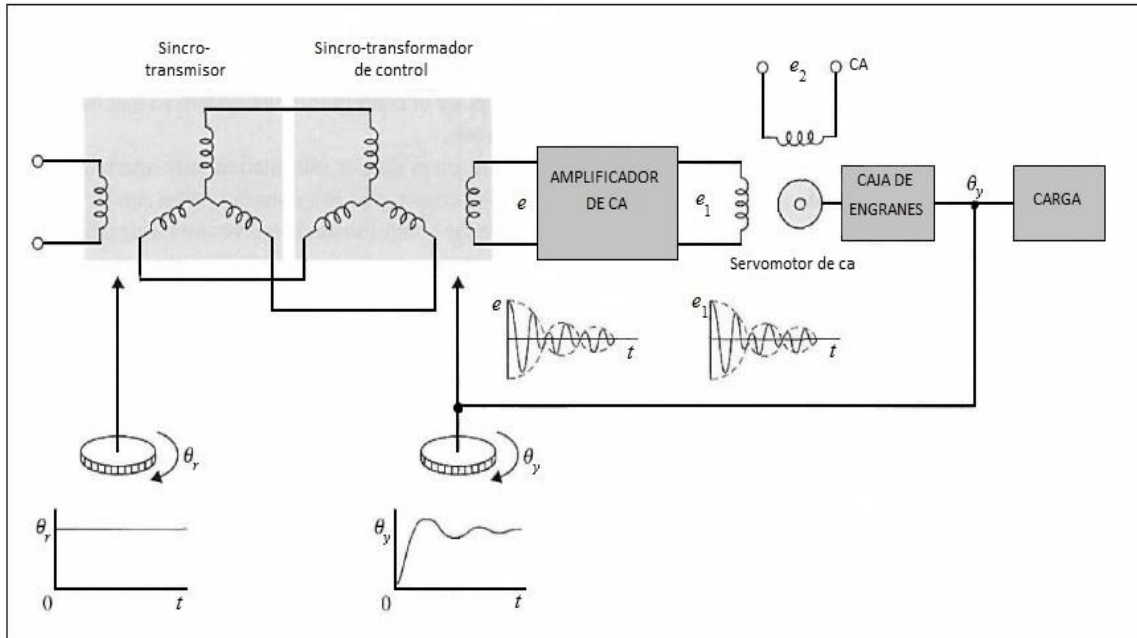
Figura 7. Sistema de control de cd en lazo cerrado



Fuente: GOLNARAGHI, F; KUO, B. *Automatic Control Systems*. p. 13.

En el diagrama se puede observar básicamente que los elementos del sistema de control de cd son: potenciómetros, amplificadores de cd, motores de cd, tacómetros de cd, etc. En la figura 8 se muestra el diagrama de un sistema de control de ca en lazo cerrado, el cual desempeña esencialmente la misma tarea que el de la figura 7, pero la diferencia consiste en que las que actúan en el sistema están moduladas. Lo que significa que la información se transmite mediante una señal portadora de ca, cabe mencionar que las señales moduladas son demoduladas por la característica de filtro paso bajo del motor de ca.

Figura 8. Sistema de control de ca en lazo cerrado



Fuente: GOLNARAGHI, F; KUO, B. *Automatic Control Systems*. p. 13.

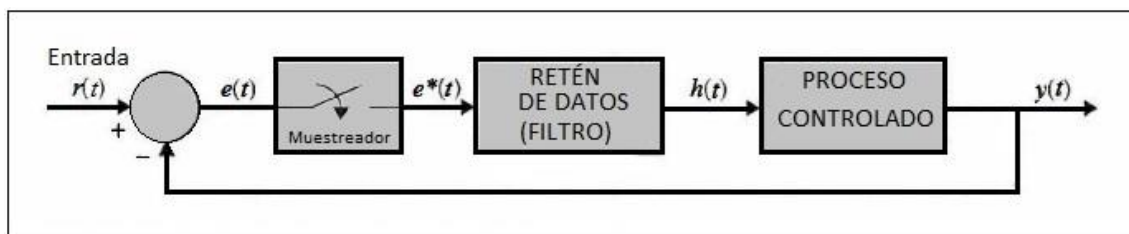
Los sistemas de ca tienen un gran utilidad en aeronaves, es control de misiles, y también en aquellos sistemas donde predominan las perturbaciones y ruido externo, también se puede notar que entre mayor frecuencia tenga la señal portadora, el sistema tendrá mayor inmunidad al ruido en bajas frecuencias, los elementos básicos de un sistema de control de ca son: sincros, amplificadores de ca, motores de ca, giroscopios, acelerómetros, etc. Cabe mencionar que en la práctica, los sistemas de control no se limitan a ser de cd o ca, en la mayoría de casos siempre son una mezcla de ambos tipos, utilizando para esto moduladores y demoduladores para realizar acoples de señal dentro del sistema.

1.6.2.2. Sistemas de control en tiempo discreto

Un sistema de control en tiempo discreto se diferencia de un sistema en tiempo continuo, principalmente, porque las señales de control se presentan en uno o en varios puntos del sistema en forma de pulsos o códigos digitales. Generalmente, este tipo de sistemas se subdividen en dos tipos: sistemas de control de datos muestreados y sistemas de control digital. Los sistemas de control de datos muestreados se refieren, específicamente a que las señales de control se manifiestan en forma de pulsos, por otro lado, un sistema de control digital hace referencia a un ordenador o control digital en el sistema, de tal forma que las señales se encuentran presentes en código digital, como lo es un código binario, hexadecimal, octal, etc.

Un sistema de datos muestreados, recibe la información de forma intermitente y en intervalos de tiempo precisos. En la figura 9 se ilustra el funcionamiento de un sistema de datos muestreados, donde una señal continua $r(t)$ es aplicada al sistema, la señal de error $e(t)$ es muestreada por un dispositivo de muestreo, el cual proporciona a su salida un secuencia de pulsos. Pese a que el muestreo puede o no ser uniforme, existen muchas ventajas de añadir muestreo a un sistema de control.

Figura 9. Diagrama de bloques de un sistema de datos muestreados



Fuente: GOLNARAGHI, F; KUO, B. *Automatic Control Systems*. p. 14.

2. MICROCONTROLADOR PIC 16F887

En general, un microcontrolador es un circuito integrado que tiene todos los componentes de un computador, este se emplea para poder controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Debido a su reducido tamaño es posible incorporarlo en el propio dispositivo al que gobierna, tomando en cuenta esta última característica se le puede llamar: controlador incrustado (embedded controller).

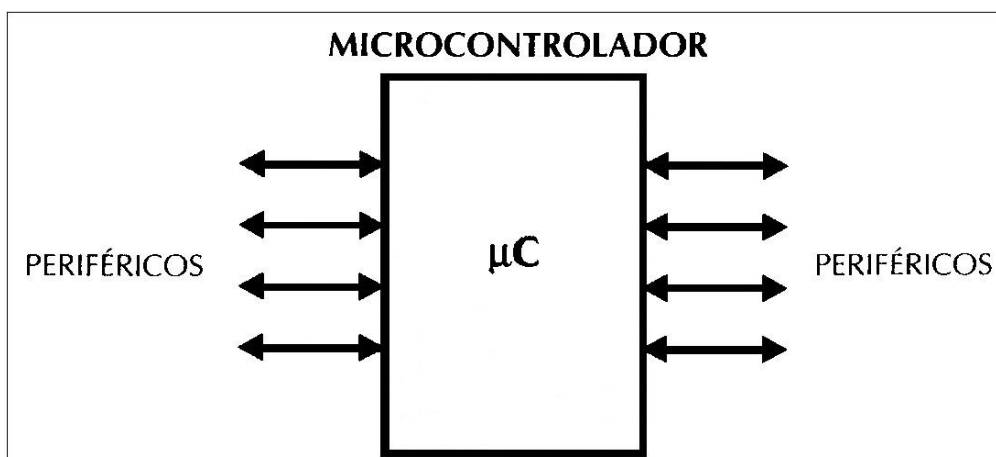
El microcontrolador contiene en su memoria un programa dedicado a gobernar una aplicación determinada, sus líneas de entrada/salida pueden soportar la conexión de sensores, actuadores, así como todos los recursos y complementos disponibles para el dispositivo a controlar, esto tiene como única finalidad cumplir con los requerimientos para los que fue programado. Es comprensible que una vez programado el microcontrolador, solamente sirve para llevar a cabo una tarea asignada.

Hoy en día, existen muchos productos que funcionan con uno o más microcontroladores, estos se pueden encontrar en la mayoría de periféricos de un computador, tales como: el ratón, el teclado, la impresora, y de igual forma en otros dispositivos como los televisores, equipos de audio, lavadoras, hornos, sistemas de vigilancia, equipo médico, etc. Actualmente, los fabricantes y proveedores de servicios, se enfocan cada vez más en el uso de microcontroladores con el fin de realizar dispositivos interactivos, de esta forma logran crear un entorno más agradable para los usuarios.

Al microcontrolador se le conoce también como PIC, este contiene en su interior una CPU, también memoria de programa y memoria temporal, así como las líneas de comunicación internas para poder comunicarse entre los dispositivos internos y la CPU. Existen muchas empresas que se dedican a la manufactura de microcontroladores, pero las siglas PICXXXX hacen mención a la empresa Microchip Technology Inc. Esta empresa es una de las más comerciales en cuanto a la fabricación de estos dispositivos, y esto se debe a la gran variedad de microcontroladores que maneja.

Se puede decir que un microcontrolador es un sistema cerrado, pues contiene un computador completo y de prestaciones limitadas, las cuales no se pueden modificar, en contraste un microprocesador es un sistema abierto con el cual se puede construir un computador, esto se logra agregando periféricos, memoria, y módulos externos para alcanzar un resultado deseado. En la figura 10 se ilustra un microcontrolador como sistema cerrado.

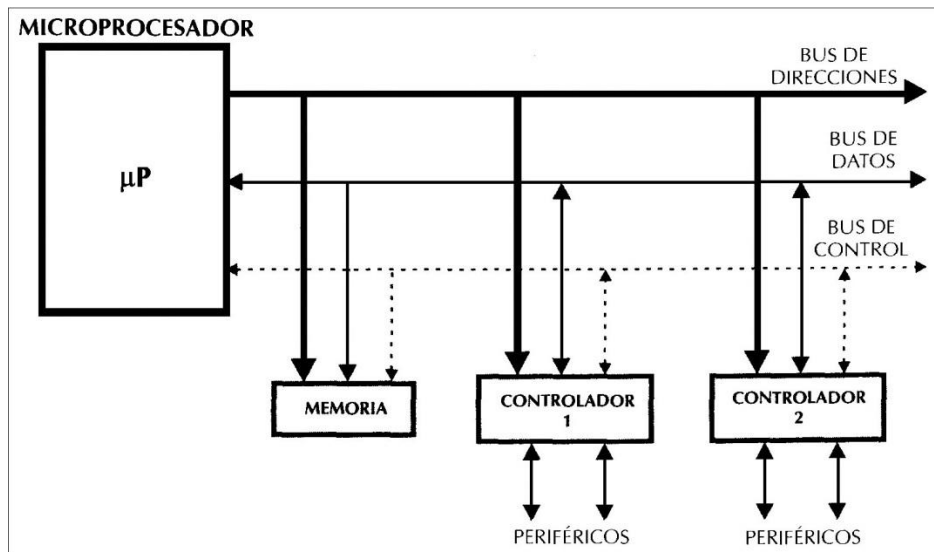
Figura 10. **Microcontrolador como sistema cerrado**



Fuente: ANGULO USATEGUI, J; ANGULO MARTÍNEZ, I. *Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones Primera Parte PIC16F84.* p. 4

En la figura 11 se ilustra un microprocesador como sistema abierto, en ella se puede observar la memoria, controladores y buses de comunicación, así como las conexiones de los periféricos.

Figura 11. **Microprocesador como sistema abierto**



Fuente: ANGULO USATEGUI, J; ANGULO MARTÍNEZ, I. *Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones Primera Parte PIC16F84*. p. 3.

2.1. Características del PIC16F887

El PIC16F887 pertenece a la familia de microcontroladores de 8 bits, esto significa que su bus de datos cuenta con 8 líneas de comunicación, también posee características físicas que no pueden alterarse, tal es el caso de la CPU, memoria no volátil para almacenar el programa y memoria de lectura y escritura, para guardar datos, asimismo, cuenta con puertos de comunicación y protocolos de transmisión serial, registros internos de propósito general, de funciones especiales, etc.

A continuación se presentan los recursos internos del microcontrolador PIC16F887, sin embargo, para fines prácticos solo se describirán algunos de ellos.

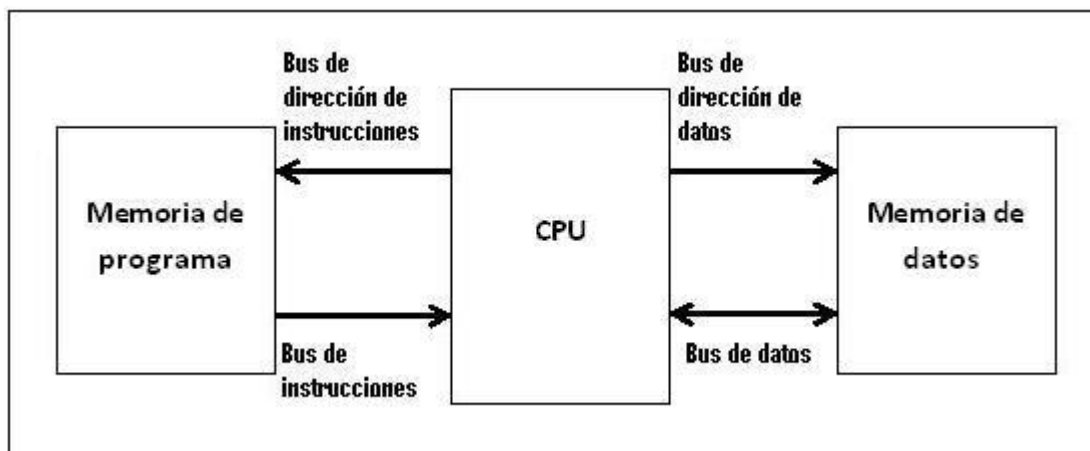
- Encapsulado PDIP de 40 pines.
- Pin de reset.
- 35 pines I/O con control de dirección individual.
- Módulo con comparador análogo con voltaje de referencia programable.
- Conversor análogo digital con 10 bits de precisión y 14 canales.
- Módulo PWM con resolución de captura de 16 bits.
- Mejora del módulo USART y UART, el cual incluye la comunicación SPI e I²C.
- Memoria de programa Flash de 8192 palabras.
- Memoria de datos dividida en 368 bytes en la SRAM y 256 bytes en la EEPROM.
- Reloj de externo hasta 20 MHz, y reloj precisión interno programable.
- Alimentación con 5V DC.

2.2. Procesador

El procesador del PIC16F887 se basa en la arquitectura Harvard, este tipo es un estándar para todos los microcontroladores, su definición es muy simple, ya que consiste en tener dos memorias independientes, es decir que se tiene una memoria para el programa y otra para datos, estas memorias a su vez se conectan a la CPU por medio del bus de direcciones, y bus de datos.

El bus de direcciones se encarga de ubicar la casilla de memoria donde se va a realizar alguna operación, por lo tanto, este tipo de bus es únicamente unidireccional, el bus de datos tiene la cualidad de ser bidireccional y debido a esto es posible utilizarlo como medio de transporte de datos, ya sea ingresando o extrayendo datos al PIC. En la figura 12 se presenta el diagrama de la arquitectura Harvard.

Figura 12. **Arquitectura Harvard**



Fuente: elaboración propia.

En los microcontroladores modernos el procesador se rige conforme la arquitectura RISC, esta se caracteriza por poseer un repertorio de instrucciones pequeño y simple, de forma que la mayor parte de las mismas se ejecuta en un ciclo de instrucción, el cual se define como la cantidad de tiempo requerido para realizar una tarea, como resultado se logra un aumento en el rendimiento del computador, simulando una segmentación del procesador, descomponiéndolo en varias etapas para poder procesar una instrucción diferente en cada una de ellas, de esta forma se logra un efecto de paralelismo.

2.3. Memoria de programa y datos

El PIC16F887 está diseñado para que en su memoria de programa se almacenen todas las instrucciones de la aplicación deseada, debido a que el programa a ejecutar es siempre el mismo, se requiere un almacenamiento de forma permanente, por otra parte, en la memoria de datos hay una variación continua debida al manejo del programa, esto implica que se deben guardar o borrar nuevos datos en la memoria, realizando así una tarea de lectura y escritura, los tres tipos de memoria que utiliza son: EEPROM, FLASH y SRAM.

- Memoria EEPROM: es grabada por parte del usuario a través de un dispositivo físico gobernado desde un computador, esta memoria puede ser programada y borrada tantas veces como sea necesario, algunos fabricantes garantizan 1 000000 de ciclos de escritura/borrado, debido a esta característica es posible utilizar la EEPROM como memoria de programa o también de datos.
- Memoria FLASH: no volátil y de bajo consumo, en ella se puede escribir y borrar al igual que en una memoria EEPROM, pero se diferencia en que tiene mayor capacidad de almacenamiento que esta última, sin embargo, el borrado se realiza sobre bloques completos y no sobre posiciones concretas, en estas memorias se garantiza hasta 1 000 ciclos de escritura/borrado, además se recomiendan para aplicaciones donde es necesario modificar el programa a lo largo de la vida útil del dispositivo, actualmente los fabricantes de microcontroladores están optando por sustituir la memoria EEPROM por una FLASH debido a sus características.

- Memoria SRAM: que se traduce como memoria estática de acceso aleatorio, debido a que los datos que manejan los programas varían continuamente y los mismos deben estar almacenados en alguna ubicación, surge la necesidad de utilizar una memoria de lectura y escritura, por lo cual la memoria RAM estática es la más adecuada para esta tarea, ya que los datos se mantienen disponibles de forma temporal y al momento de requerir nuevos datos los anteriores pueden ser borrados. En algunos microcontroladores se ha empezado a sustituir la SRAM por una memoria EEPROM.

2.4. Registros

Los registros son pequeñas particiones de la memoria interna del microcontrolador, son capaces de almacenar datos de 8 o 16 bits, estos registros se encuentran en la memoria de datos interna del microcontrolador y se dividen en dos categorías que son: registros GPR y registros SFR.

Los registros GPR del PIC16F887 están organizados en 368 x 8, es decir 368 registros de 8 bits cada uno, los cuales sirven para almacenar datos temporales, tales como resultados de operaciones aritméticas o direcciones de memoria, se puede acceder a ellos por medio de un archivo selector de registros y son comúnmente manipulados cuando se programa en lenguaje ensamblador.

Los registros SFR del PIC16F887 son utilizados por la CPU y las funciones periféricas, además de realizar de la forma deseada la operación y el control de los diversos dispositivos, estos registros son configurables por medio de software y se encargan de manipular todos los módulos del microcontrolador, por ejemplo: PORT, TRIS, OSCCON, etc.

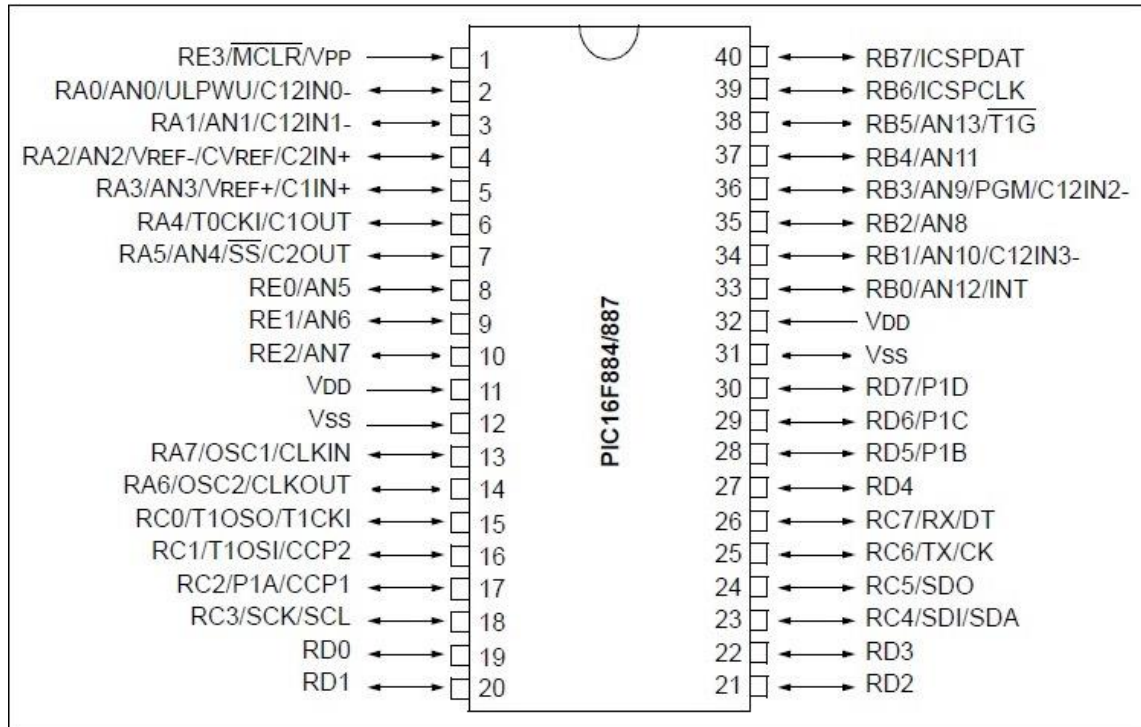
2.5. Puertos de entrada y salida

El PIC16F887 posee diferentes pines para comunicarse al exterior llamados puertos de entrada y salida, asimismo, hay pines para alimentación, para el cristal que regula la frecuencia de trabajo, y también para el reset, sin embargo, los más importantes son los puertos I/O, porque permiten la comunicación con el mundo físico, estos pines se encuentran divididos en cinco puertos: A, B, C, D, y E, cada uno cuenta con 8 bits a excepción del puerto E que contiene 4 bits, en este último uno de estos pines se reserva para el reset, dando como resultado 35 pines I/O disponibles.

Cada uno de los puertos puede ser configurado como I/O dependiendo de la aplicación para la que se haya diseñado el programa, además, cada uno de los bits del puerto se identifica por medio la nomenclatura RXX, por ejemplo: RB0 (bit 0 del puerto B). Para declarar el puerto que se va a utilizar es necesario asignarle un valor por medio del registro PORT, ejemplo: PORT A = 1 que inicializa el puerto con un valor de 1.

Para definir el puerto como entrada o salida se utiliza el registro dedicado TRIS, si se quiere utilizar el puerto como entrada se define el puerto con un 1 y si se requiere como salida se utiliza un 0, por ejemplo: TRISA = 1 significa entrada, y TRISA = 0 significa salida; de la misma forma es posible utilizar los demás puertos, uno a la vez o de forma simultánea, en la figura 13 se ilustra el diagrama del pines del PIC16F887.

Figura 13. Diagrama de pines del PIC16F887



Fuente: Microchip. *PIC16F887 Data Sheet*. p. 6.

Al analizar el diagrama anterior, resulta obvio que la mayoría de pines tienen más de una función, y es por eso que los microcontroladores pueden ser utilizados en muchas aplicaciones, las cuales quedan a la imaginación y diseño del programador.

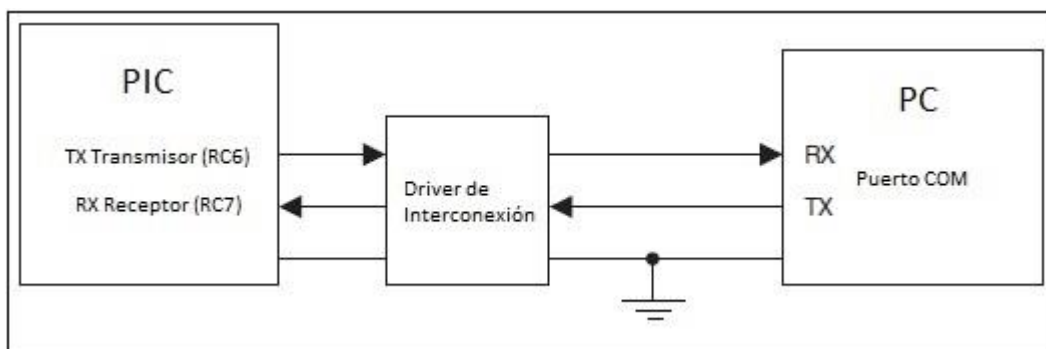
2.6. Comunicación serial

El módulo USART provee un sistema básico de comunicación serial, el cual fue diseñado para la comunicación entre dispositivos simples con un computador principal, y además fue adoptado como el puerto COM de una PC.

Este puerto tiene la capacidad de convertir una transmisión de bajo a alto voltaje, lo que permite una comunicación de datos a mayor distancia, esto es mejor conocido como protocolo RS232 y se caracteriza por utilizar un puerto DB9 y, por operar con líneas de voltaje típico de +/- 25V y +/- 12V, siendo el último el más utilizado, también se puede utilizar para la conexión de la programadora del PIC con la PC.

En el PIC16F887 se puede acceder al módulo USART a través de los pines RC6 y RC7, el mismo tiene dos modos de operación, el síncrono utiliza un reloj por separado, y el asíncrono no utiliza reloj, este último es el más utilizado, ya que cuando se trabaja en este modo, el pin RC6 actúa como RX y RC7 como TX, por lo general se transmiten palabras de 8 bits enviando primero el bit LSB y al final el bit MSB, la frecuencia de reloj para la transmisión es de 9 600 baudios, lo que significa que aproximadamente se transmiten 10K bits/segundo. En la figura 14 se ilustra la conexión USART con una PC.

Figura 14. **Conexión USART con una PC**



Fuente: elaboración propia.

El módulo MSSP proporciona dos tipos principales de comunicación: SPI e I²C. Estos protocolos se utilizan para la comunicación entre procesadores y dispositivos periféricos más lentos dentro de un sistema sencillo. SPI es más simple y más rápido, ya que solo necesita de un sistema físico de direcciones. I²C es mucho más complejo debido a que se trata de un sistema de direcciones por medio software.

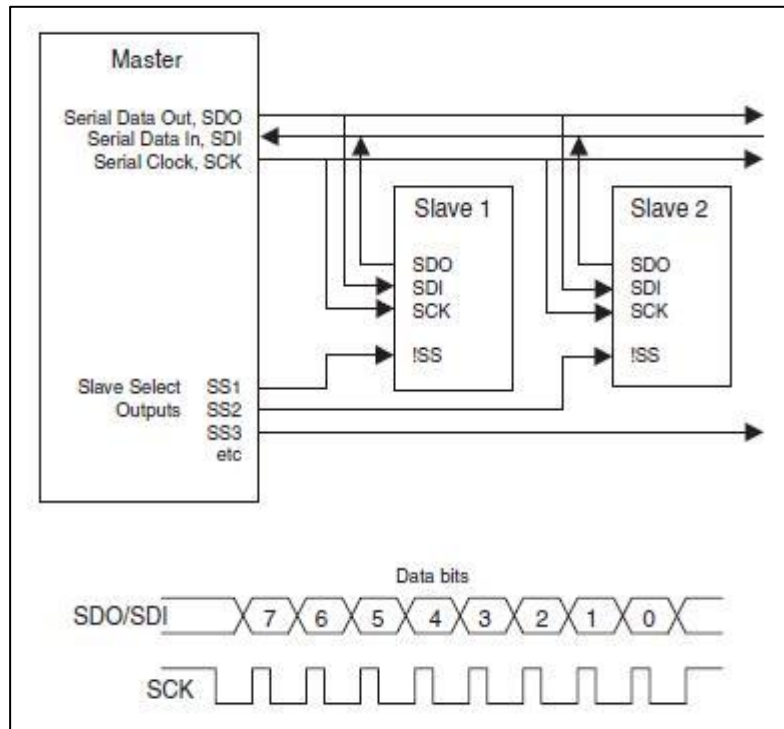
SPI es un protocolo síncrono que posee una conexión de reloj por separado para poder enviar y recibir paquetes de datos de 8 bits, la forma en que funciona consiste en utilizar un procesador como maestro, el cual envía una señal de reloj que sirve para enviar y recibir datos a los demás dispositivos que actúan como esclavos, tanto el procesador como el esclavo se conecta a una señal de reloj para sincronía, una para entrada de datos, otra para salida de datos y una para seleccionar el dispositivo a utilizar.

Las señales SPI en el PIC16F887 se listan a continuación:

- Serial Clock (SCK), reloj serial en el pin RC3
- Serial Data In (SDI), entrada de datos serial en el pin RC4
- Serial Data Out (SDO), salida de datos serial en el pin RC5
- Slave Select (!SS), selección de esclavo en el pin RA5

En la figura 15 se presenta el diagrama de conexiones y señales de un sistema SPI, el cual contiene un maestro y dos esclavos, así como las líneas de transferencia de datos y selector de esclavo, también es posible agregar más esclavos como sea necesario.

Figura 15. **Conexiones de un sistema SPI**



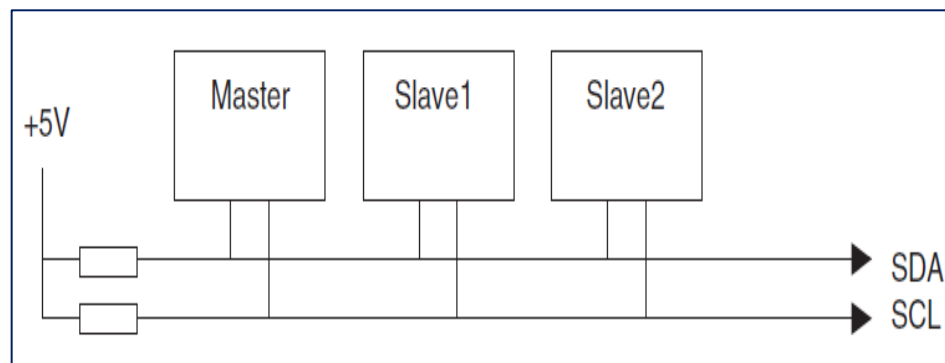
Fuente: BATES, M. *Interfacing PIC Microcontrollers. Embedded design by interactive simulation.*
p. 208.

I²C es un módulo serial más versátil debido al método que utiliza para transferencia de datos, ya que para ello necesita únicamente dos señales conectadas a un bus de datos, tales señales son línea de reloj (SCL pin RC3) y línea de datos (SDA pin RC4), este sistema permite nuevamente contar con un dispositivo maestro y hasta 1 023 dispositivos esclavos, que pueden ser microcontroladores, memorias, convertidores análogos, etc. Por ejemplo, se ha vuelto común querer expandir la memoria no volátil de un microcontrolador, y para esto se utiliza una memoria EEPROM conectada de forma externa por medio del módulo I²C.

El funcionamiento de I²C es el siguiente: se asigna una dirección a cada dispositivo esclavo, luego se envía por SDA un estado lógico 0 para inicio del bus, seguido de esto se envía una trama de 8 bits, en ella se incluyen 7 bits de dirección y 1 de lectura/escritura, luego todos los esclavos leen el pulso de inicio y la trama de datos, si un dispositivo lee su dirección envía como respuesta otro pulso en estado lógico 0 para comunicarse con el maestro y de esta forma dar inicio a la comunicación entre los dispositivos, después de esto las tramas son exclusivamente de datos correspondientes a 8 bits, para finalizar la comunicación el dispositivo esclavo envía al maestro un estado lógico 0 por medio de SDA.

Para indicar cuándo se va a leer un dispositivo se envía un 1 lógico, y para escribir se envía un 0 lógico, los dispositivos I²C traen una dirección proporcionada por el fabricante, muchas veces puede ser la dirección completa de 7 bits o bien una dirección segmentada, por ejemplo, una dirección de 4 bits y los 3 restantes son configurables por el usuario. En la figura 16 se ilustra el diagrama de conexiones de un sistema I²C, y en la figura 17 las señales I²C.

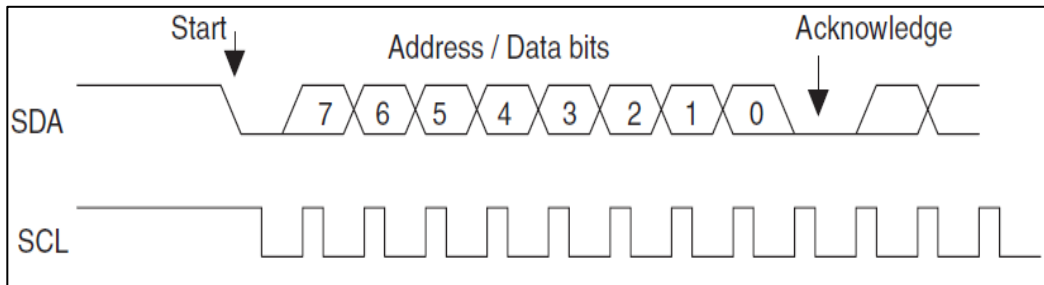
Figura 16. **Conexiones de un sistema I²C**



Fuente: BATES, M. *Interfacing PIC Microcontrollers. Embedded design by interactive simulation.*

p. 212.

Figura 17. **Señales del bus I²C**



Fuente: BATES, M. *Interfacing PIC Microcontrollers. Embedded design by interactive simulation.*
p. 212.

2.7. **Módulo oscilador**

El módulo del PIC16F887 tiene una gran variedad de fuentes de reloj y una selección de características que le permiten ser utilizado en un gran rango de aplicaciones, maximizando el funcionamiento y minimizando el consumo de energía. Las fuentes de reloj pueden ser configuradas por osciladores externos, cristales resonadores de cuarzo, resonadores de cerámica, y circuitos resistor-capacitor (RC), además de esto, la fuente de reloj del sistema puede ser configurada por uno de los dos osciladores internos, en los cuales se puede seleccionar la velocidad por medio de software.

Entre otras características adicionales se puede mencionar la selección de la fuente de reloj externa o interna por medio de software, dos modos de velocidad de arranque para minimizar la respuesta entre la ejecución del código y el oscilador externo, y por último, un monitor de reloj que al detectar una falla en la fuente de reloj externa, cambia automáticamente al oscilador interno del PIC.

El módulo oscilador se puede configurar en uno de ocho modos posibles, los cuales se mencionan a continuación:

- EC – señal de reloj de un sistema externo.
- LP – cristal de bajo poder a 32 KHz.
- XT – cristal o resonador cerámico de ganancia media.
- HS – cristal o resonador cerámico de ganancia alta.
- RC – circuito externo resistor-capacitor, con entrada en OSC1 y salida Fosc/4 en OSC2, donde Fosc es la frecuencia del oscilador.
- RCIO – circuito externo resistor-capacitor, sin salida de reloj en OSC2.
- INTOSC – señal de reloj interna, con salida de reloj Fosc/4 en OSC2.
- INTOSCIO – señal de reloj interna, sin salida de reloj en OSC2.

Estos modos de reloj son configurados por medio de los registros dedicados FOSC, OSCON, HFINTOSC, y LFINTOSC. Es importante mencionar que cuando se utiliza el reloj interno en el modo INTOSC, el pin OSC1 puede ser utilizado como pin de I/O, y en el modo INTOSCIO, tanto el pin OSC1 como OSC2 se pueden utilizar como pin I/O.

3. **SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMO**

En general, un sistema de medición electrónico consta de varios componentes que se utilizan para realizar una medida y registrar un resultado, dicho sistema cuenta con tres dispositivos: de entrada, de procesamiento y de salida. El de entrada recibe la cantidad a medir y envía una señal eléctrica proporcional al dispositivo de encargado de procesarla, luego de esto, la señal es amplificada y filtrada o modificada para obtener una salida deseada, al analizar este proceso se puede concluir que el sistema depende de qué se va a medir y de qué manera se van a presentar los resultados.

Es muy común que en la mayoría de sistemas de medición la variable de entrada no sea eléctrica, es por eso que estas cantidades no eléctricas deben convertirse a señales eléctricas para poder ser procesadas y realizar alguna acción deseada, el elemento encargado de hacer esta conversión es llamado sensor, este dispositivo es capaz de detectar distintos tipos de magnitudes físicas o químicas, que luego son convertidas en señales eléctricas. Por ejemplo, un termistor reacciona a los cambios de temperatura, una fotocelda a los cambios de intensidad luminosa, y un haz electrónico a los efectos de un campo magnético, etc.

3.1. Tipos de sensores

Los sensores responden a cambios de variables externas, dando como resultado señales eléctricas que pueden ser niveles de voltaje o corriente, algunas señales pueden necesitar un acople para que otro dispositivo pueda procesarlas; pueden ser filtradas, amplificadas, atenuadas o requerir algún tipo de conversión, de esta forma un microcontrolador puede utilizar estas señales como entradas y a la vez procesarlas. Aunque existen muchos tipos de sensores, para este trabajo solo interesan los de tipo digital y análogo. Los de tipo digital proveen señales TTL directas, mientras que los de tipo análogo proporcionan señales que deben ser amplificadas o requieren un procesamiento digital complejo.

3.1.1. Sensores digitales

La forma más simple de un sensor digital es un interruptor, el cual puede operarse manualmente y proporcionar dos estados lógicos, uno es cuando se encuentra abierto y otro cuando está cerrado; un interruptor puede necesitar únicamente una resistencia aterrizada a un voltaje positivo o negativo de cd o en algunos casos necesita un capacitor en paralelo para evitar el efecto de rebote.

Una desventaja del interruptor es que tiene partes móviles o mecánicas, las cuales se desgastan con el tiempo y producen una operación poco confiable, este problema puede ser resuelto al utilizar un interruptor que no tenga partes móviles o que sea diseñado especialmente para ser confiable. En contraste, un dispositivo optoelectrónico se caracteriza por no tener partes móviles, y además es inherentemente mucho más confiable que un interruptor simple, por ejemplo: un optoaislador contiene un diodo LED y un fototransistor,

los cuales se conectan en circuitos completamente aislados y en donde el fototransistor es excitado por el haz luminoso del diodo LED.

Cuando el fototransistor es excitado su salida cambia de estado, esto hace que el dispositivo funcione igual que un interruptor simple, pero accionado por medios ópticos, algunos sensores poseen internamente un procesador de datos para que las señales de salida puedan ser compatibles con un microcontrolador, la ventaja principal de los sensores digitales es que entregan señales con niveles TTL, lo que facilita la conexión con dispositivos de procesamiento digital.

3.1.2. Sensores análogos

Los sensores análogos producen salidas variables, las cuales pueden ser voltaje, resistencia o corriente, en los sistemas con microcontroladores usualmente estas señales se convierten en rangos de voltaje adecuados para ser comparadas y así detectar estados bajos y altos, o bien se utiliza la conversión análoga a digital. Esto representa una gran desventaja con respecto a los sensores digitales, ya que procesar las señales antes de ingresarlas a un microcontrolador aumenta el gasto de recursos en amplificadores, filtros para producir una señal limpia, control del ruido, y manejo de la interferencia en un rango de salida deseado.

Los sensores tienen ciertas características específicas que se encuentran en sus hojas de datos, muchas de ellas deben ser tomadas en cuenta a la hora de elegir un sensor para alguna aplicación requerida o para el diseño de un sistema, a continuación se mencionan las más importantes: sensibilidad, *offset*, rango, linealidad, error, precisión, resolución, estabilidad, nivel de referencia, función de transferencia e interdependencia.

Cada una de estas cualidades difieren de un sensor a otro, tanto en digitales como análogos, la hoja de datos viene dada por el fabricante y en algunos casos se incluyen ejemplos de aplicación y diagramas básicos de conexión.

3.2. Sensores de temperatura

La temperatura es una variable que comúnmente requiere medición, hay una gran variedad de sensores de temperatura disponibles para diferentes aplicaciones y rangos de temperatura. Por ejemplo, si se necesita realizar la medición y control de temperatura en un rango determinado alrededor de un cuarto o sala, un sensor integrado como el DS18S20 es el indicado para esta tarea, ya que es un dispositivo versátil y fácil de conectar a un PIC. Para el propósito de este estudio se presenta a continuación el sensor DS18S20.

3.2.1. Sensor digital DS18S20

Este dispositivo es un termómetro digital capaz de realizar lecturas de temperatura de 9 bits de ancho, lo cual equivale a una resolución de 0,5 °C, la información se envía a través de una interfaz de un solo cable, conocida como 1-Wire, de modo que solo uno de los cables y tierra necesitan ser conectados desde un microcontrolador central hacia un DS18S20, esto significa que para poder realizar la lectura, escritura, y realizar conversiones de temperatura se pueden derivar de la misma línea de datos sin necesidad de una fuente externa de alimentación.

Cada DS18S20 contiene un número único de serie, debido a esto pueden existir múltiples sensores en el mismo bus de datos 1-Wire, esto permite la colocación de sensores en lugares diferentes, hay muchas aplicaciones donde

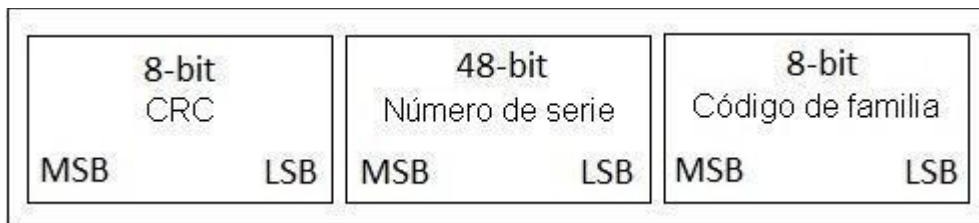
es útil esta característica, por ejemplo: controles ambientales HVAC, temperatura dentro de un edificio, equipo o maquinaria, y el seguimiento y control de procesos.

El DS18S20 posee muchas características importantes, y es necesario conocerlas para saber en qué aplicaciones puede ser utilizado, las mismas se enuncian a continuación:

- Interfaz de conexión por un único cable 1-Wire.
- Capacidad multipunto para simplificar la distribución en aplicaciones de detección de temperatura.
- No requiere componentes externos
- Puede ser alimentado desde la línea de datos, o por medio de una fuente externa en un rango de 3,0 V a 5,5 V.
- No necesita alimentación al trabajar en modo parásito.
- Mide temperaturas en grados Celsius desde -55 °C a 125 °C, o su equivalente en grados Fahrenheit desde -67 °F a 257 °F.
- +/- 0,5 °C de precisión desde -10 °C a +85 °C.
- La temperatura se lee como un valor digital de 9 bits.
- Convierte la temperatura a una palabra digital en 750 ms (máx.).
- El usuario puede definir la temperatura en las opciones de alarma.
- Identifica los dispositivos que están fuera del rango de temperatura programada por medio de su dirección.
- Es totalmente compatible con el sensor DS1820.
- Las aplicaciones incluyen controles termostáticos, sistemas industriales, productos de consumo, termómetros, o cualquier sistema térmicamente sensible.
- Es compatible con microcontroladores y microprocesadores.

Cada sensor tiene un código de 64 bits, donde 8 bits corresponden a la familia del dispositivo, 48 bits corresponden al número de serie y los últimos 8 bits son de CRC, es decir, que el maestro lee una codificación de 64 bits que hacen único a cada dispositivo, en la figura 18 se ilustra la segmentación del código de 64 bits.

Figura 18. **Segmentación del código de 64 bits**



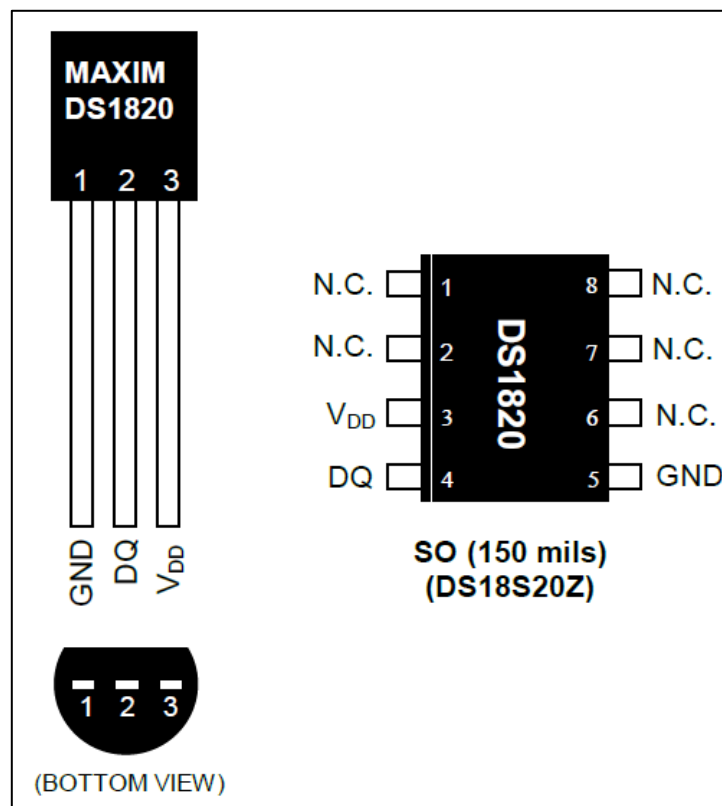
Fuente: elaboración propia.

Cuando se energiza por primera vez un circuito con este tipo de sensor, es muy común obtener la lectura de 85 °C, esto se debe a que es un parámetro que el fabricante coloca como valor inicial o de reinicio, este valor se encuentra cargado en un registro interno del sensor, luego de esto ya se lee la temperatura real del entorno.

El protocolo 1-Wire utiliza una sola línea de datos para establecer la comunicación con otro dispositivo, sin embargo, para que pueda darse la transferencia de datos en necesario agregar una resistencia conectada a + 3V o a + 5V, esto asegura la habilitación del bus de datos y la comunicación entre ambos dispositivos, para poder agregar más dispositivos simplemente basta con colocarlos en paralelo al mismo bus 1-Wire.

Es importante conocer la asignación de pines de este dispositivo, la función de cada pin, la forma en que se pueden conectar con un microcontrolador, así como sus encapsulados. En la figura 19 se ilustra el sensor DS18S20 en sus dos presentaciones disponibles.

Figura 19. **Encapsulado y asignación de pines del DS18S20**



Fuente: Maxim Integrated Products Inc. *DS18S20 High Precision 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet*. p. 1.

El encapsulado TO-92 es el más utilizado en la fabricación de transistores y está hecho usualmente de epoxi o plástico, mientras que el encapsulado SOIC pertenece a la familia de dispositivos SMD y es un circuito integrado de 8 pines, sin embargo, solo se utilizan 3 de estos para la conexión al circuito.

En la tabla I se da una descripción detallada de los pines del sensor DS18S20.

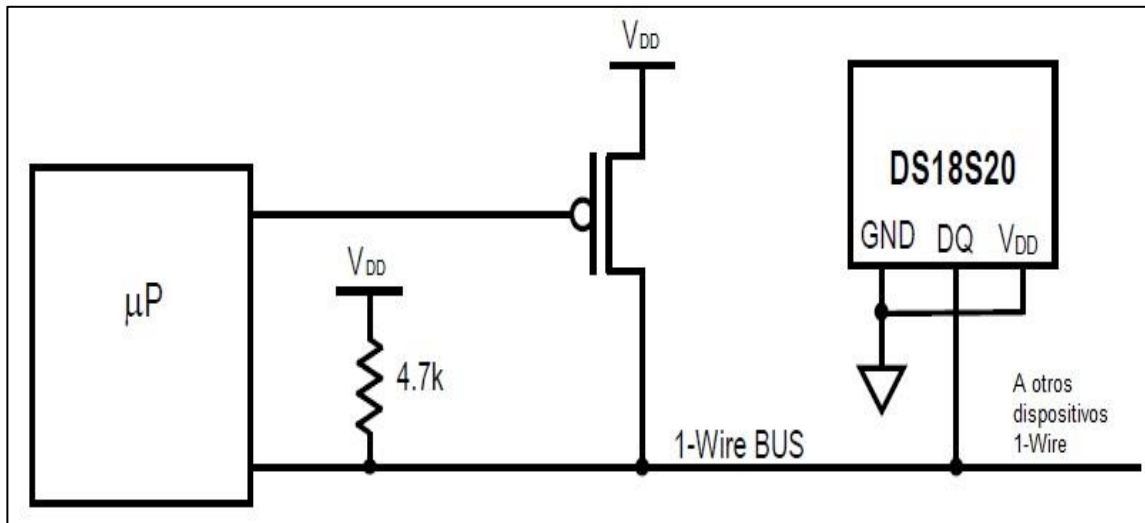
Tabla I. Descripción de pines del DS18S20

Pin 8-pin SOIC	Pin TO-92	Símbolo	Descripción
5	1	GND	Tierra
4	2	DQ	Pin I/O de datos. Este se utiliza para la conexión 1-Wire y también en el modo de alimentación parásita con drenador abierto
3	3	VDD	Pin opcional VDD. Este se utiliza para alimentación del dispositivo con +3V/+5V, pero en el modo de alimentación parásita se conecta a tierra
1,2,6,7,8	-	N.C.	No conexión

Fuente: Maxim Integrated Products Inc. *DS18S20 High Precision 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet*. p. 2.

Existen dos modos para conectar el sensor DS18S20, el primero es realizar una conexión con alimentación parásita, esto se logra conectado un mosfet en configuración de drenador abierto a la línea de datos, el mosfet es controlado por un dispositivo maestro, el cual se encarga de activarlo o desactivarlo después de cada transmisión de datos con un tiempo máximo de 10 μ s entre cada comunicación, es importante mencionar que el pin VDD se conecta a tierra en esta configuración. En la figura 20 se presenta el diagrama de conexión con alimentación parásita, en él se puede observar una resistencia conectada a +3V/ +5V en la línea de conexión del pin I/O, esta sirve para mantener el bus 1-Wire en estado alto y listo para iniciar la comunicación.

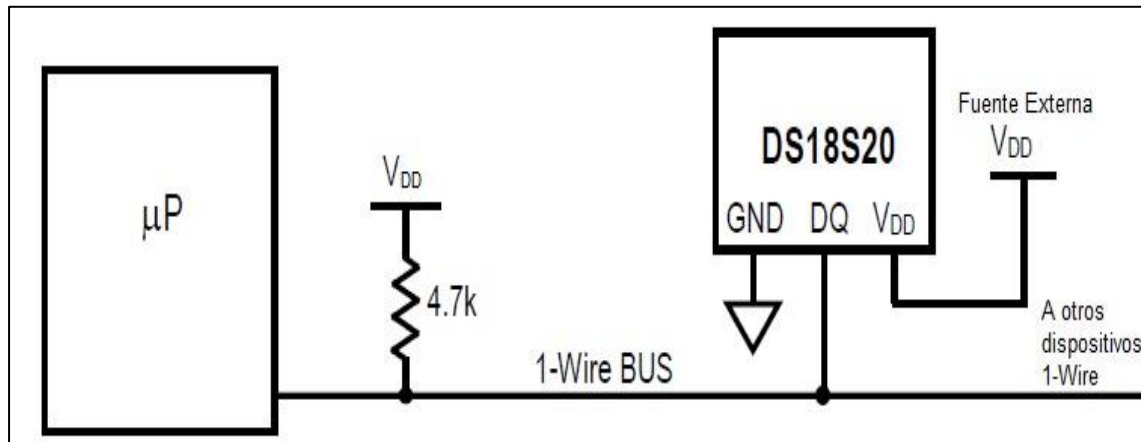
Figura 20. **Conexión en modo parásito**



Fuente: Maxim Integrated Products Inc. *DS18S20 High Precision 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet*. p. 6.

El segundo modo de conexión consiste en agregar una fuente de alimentación externa, con esto se logra energizar de manera constante al sensor y se evita el uso del mosfet, es importante mencionar que no se recomienda utilizar el modo parásito a partir de los 100 °C, ya que conforme aumenta la temperatura también lo hace la corriente, y esto ocasiona que la fuente de alimentación en el pin 1-Wire BUS, ya no sea capaz de proporcionar los valores adecuados para transmitir datos de forma correcta. En la figura 21 se presenta el diagrama de la conexión con fuente de alimentación externa, al igual que en el modo parásito, también es necesario agregar una resistencia en la línea del pin 1-Wire BUS para habilitar el flujo de datos.

Figura 21. **Conexión con fuente de alimentación externa**



Fuente: Maxim Integrated Products Inc. *DS18S20 High Precision 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet*. p. 6.

3.3. **Sensores de humo**

La medición de gases juega un papel muy importante en lo que se refiere a seguridad, es por eso que, en muchas aplicaciones es necesario monitorear gases de alta peligrosidad, para cuidar la calidad de aire, para seguridad de las personas, controles de procesos complejos o alarmas de humo, a diferencia de otras variables que se miden de forma directa como el voltaje, la corriente, temperatura y otras. La medición de gas es mucho más complicada. En un ambiente dado pueden existir cientos de gases diferentes y en diversas proporciones, en algunas aplicaciones es necesaria la detección de un gas específico sin tomar en cuenta a otros gases presentes, y en otras ocasiones es necesario medir la concentración de cada uno en un área determinada.

La mayoría de estos sensores no son diseñados para un solo tipo de gas, sino que son sensibles a un grupo o familia de gases. Para poder seleccionar un sensor o un sistema de detección de gases es necesario conocer los sensores disponibles y sus características de respuesta a varios gases, para el objetivo de este estudio se presenta a continuación el sensor de gas MQ-2.

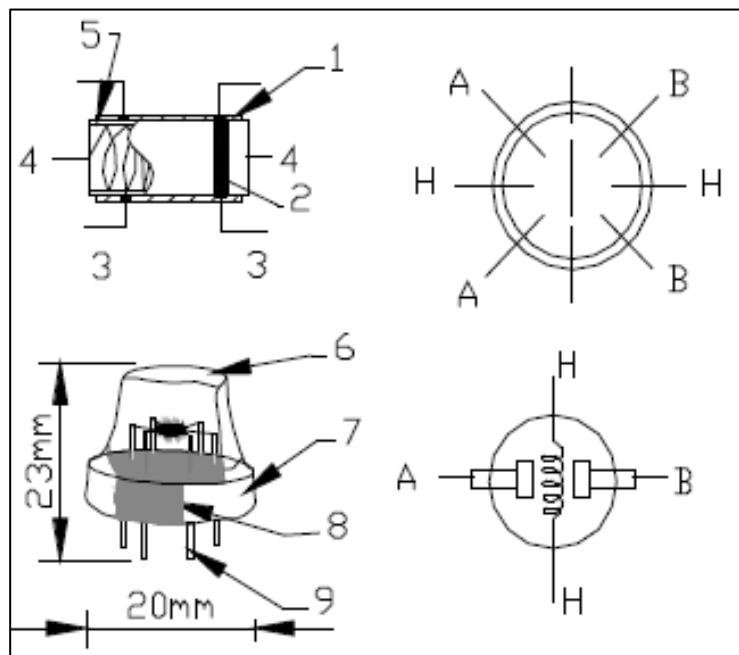
3.3.1. Sensor análogo MQ-2

En general, el MQ-2 es un sensor análogo de estado sólido que consiste en uno o más óxidos metálicos, los cuales son conocidos como metales de transición en la tabla periódica de los elementos; estos óxidos se preparan y procesan para formar un sensor de película delgada, dentro del sensor se introduce un filamento que produce calor con el fin de mantenerlo a una temperatura óptima para la detección de gas.

Ante la presencia de un gas, la película de óxido hace que el gas desprenda iones cargados, dando como resultado una transferencia de electrones, un par de electrodos parcialmente unidos al óxido metálico permiten medir el cambio de conductividad del sensor, este cambio de conductividad es directamente proporcional a la concentración del gas que se mide, provocando incrementos de voltaje en la salida del sensor. El MQ-2 se compone de un pequeño cilindro de Al_2O_3 (óxido de aluminio), el cual se encuentra recubierto por una capa de SnO_2 (óxido de estaño), dentro del cilindro se encuentra una bobina filamento con aleación de Ni-Cr (níquel-cromo), también se encuentran dos electrodos, uno hecho de Au (oro) y el otro de Pt (platino).

Los materiales utilizados en la fabricación permiten que el sensor sea bastante susceptible a muchos gases tóxicos, solventes, y humo; es posible que al variar los materiales y la temperatura se logre la medición de gases más específicos en rangos de ppm (partes por millón) o combustibles. Por la simplicidad y construcción, la vida útil del dispositivo es aproximadamente de 20 a 25 años, también tiene la cualidad de medir la concentración de partículas carbonáceas y metano (CH_4) que se encuentran en el humo común de incendios. En la figura 22 se muestra el diagrama interno del MQ-2.

Figura 22. Diagrama interno del MQ-2



Fuente: Hanwei Electronics Co.,Ltd. *Technical Data MQ-2 Gas Sensor*. p. 1. Disponible en Web: <http://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/MQ-2.pdf>

En la tabla II se detallan cada una de las partes del sensor, así como sus materiales de fabricación.

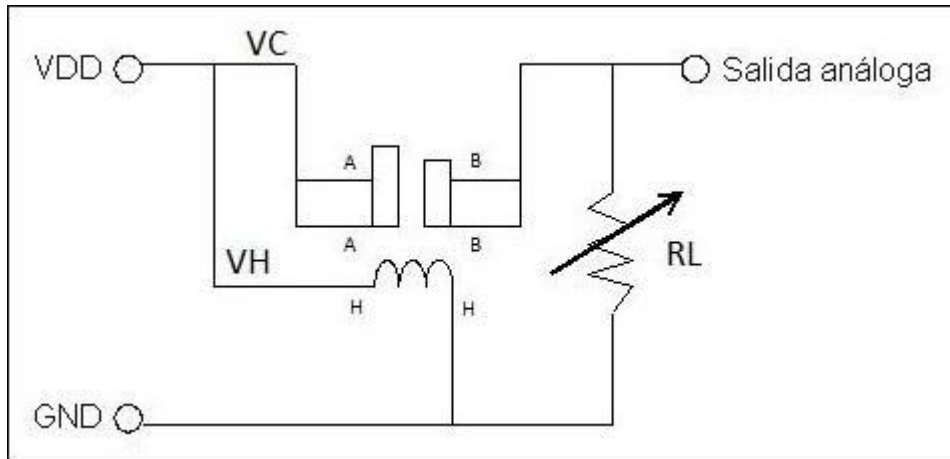
Tabla II. **Partes y materiales del MQ-2**

No.	Parte	Material
1	Capa sensora de gas	SnO ₂
2	Electrodo	Au
3	Línea de electrodo	Pt
4	Bobina calefactora	Aleación de Ni-Cr
5	Tubo cerámico	Al ₂ O ₃
6	Red antiexplosiva	Gasa de acero inoxidable
7	Anillo de sujeción	Niquelado de cobre
8	Resina base	Baquelita
9	Pin tubular	Niquelado de cobre

Fuente: Hanwei Electronics Co.,Ltd. *Technical Data MQ-2 Gas Sensor*. p. 1. Disponible en Web: <http://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/MQ-2.pdf>

El MQ-2 tiene 6 pines, de los cuales 4 se utilizan para la extracción de señales y 2 para proporcionar la corriente del calefactor, es posible configurar la conexión del dispositivo y llevarla a una terminal de 3 pines para facilitar la alimentación y toma de datos, también es posible agregar una resistencia variable al sensor para controlar la sensibilidad a las concentraciones de gases. En la figura 23 se presenta un diagrama con la configuración básica para que el sensor pueda operar correctamente.

Figura 23. Configuración básica del MQ-2



Fuente: elaboración propia.

Donde VH es el voltaje del calefactor, VC es el voltaje de prueba, RL es la resistencia variable para la sensibilidad, VDD es la alimentación de +5 V, y GND la conexión a tierra. Se puede observar que VC y VH se conectan a VDD, esto es necesario para que el sensor tenga una temperatura adecuada para trabajar apropiadamente, el calefactor al igual que resistencia RL deben conectarse a tierra para cerrar el circuito. La potencia de sensibilidad viene dada por:

$$P_S = \frac{VC^2 * R_s}{(R_s + R_L)^2} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

En donde Rs es la resistencia de detección del sensor.

En la tabla III se muestran las especificaciones técnicas más importantes del MQ-2.

Tabla III. **Especificaciones técnicas del MQ-2**

Símbolo	Parámetro	Condición técnica
V_C	Voltaje del circuito	5V +/- 0,1
V_H	Voltaje del calefactor	5V +/- 0,1
R_L	Resistencia de carga	Puede ser ajustable
R_H	Resistencia del calefactor	33 Ω +/- 5%
P_H	Consumo del calefactor	Menos de 800mW
R_S	Resistencia de detección del sensor	3K Ω - 30K Ω (1 000 ppm iso-butano)
T_{ao}	Temperatura de uso	-20 °C -50 °C
T_{as}	Temperatura de almacenaje	-20 °C -70 °C
R_H	Humedad relativa	Menos del 95%
O_2	Concentración de oxígeno	21% en condición estándar (la concentración de oxígeno puede afectar la sensibilidad)
Condición estándar de detección	Temperatura: 20 °C +/- 2 °C Humedad: 65% +/- 5%	V_c : 5V +/- 0,1 V_h : 5V +/- 0,1
Pre calentamiento	Más de 24 horas	

Fuente: Hanwei Electronics Co.,Ltd. *Technical Data MQ-2 Gas Sensor*. p. 1. Disponible en Web:
<<http://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/MQ-2.pdf>>

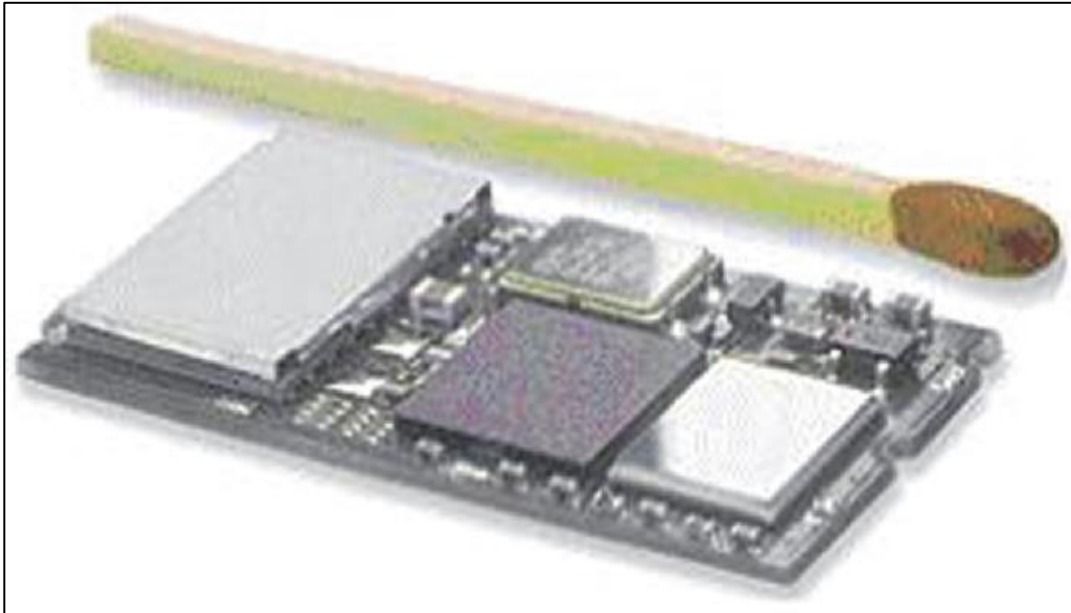
4. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INLÁMBRICA DE BAJA POTENCIA BLUETOOTH

Actualmente, las comunicaciones inalámbricas se están convirtiendo en el principal líder de comunicación entre usuarios, lo cual ya no se ve como un medio inalcanzable sino que en realidad es como un nuevo estado de ánimo o tendencia, y es utilizado de manera natural en todas partes y por cualquier persona, incluso en lugares donde es posible realizar la comunicación por medio de cables, se ha optado por sustituir estas conexiones por tecnología inalámbrica. Existen varios tipos de comunicación inalámbrica para transmitir información, entre ellos se pueden mencionar Wi-Fi, WiMAX, ZigBee, y Bluetooth entre otras, a continuación se presenta la tecnología inalámbrica Bluetooth.

4.1. Historia

La tecnología Bluetooth tiene como objetivo permitir la comunicación inalámbrica de corto alcance entre varios dispositivos, fue desarrollada originalmente por Ericsson, y ha sufrido una evolución en sus especificaciones, las cuales han sido sustentadas y desarrolladas por el SIG de Bluetooth, que está estandarizado por la IEEE bajo la referencia IEEE 802.15.1. Actualmente, el estándar 802.15 tiene algunos subgrupos y foros, tal es el caso de Wimedia Alliance que está compitiendo por el mismo campo de operación. La idea fundamental detrás de Bluetooth consistió en especificar un circuito integrado de alta escala que se puede aplicar en una gran variedad de equipos con un consumo de energía muy reducido.

Figura 24. **Módulo Bluetooth**



Fuente: LABIOD, H; AFIFI, H; DE SANTIS, C. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, and Wimax*. p. 76.

En la figura 24 se ilustra un módulo de Bluetooth de escala reducida, el cual se compara en dimensiones con un cerillo. En 1994, Ericsson Mobile Communications lanzó un estudio de viabilidad para una interfaz de radio de bajo costo y menor consumo, la cual se utilizaría entre teléfonos móviles y sus accesorios. En febrero de 1998, IBM, INTEL, Nokia y Toshiba se unieron a la empresa sueca y en mayo, finalmente se creó el SIG, con la llegada de 3Com, Agere (Lucent Technologies), Microsoft y Motorola, se logró una gran expansión en el 2000, la cual no cesa y sigue aumentando debido a que hay más proveedores que cubren diversos campos de especialización como: la telefonía celular, computadoras portátiles, automóviles y procesamiento digital.

Actualmente SIG cuenta con más de 2 500 fabricantes, con lo cual está llevando a cabo una verdadera lucha para promover este estándar mundial, debido a la gran cantidad de tecnologías que son esencialmente concurrentes y están encabezadas por Wi-Fi. Por otra parte, el término Bluetooth bien del nombre vikingo Harald Blatand (Harald el diente azul), quien logró unificar en un solo reino a Dinamarca y Noruega en el momento en que Europa estaba dividida por la religión y las peleas de territorios. En la actualidad, Bluetooth es una bella metáfora que lleva a cabo una verdadera batalla para unificar en un solo conjunto a los fabricantes y sus instrumentos electrónicos, gracias a este nuevo estándar de comunicación.

El ícono de esta tecnología, también se basa en la historia de Bluetooth, ya que se compone de dos caracteres que son H y B, derivados del nombre Harald Bluetooth, todo producto que desee trabajar bajo este estándar debe pasar por un proceso de certificación para poder convertirse en un producto autorizado.

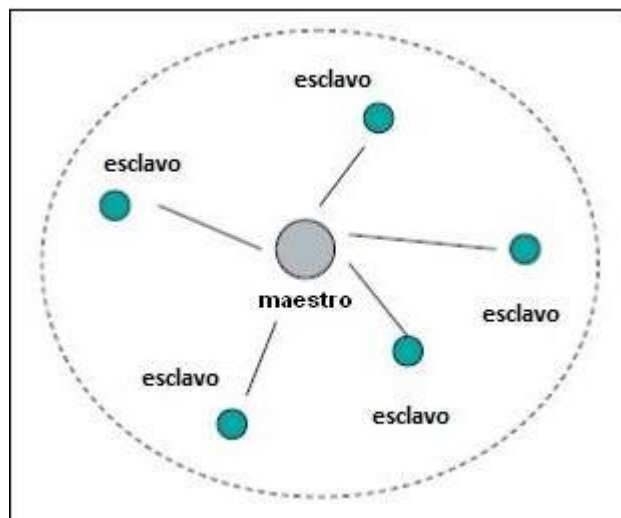
4.2. Aplicaciones

Entre las aplicaciones de este estándar de comunicación se puede mencionar la telefonía móvil, que es uno de los principales mercados afectados, debido a que es fácil añadir módulos Bluetooth en equipos celulares, otro tipo de aplicación hace referencia a equipo de procesamiento de datos, tales como: ratones, impresoras portátiles, PC, organizadores, cascos de audio, sistemas Hi-Fi, cámaras numéricas, pago de banca a distancia y aplicaciones de automóviles. A cada aplicación se le puede dar el nombre de perfil, ya que proporciona información sobre los protocolos y parámetros de configuración de los dispositivos para cubrir ciertos requerimientos, y así se puedan comunicar de manera uniforme, estos perfiles se especifican en el SIG.

4.3. Arquitectura y rendimiento

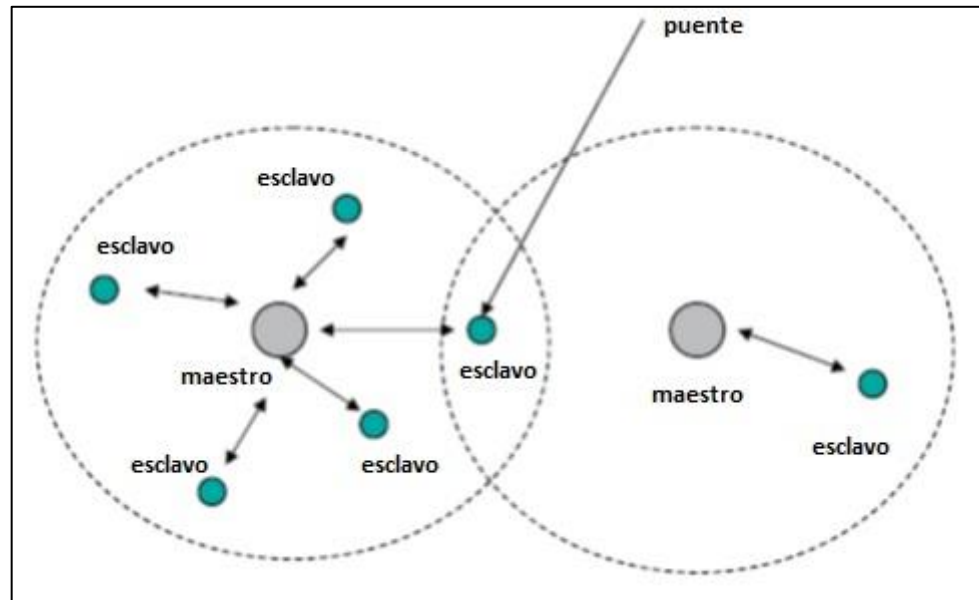
La comunicación Bluetooth requiere dos cosas preliminares, en primer lugar se deben conocer los dispositivos que se encuentran en las cercanías o que son visibles, y en segundo lugar debe haber un circuito preestablecido. La comunicación, también se basa en el principio maestro-esclavo, ya que es posible tener múltiples dispositivos conectados en una misma red de comunicación. Un grupo de equipos forma una red llamada piconet, en la figura 25 se ilustra la arquitectura maestro esclavo de una red piconet. Una piconet comprende un maestro y siete esclavos como máximo, también es posible que varias piconets puedan solaparse y así formar lo que se conoce como una red dispersa, en la figura 26 se ilustra una red dispersa.

Figura 25. **Red piconet maestro-esclavo**



Fuente: LABIOD, H; AFIFI, H; DE SANTIS, C. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, and Wimax*. p. 77.

Figura 26. **Red dispersa**



Fuente: LABIOD, H; AFIFI, H; DE SANTIS, C. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, and Wimax*. p. 78.

Cuando dos redes se intersectan es posible que algunos elementos formen parte de ambas, logrando así una vía de comunicación llamada comúnmente bridge (puente).

La característica más importante de Bluetooth es que no es dependiente de la IP, la decisión de este novedoso diseño facilita el despliegue de dispositivos que no necesitan preocuparse por problemas, tales como: la asignación de direcciones, router por defecto, la máscara de red, etc. En los dispositivos Bluetooth, las aplicaciones son parte de las especificaciones, como se mencionó anteriormente ellas son definidas en documentos separados y por la SIG.

Existen varias versiones sobre las especificaciones de Bluetooth, la versión 1 ofrece un ancho de banda máximo de menos de 1 Mbps para un intervalo de aproximadamente 10 metros. El rango depende de la clase de equipo a utilizar, para dispositivos de muy baja y moderada potencia se pueden mencionar, por ejemplo: equipos portátiles, teléfonos, tarjetas de computadora, etc. La versión 2 ofrece un ancho de banda máximo que oscila entre 2 a 3 Mbps; cuando en Bluetooth se quiere utilizar en rangos más altos, se enfrenta a otras normas más complejas, que no necesariamente representan una condición favorable, por lo tanto existen tres clases y tres potencias para la transmisión, las cuales se describen en la tabla IV.

Tabla IV. **Clases de dispositivos Bluetooth**

Clase	Descripción	Potencia característica
Clase 1	Diseñada para dispositivos de gama alta, tales como puntos de acceso Bluetooth (aprox. 100 m)	20 dBm (100 mW)
Clase 2	Diseñada para la conexión con PC's y conexión con dispositivos portátiles (aprox. 10 m)	4 dBm (2.5 mW)
Clase 3	Diseñada para dispositivos de baja potencia (rango menor a 1 m)	0 dBm (1 mW)

Fuente: LABIOD, H; AFIFI, H; DE SANTIS, C. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, and Wimax*. p. 81.

4.4. Bandas de frecuencias y canales de RF

El funcionamiento del Bluetooth se encuentra en la banda ISM de 2,4 GHz, en la mayoría de países se cuenta con 83,5 MHz que deben ser dedicados a este protocolo, esto hace posible que se tengan 79 canales disponibles en esta gama de frecuencia con un ancho de banda de 1 MHz por canal. En la tabla V se presentan algunas restricciones para diferentes países.

Tabla V. **Bandas de frecuencia y canales de RF**

Países	Rango de Frecuencia (MHz)	Canales de Frecuencia (MHz)
Europa y Los Estados Unidos	2400 – 2483.5	$f = 2402+k$ $k = 0, \dots, 78$
Francia	2446.5 – 2483.5	$f = 2454+k$ $k = 0, \dots, 22$
España	2445 – 2475	$f = 2449+k$ $k = 0, \dots, 22$

Fuente: LABIOD, H; AFIFI, H; DE SANTIS, C. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, and Wimax*. p. 81.

4.5. Características físicas

En general, existen tres características físicas que definen la comunicación Bluetooth, ellas son los canales físicos, enlaces lógicos, y combinaciones de enlace, las mismas se describen a continuación.

4.5.1. Canales físicos

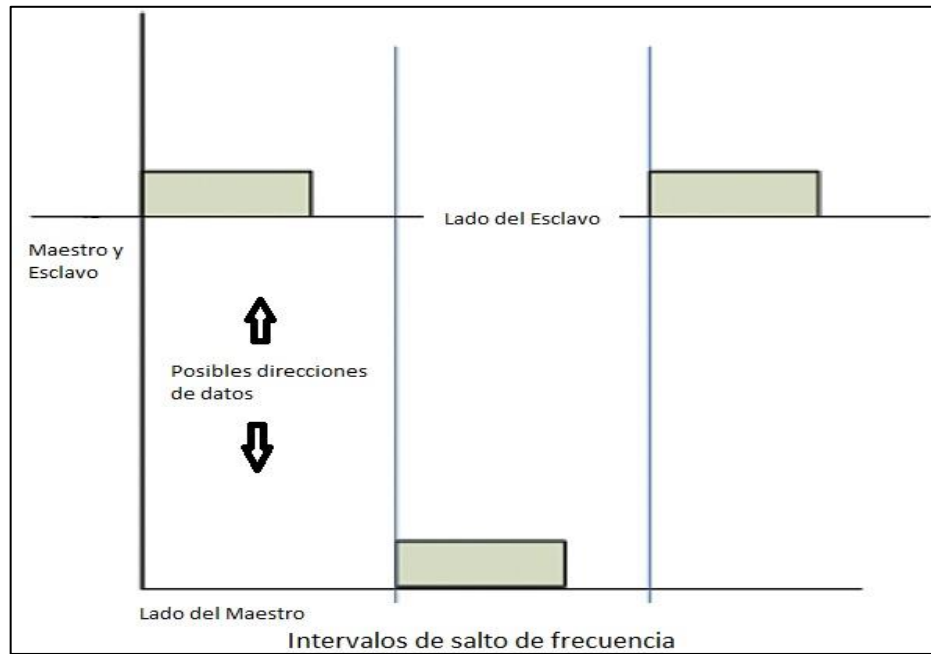
A cada canal lógico se le asigna un canal físico, este es representado por una secuencia aleatoria de saltos de frecuencia, elegida entre los 79 o 23 canales de RF disponibles en la banda de 2.4 GHz.

Los dispositivos Bluetooth que utilizan la misma secuencia forman una red piconet, los saltos de frecuencia son únicos para cada piconet, excepto si esta es adaptada para un canal, y para esto se utiliza el reloj del dispositivo maestro, el canal se divide en intervalos de tiempo o slots, cada intervalo de tiempo corresponde a una frecuencia de RF entre la secuencia de salto, de modo que dos intervalos consecutivos corresponden a dos frecuencias respectivamente. Normalmente el maestro utiliza una frecuencia descendente para el esclavo y este utiliza el siguiente intervalo para la comunicación ascendente.

Para este proceso se utiliza la técnica de TDD, es decir, que el maestro y los esclavos transmiten alternativamente, el maestro transmite en los intervalos pares y el esclavo en los impares. Los intervalos de tiempo o slots están numerados en los últimos 625 μ s de cada uno. Una transmisión puede hacerse solo entre un maestro y un esclavo o de un esclavo a su maestro, pero las comunicaciones directas entre esclavo-esclavo, excepto para el descubrimiento, que es cuando todos los esclavos oyen al maestro y responden sí y solo sí, alguno de ellos es seleccionado para la comunicación.

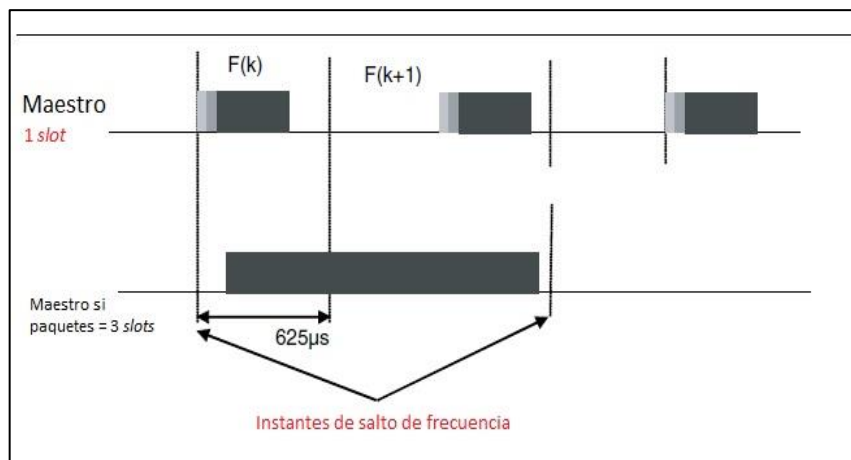
La clasificación de los intervalos corresponden al valor del reloj de Bluetooth maestro, este reloj con 27 bits de ancho ayuda a numerar los intervalos de 0 a 2^{27-1} de una manera cíclica, esto se puede observar en las figuras 27 y 28, en ellas se presenta la transmisión/recepción utilizando un slot simple y la comparación de la transmisión de un slot simple y slots múltiples.

Figura 27. **Transmisión/recepción con *slot* simple**



Fuente: LABIOD, H; AFIFI, H; DE SANTIS, C. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, and Wimax*. p. 83.

Figura 28. **Comparación de *slot* simple y *slots* múltiples**



Fuente: LABIOD, H; AFIFI, H; DE SANTIS, C. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, and Wimax*. p. 83.

Los datos transmitidos por las unidades Bluetooth utilizan paquetes, cada uno corresponde a la asociación de 1-5 intervalos de tiempo consecutivos, cuando un paquete tiene el tamaño de un intervalo, se habla de un slot simple de transmisión/recepción, y cuando un paquete es mayor a intervalo de tiempo (3 o 5 slots) se habla de una transmisión de slots múltiples. Las reglas de salto de frecuencia aplicadas a los paquetes obligan a que el inicio del paquete deba ser alineado con el comienzo de un slot.

4.5.2. Enlaces lógicos

Existen varios tipos de enlaces que pueden establecerse entre un maestro y uno o varios esclavos, los más utilizados son los siguientes: conexión síncrona orientada (SCO), SCO extendida (ESCO), y conexión asíncrona orientada (ACL).

SCO se utiliza para las comunicaciones de voz en modo circuito, servicios síncronos y simétricos, reserva de slots de intervalos regulares de 64 Kbps por slot, el enlace SCO es simétrico, es decir, que tiene la misma cantidad de slots ascendentes y descendentes, y además son punto a punto.

ESCO son enlaces asimétricos y ofrecen más tipos de paquetes soportados en su canal de comunicación.

Los enlaces ACL se utilizan para la comunicación de datos, servicios asíncronos simétricos y asimétricos, además de descubrimiento y paginación. En general, todas las señales utilizan ACL, cada esclavo, también tiene por defecto una ACL para comunicarse con el maestro.

4.5.3. Combinaciones de enlace

El gestor de un nodo puede elegir cualquier combinación de tipos de enlace, la elección se deja abierta para poder elegir entre un SCO o una conexión de ESCO si los parámetros de la aplicación lo permiten, también es posible utilizar al mismo tiempo una conexión ACL, sin embargo, existe una condición importante que establece que no puede ocurrir ninguna transmisión antes de que el nodo esté conectado, y esto no puede suceder antes de que se establezca una conexión primaria ACL con el maestro, tal y como se mencionó anteriormente, la lógica detrás de esto claramente habilita al nodo para recibir comandos del maestro en cualquier momento.

4.6. Direccionamiento

Hay cuatro tipos de direcciones que se utilizan entre dispositivos Bluetooth: BD_ADDR, LT_ADDR, PM_ADDR, AR_ADDR.

BD_ADDR es un dispositivo Bluetooth de dirección fija que es proporcionada por el fabricante, cada dispositivo debe tener una dirección única con una longitud de 48 bits, que corresponde a una dirección MAC. Sin embargo, esta se presenta en las señales solo para dar inicio a una comunicación. Una dirección MAC es única y sirve para identificar a cada dispositivo, cualquier otra dirección se puede modificar, pero no la MAC, es por eso que la identidad y la dirección deben ser diferentes.

LT_ADDR es la dirección del miembro Bluetooth que se encuentra activo en ese momento y es representada por un número de 3 bits de longitud, es por eso que en una piconet solo pueden haber 8 dispositivos, ya que en numeración binaria se toma en cuenta desde el número 0 al 7.

Esta dirección solo es válida siempre y cuando el esclavo se encuentre activo en una piconet, esta dirección en conjunto con el tipo de paquetes a enviar identifica el enlace para la comunicación con un esclavo, se debe tomar en cuenta que los esclavos no se comunican directamente entre sí, por lo tanto, esta dirección es solo para identificar un esclavo en la comunicación de un enlace maestro-esclavo.

PM_ADDR es una dirección reservada a los miembros no activos, es de 8 bits y es válida solo si el esclavo se encuentra emparejado, la dirección PM_ADDR es asignada al esclavo por el maestro durante el proceso de emparejamiento.

AR_ADDR es una dirección temporal de petición de acceso, es utilizada para desactivar esclavos emparejados y así poder determinar el siguiente slot que tiene permiso de enviar una nueva solicitud de acceso, también es asignada por el maestro y nuevamente es válida siempre y cuando el esclavo se encuentre emparejado.

4.7. Paquetes Bluetooth

Hay varios tipos de paquetes que están relacionados con los diferentes tipos de enlace, según su aplicación se identifican tres tipos de paquetes a nivel mundial: de control, síncronos SCO, y asíncronos ACL.

Los paquetes de control se utilizan entre el servidor y los esclavos para llevar información relacionada con la radio (saltos de frecuencia, reloj), para el enlace (creación, seguridad) o a la conexión (las solicitudes de conexión).

Los paquetes de síncronos SCO son utilizados por los vínculos orientados a la conexión para llevar voz.

Por último, los paquetes asíncronos ACL se utilizan para conexiones ACL, por lo que, principalmente hay un esfuerzo en mejorar el tráfico de datos.

4.8. Control de error

Cuando el campo de control de error presente (CRC) es de 16 bits, los campos de cabecera de carga útil se utilizan para generar el Código CRC. A continuación se presentan los principales correctores de errores.

4.8.1. Códigos de control de error

Algunos paquetes están protegidos de errores de transmisión, antes de la codificación, los campos de cabecera y de datos están codificados para evitar la aparición demasiado frecuente de ciertas cadenas de bits, esta interferencia se lleva a cabo antes del cálculo de la corrección de error en la recepción FEC, luego de esto, los datos se codifican mediante la realización de una operación XOR con una palabra de interferencia.

4.8.2. Comprobación de error de cabecera

La comprobación de error de cabecera HEC es un CRC de 8 bits al final de la cabecera, para comprobar si el paquete se transmite correctamente se realiza un cálculo en el receptor, el sistema HEC es inicializado en diferentes formas de acuerdo con los tipos de paquetes, la HEC no hace posible la corrección de errores, solo los detecta.

4.8.3. Comprobación de redundancia cíclica

Es mejor conocida como CRC, y se genera de la misma forma que HEC, obteniendo como resultado una palabra de 16 bits concatenados en el extremo del paquete de datos. En lo que se refiere a HEC el procedimiento de comprobación puede ser hecho mediante el cálculo del patrón de carga útil CRC, utilizando el siguiente protocolo, si es 0 el paquete se transmitió correctamente y si no, el paquete se elimina, porque contiene uno o más errores.

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE HUMO

En este capítulo se trata de forma detallada todas las etapas del diseño del sistema de control de temperatura y detección de humo, el cual para referencias posteriores será nombrado como SCTDH, asimismo se presentan los diagramas esquemáticos, dispositivos utilizados, placa de circuito impreso, diagrama de flujo de programa, y la operación del sistema.

5.1. Antecedentes

El Centro de Cálculo e Investigación Educativa se encarga de administrar de forma eficiente toda la información de la Facultad de Ingeniería, de manera que pueda estar disponible en cualquier momento para todas aquellas personas que así lo requieran, también se encarga de cumplir con normas y reglamentos que permiten crear nuevas aplicaciones y herramientas para desarrollar mejoras en el manejo de información, logrando así un entorno más agradable para los usuarios. Para que todo esto se cumpla, es necesario asegurar el buen funcionamiento del equipo de cómputo y servidores de almacenamiento de datos.

Para lograr mantener un equipo en buen estado, es necesario que la sala se encuentre ventilada de forma adecuada, actualmente el Centro de Cálculo cuenta con un sistema de aire acondicionado con control de temperatura manual, el cual es gobernado por un termostato sencillo, sin embargo, cuando este se desajusta provoca un grave problema, ocasionando cambios abruptos de temperatura, muchas veces temperatura alta y otras baja.

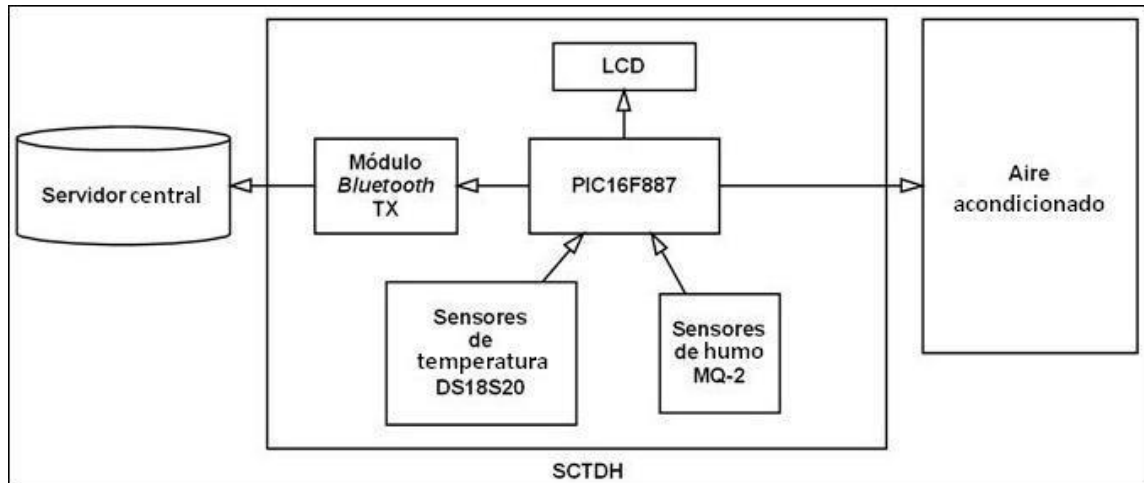
De esta forma, los cambios de temperatura pueden llegar a dañar el equipo de cómputo, ya que este debe estar a una temperatura estable para trabajar de forma óptima, el daño del equipo implica perder mucha información valiosa para docentes y estudiantes, lo cual no es permisible para una institución como Centro de Cálculo. Es por eso que surge la necesidad de diseñar un sistema de control para mantener la temperatura en un rango deseado, logrado así mantener el equipo estable y la información segura.

Además de esto, el sistema cuenta con una alarma de humo, la cual envía una señal al servidor central y este ordena el apagado de todos los equipos en caso de incendio. La transmisión de datos hacia el servidor se realiza por medio inalámbrico utilizando Bluetooth, estos agregados aumentan el grado de seguridad y confiabilidad de la información.

5.2. Generalidades

El sistema de control se basa en el PIC16F887 como unidad de procesamiento de datos, auxiliado por sensores de temperatura y humo para obtener muestras del ambiente en la sala de servidores, para la transmisión se utiliza un módulo transmisor Bluetooth compatible con microcontroladores, para la recepción en el servidor central se utiliza un dongle Bluetooth de uso común. Los datos que se envían al servidor, también se pueden monitorear gracias a un módulo LCD, en donde se observan tanto los cambios en la temperatura así como el valor de la alarma de humo.

Figura 29. Diagrama de bloques del SCTDH



Fuente: elaboración propia.

En la figura 29 se presenta el diagrama de bloques del SCTDH, en donde se observa el microcontrolador PIC16F887 y los periféricos externos que se utilizarán, tales como: la LCD, los sensores de humo y temperatura, y el módulo transmisor Bluetooth; además aparece un bloque externo de aire acondicionado que será controlado por medio de una señal del PIC, por último se observa un servidor central encargado de recibir la información de temperatura y alarma del SCTDH.

Cabe mencionar que tanto el servidor central como el aire acondicionado son equipos que se encuentran en la sala de servidores del Centro de Cálculo, para el objetivo de este estudio no se tratarán a detalle, sin embargo, se describirá la relación de cada uno con respecto al SCTDH.

5.3. Características del SCTDH

El SCTDH cuenta con características específicas que permiten realizar adecuadamente el control de temperatura, monitoreo de la alarma de humo y envío de datos a un servidor central, a continuación se presentan todas ellas en detalle:

- El sistema es capaz de monitorear la temperatura en varios puntos de la sala de servidores, para ello se utilizan 4 sensores digitales DS18S20, los cuales son capaces de enviar datos hasta una distancia máxima de 200 metros en una red de dispositivos 1-Wire.
- El control de temperatura se realiza en un rango de 19 °C hasta 21 °C, si la temperatura es menor o igual a 19 °C el aire acondicionado se encuentra apagado, y si la temperatura es mayor o igual a 21 °C el aire acondicionado se activa, cuando la temperatura decrece a 19 °C el aire acondicionado se apaga nuevamente. Cada sensor es independiente de los demás, esto significa que el ciclo da inicio o fin con un cambio en cualquiera de los cuatro sensores.
- El control de humo se realiza en varios puntos de la sala de servidores, para lograr esto se utilizan 3 sensores de gas MQ-2, el voltaje para el control de la sensibilidad del dispositivo se puede ajustar para que el microcontrolador pueda detectar algún valor como un nivel de voltaje alto o 1 lógico, de esta manera el control de humo se puede trabajar de forma más eficiente.
- Los datos temperatura y humo se despliegan constantemente en una pantalla LCD de 2X16 (dos filas por dieciséis columnas), para que el usuario final posea un entorno más agradable.

- El módulo Bluetooth se encarga de transmitir los datos de temperatura y humo, los datos que se envían por medio de UART con un intervalo de 2 segundos entre bloque, de esta forma el servidor puede obtener un registro de estas variables y realizar procesos con ellas. Para el intercambio de datos se utiliza el estándar JSON, ya que es de peso ligero, fácil de escribir y de leer, es corto, y además posee flexibilidad para poder ser modificado en un futuro.
- El servidor recibe los datos con el estándar JSON de la siguiente forma: {humo0: 0; temp0: 25.5; temp1: 18; temp2: 21.5; temp3: 23}, en donde humo 0 significa que no hay humo, y humo 1 significa que se ha detectado humo y el servidor se encarga de apagar todos los equipos de la sala, los valores de temperatura solo se almacenan en una base de datos del servidor para tener un control sobre el monitoreo. Para poder recibir los datos el servidor cuenta con un dongle USB Bluetooth.
- El aire acondicionado es controlado por medio del PIC16F887, el cual envía una señal alta para activarlo o una baja para desactivarlo, es por eso que el SCTDH funciona como un controlador de dos posiciones o encendido y apagado (on/off).
- Los requerimientos mínimos de la fuente de alimentación para el SCTDH son de 5 V (DC) / 2A (DC), este tipo de fuente se consigue fácilmente en el mercado.
- El sistema opera de forma automática, por lo que no requiere ningún ajuste por parte del usuario, todos los procesos realizados se encuentran en la programación del microcontrolador, además es factible modificar el código del programa para implementar más sensores como sean necesarios hasta donde lo permita el hardware del PIC.

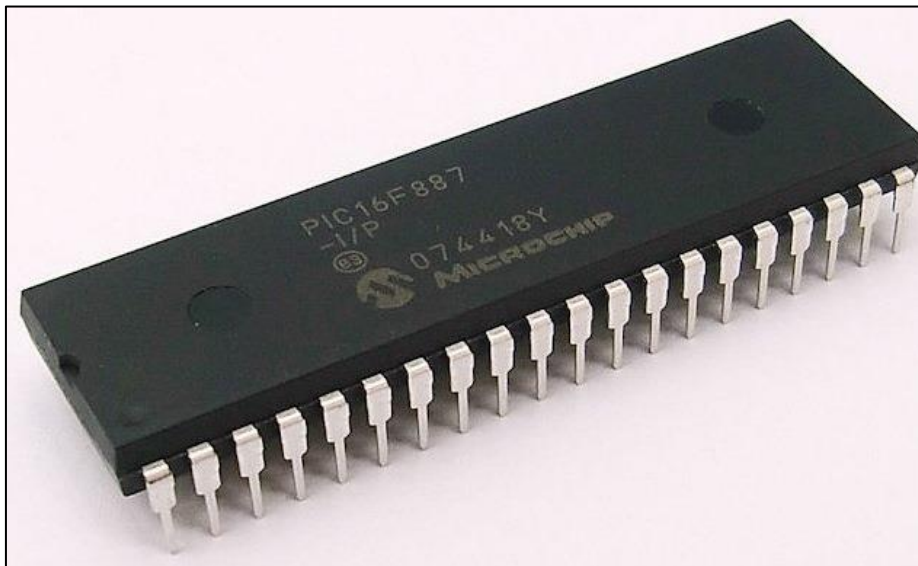
5.4. Módulos del SCTDH

El sistema cuenta con 5 módulos específicos que hacen posible llevar a cabo las acciones de control y la transferencia de datos, a continuación se describe cada uno de ellos.

5.4.1. Módulo PIC16F887

El microcontrolador PIC16F887 es utilizado como unidad central de proceso, en él se desarrolla toda la programación para la medición y comparación de temperatura y de la señal de humo, transferencia de datos en forma serial por Bluetooth, y el control de encendido y apagado del aire acondicionado. En la figura 30 se ilustra el microcontrolador PIC16F887.

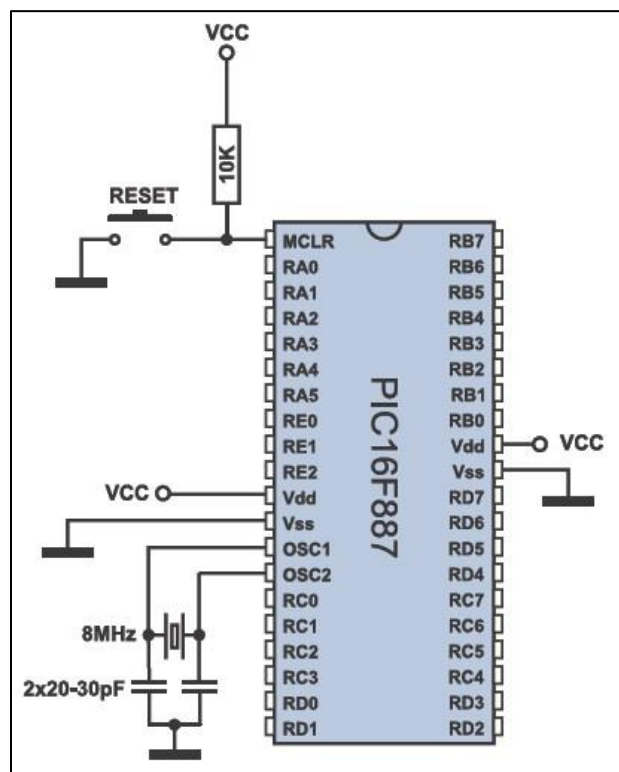
Figura 30. Microcontrolador PIC16F887



Fuente: <http://www.nextiafenix.com/producto/pic16f887>. Consulta: agosto de 2014.

Para la alimentación y buen funcionamiento de este dispositivo, se utiliza una fuente de + 5V, conexión de tierra GND, un oscilador externo o interno, y un interruptor para el reinicio del programa del microcontrolador, en el caso del SCTDH se utiliza el registro OSCON, para configurar el oscilador interno a 8 MHz con la finalidad de optimizar recursos y obtener mayor eficiencia. En la figura 31 se ilustra la conexión básica del PIC16F887.

Figura 31. **Conexión básica del PIC16F887**



Fuente: <http://www.mikroe.com/chapters/view/82/capitulo-4-ejemplos>. Consulta: agosto de 2014.

Para el funcionamiento del SCTDH se utilizan 4 puertos del PIC, la conexión con los módulos se detalla en las tablas VI, VII, VIII, y IX.

Tabla VI. **Puerto A**

Pin	Conexión	Descripción
RA0	DQ sensor 1	Comunicación 1-wire sensor de temperatura 1
RA1	DQ sensor 2	Comunicación 1-wire sensor de temperatura 2
RA2	DQ sensor 3	Comunicación 1-wire sensor de temperatura 3
RA3	DQ sensor 4	Comunicación 1-wire sensor de temperatura 4
RA4	Sin conexión	Sin conexión
RA5	Sin conexión	Sin conexión
RA6	Sin conexión	Sin conexión
RA7	Sin conexión	Sin conexión

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Puerto B**

Pin	Conexión	Descripción
RB0	D4, LCD	Comunicación con el bit 4 de la LCD
RB1	D5, LCD	Comunicación con el bit 5 de la LCD
RB2	D6, LCD	Comunicación con el bit 6 de la LCD
RB3	D7, LCD	Comunicación con el bit 7 de la LCD
RB4	RS, LCD	Comunicación con el registro de control/datos de la LCD
RB5	E, LCD	Comunicación para la habilitación de la LCD
RB6	Sin conexión	Sin conexión
RB7	Sin conexión	Sin conexión

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Puerto C**

Pin	Conexión	Descripción
RC0	Sin conexión	Sin conexión
RC1	Sin conexión	Sin conexión
RC2	Sin conexión	Sin conexión
RC3	Sin conexión	Sin conexión
RC4	Sin conexión	Sin conexión
RC5	Sin conexión	Sin conexión
RC6	RX	Comunicación serial con el pin TX del módulo Bluetooth
RC7	TX	Comunicación serial con el pin RX del módulo Bluetooth

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Puerto D**

Pin	Conexión	Descripción
RD0	Sin conexión	Sin conexión
RD1	Sin conexión	Sin conexión
RD2	Sin conexión	Sin conexión
RD3	Sin conexión	Sin conexión
RD4	A/C	Señal (on/off) para el control del aire acondicionado
RD5	Dato 1	Lectura de señal del sensor MQ-2/1
RD6	Dato 2	Lectura de señal del sensor MQ-2/2
RD7	Dato 3	Lectura de señal del sensor MQ-2/3

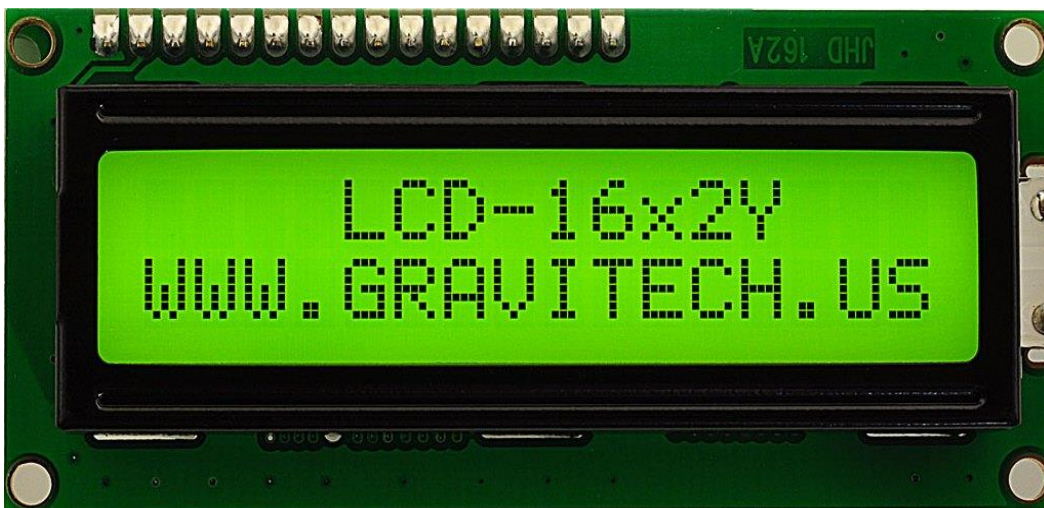
Fuente: elaboración propia.

5.4.2. Módulo LCD

Este módulo tiene como tarea fundamental desplegar los datos del SCTDH, y permite monitorear en cualquier momento el estado de los sensores y la alarma de humo, para ello se utiliza una LCD de 2X16 caracteres, cada carácter se representa en una matriz de 7X5.

La LCD cuenta con un circuito integrado capaz de decodificar caracteres ASCII, son una combinación de números binarios que pueden ser reconocidos por cualquier computador, sin embargo, para poder mostrar caracteres simples como letras, números y símbolos, se necesita un decodificador especial que pueda realizar esta tarea; el circuito integrado utilizado varía dependiendo del fabricante y de la dimensión de la LCD. En la figura 32 se ilustra una LCD de 16X2 caracteres.

Figura 32. **LCD de 16X2**



Fuente: <http://www.gravitech.us/16chblongrlc.html>. Consulta: agosto de 2014.

La alimentación de este dispositivo se realiza con una fuente de + 5V y GND, adicionalmente se debe agregar una resistencia variable para el ajuste del contraste de la pantalla, hay varios tipos de LCD que se pueden encontrar en el mercado actual, algunos utilizan una lámpara LED para resaltar los caracteres desplegados y mientras que otras no utilizan iluminación.

La LCD cuenta con 14 pines de conexión, de los cuales 8 son utilizados por el bus de datos bidireccional que permite la comunicación con otros dispositivos, también cuenta con pines de control, alimentación, datos, contraste, y habilitación del dispositivo, en caso de tener lámpara se agregan 2 pines más. En la tabla X se describe la función de los pines de la LCD.

Tabla X. **Descripción de pines de la LCD**

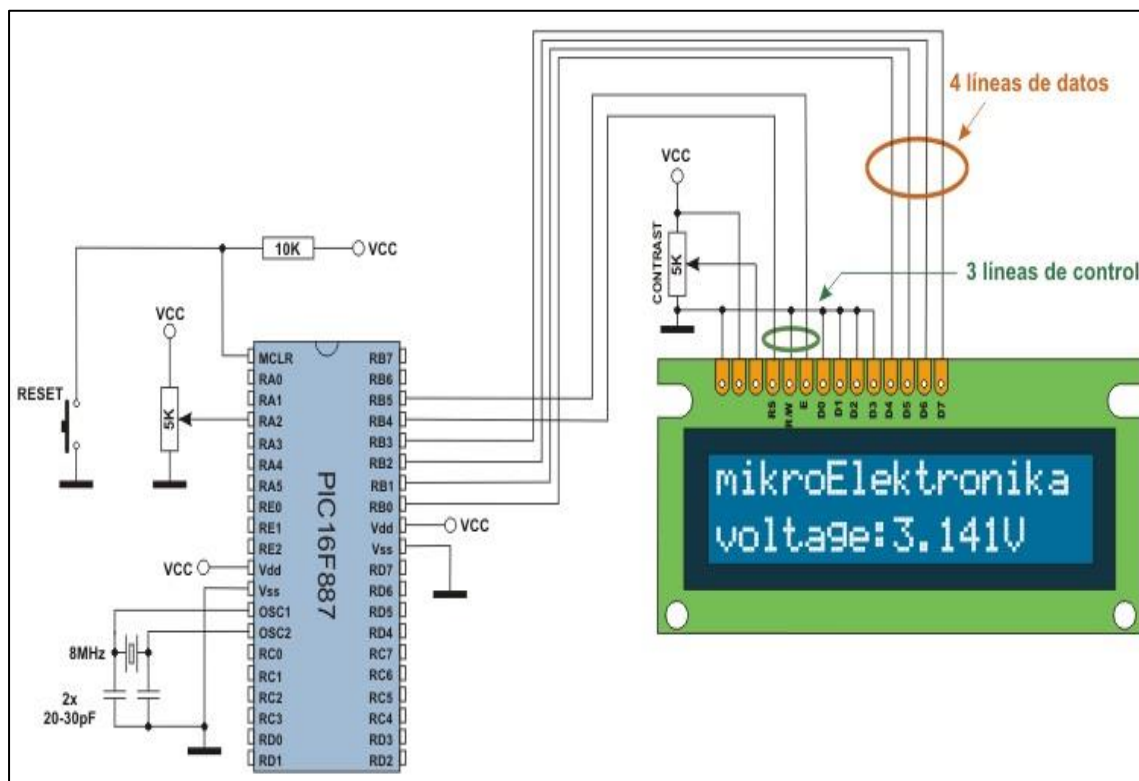
Pin	Símbolo	Descripción
1	VSS	Tierra de alimentación GND
2	VDD	Alimentación de + 5V. CD.
3	VEE	Ajuste de contraste del cristal líquido (0 a + 5V)
4	RS	Selección del registro control/datos RS = 0 reg. control RS = 1 reg. datos
5	R/W	Lectura /escritura en LCD R/W = 0 escritura (Write) R/W = 1 lectura (Read)
6	E	Habilitación E = 0 módulo desconectado E = 1 módulo conectado
7	D0	LSB bus bidireccional
8	D1
9	D2
10	D3
11	D4
12	D5
13	D6
14	D7	MSB bus bidireccional
15	A	Alimentación de lámpara + 3V o + 5V CD. (opcional)
16	K	Tierra GND de la lámpara (opcional)

Fuente: <http://gt.globedia.com/modulos-lcd>. Consulta: agosto de 2014.

La conexión con el microcontrolador se puede realizar de dos formas, ya sea utilizando 8 o 4 bits, la diferencia consiste en la velocidad de transmisión, si se utilizan 8 bits se envía toda la información al mismo tiempo, mientras que con 4 bits se envía la información en dos bloques, en el diseño se utiliza la conexión de 4 bits para reducir la cantidad de conexiones en el circuito, los bits no utilizados se conectan a GND.

En el PIC16F887 hay un puerto de uso dedicado para la conexión y control del LCD, el cual responde al nombre de puerto B y se conecta en los pines RB0 a RB7. En la figura 33 se ilustra un diagrama de la conexión de un módulo LCD con el PIC16F887.

Figura 33. **Conexión de LCD con el PIC16F887**

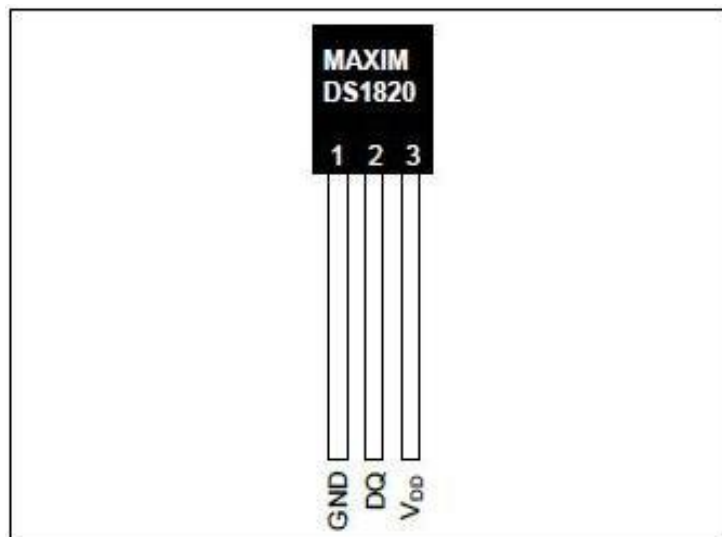


Fuente: <http://www.mikroe.com/chapters/view/82/capitulo-4-ejemplos>. Consulta: agosto de 2014.

5.4.3. Módulo sensores de temperatura DS18S20

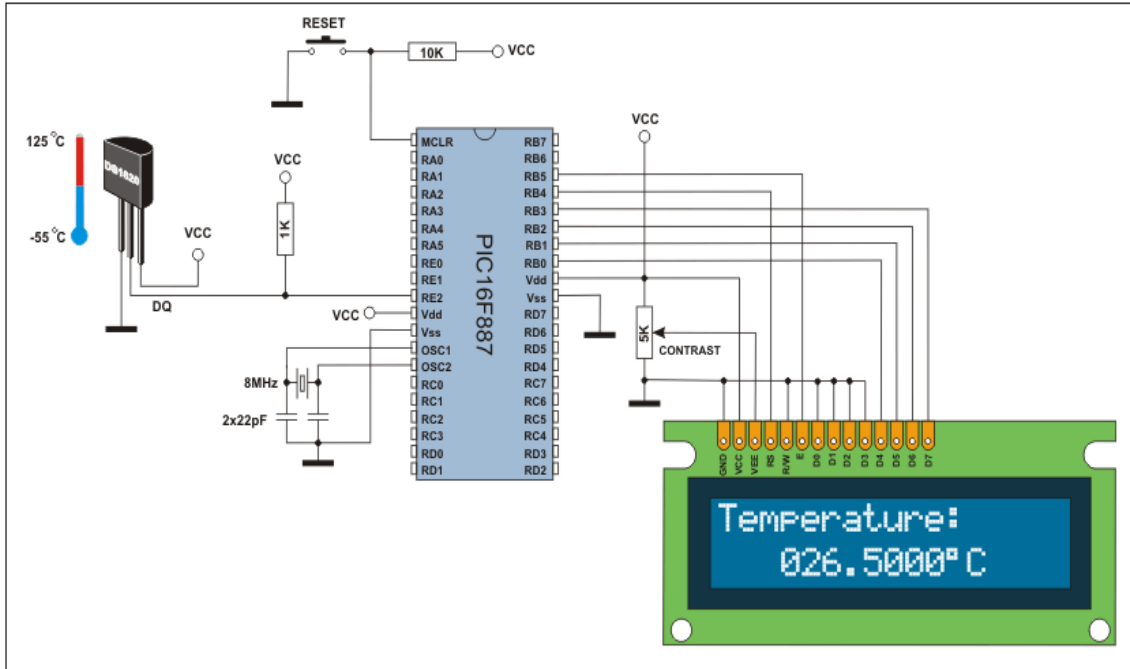
Este módulo cuenta con cuatro sensores digitales DS18S20 para la medición de temperatura. Para la comunicación con el PIC16F887 utiliza el bus 1-wire para enviar datos a través un solo cable, para habilitar el bus se utiliza una resistencia de 4,7 K Ω conectada a + 5V, la transmisión se realiza en el los pines RA0, RA1, RA2 y RA3 del PIC. En la figura 34 se ilustra el sensor DS18S20, y en la 35 se ilustra el diagrama de conexión de un DS18S20 con el PIC16F887.

Figura 34. Sensor DS18S20



Fuente: Maxim Integrated Products Inc. *DS18S20 High Precision 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet*. p. 1.

Figura 35. **Conexión de un DS18S20 con el PIC16F887**



Fuente: <http://www.mikroe.com/chapters/view/82/capitulo-4-ejemplos>. Consulta: agosto de 2014.

5.4.4. Módulo sensores de humo

Este módulo cuenta con tres sensores de humo MQ-2 para realizar la detección de humo, este sensor viene instalado en una pequeña placa de circuito impreso que incluye una resistencia para ajuste de sensibilidad, cuenta con 3 terminales: + 5V, GND, y S para la transferencia de señal, los pines para la conexión con el PIC16F887 son el RD5, RD6, RD7. En la figura 36 se ilustra el sensor MQ-2.

Figura 36. **Sensor MQ-2**



Fuente: [http://www.abra-electronics.com/products/SEN0127-Analog-Gas-Sensor\(MQ2\).html](http://www.abra-electronics.com/products/SEN0127-Analog-Gas-Sensor(MQ2).html).

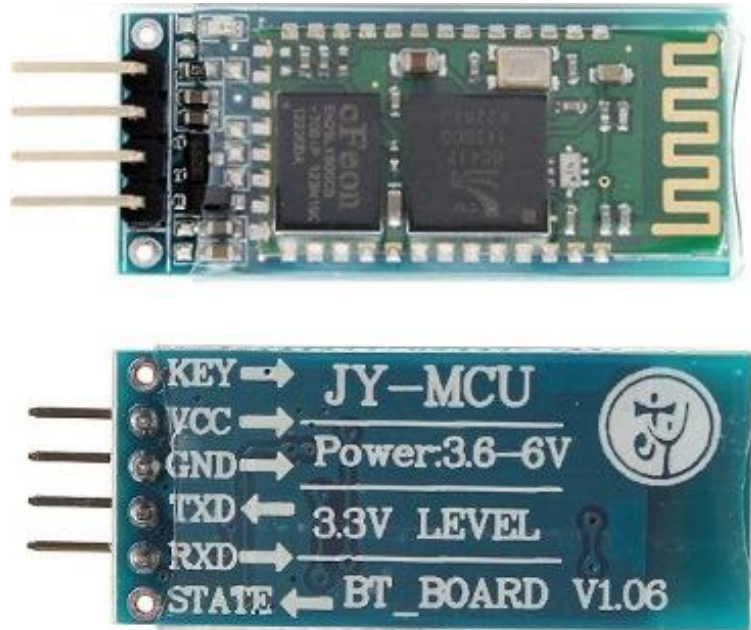
Consulta: agosto de 2014.

5.4.5. Módulo Bluetooth

Es un dispositivo integrado de baja potencia y comunicación serial que pertenece a la clase 1 de Bluetooth, cuenta con seis terminales de conexión de las cuales solo se utilizan cuatro, para la comunicación serial utiliza el protocolo UART y la alimentación se realiza con + 5V y GND.

Los pines utilizados para la conexión con el PIC16F887 son el RC6 y el RC7, por medio de ellos se envía la información en formato JSON. En la figura 37 se ilustra el módulo Bluetooth y en la tabla XI se describen los pines de este módulo para microcontrolador.

Figura 37. **Módulo Bluetooth para microcontrolador**



Fuente: <http://diymakers.es/arduino-bluetooth>. Consulta: agosto de 2014.

Tabla XI. **Descripción de pines del módulo Bluetooth**

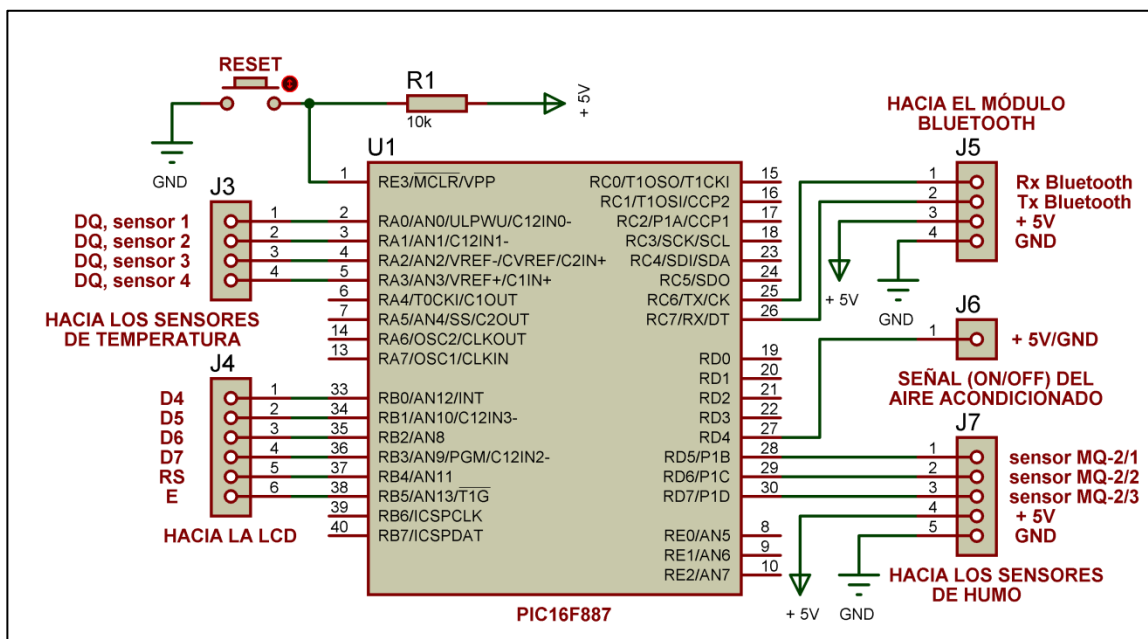
Pin	Símbolo	Descripción
1	KEY	Entrada al modo de configuración del módulo (sin conexión)
2	VCC	Alimentación de + 5V
3	GND	Tierra de alimentación GND
4	TXD	Transmisión de datos, se conecta con el pin RX del PIC
5	RXD	Recepción de datos, se conecta con el pin TX del PIC
6	STATE	Salida para visualizar la transmisión de datos (sin conexión)

Fuente: elaboración propia.

5.5. Diagramas y circuito impreso

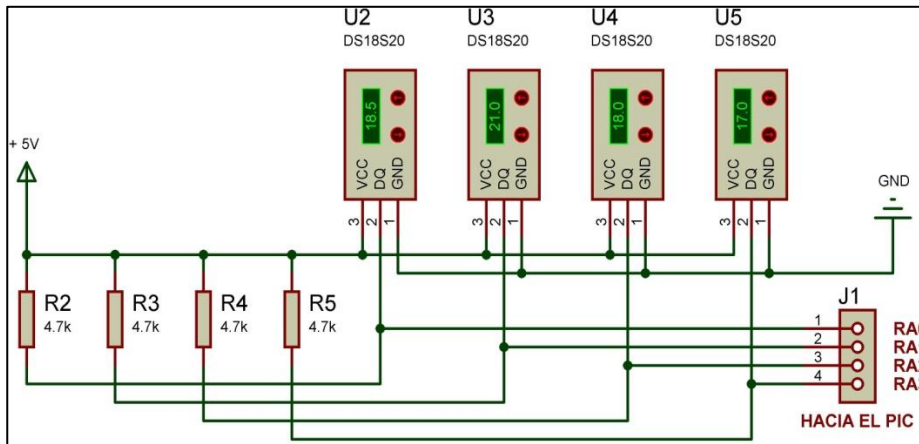
Para que todo el sistema sea funcional debe realizarse una conexión entre todos los módulos, el diseño del circuito se presenta en las figuras 38, 39 y 40.

Figura 38. Diagrama SCTDH 1



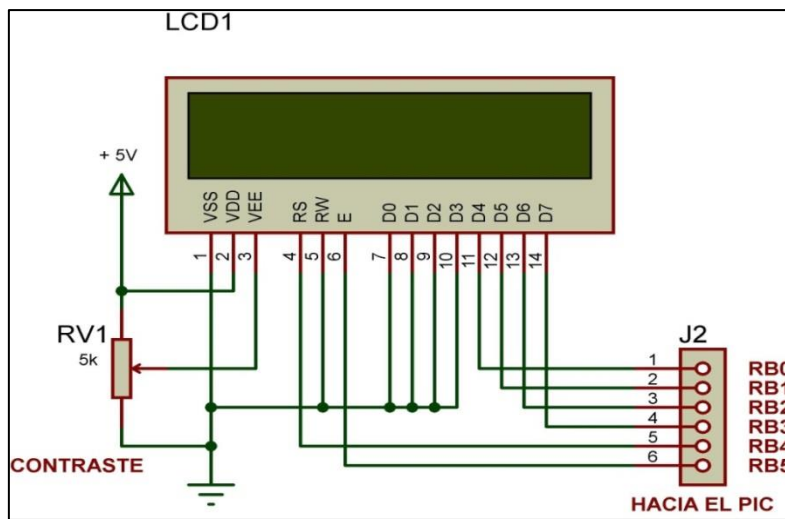
Fuente: elaboración propia, con programa de simulación PROTEUS v.7.6.

Figura 39. Diagrama SCTDH 2



Fuente: elaboración propia, con programa de simulación PROTEUS v.7.6.

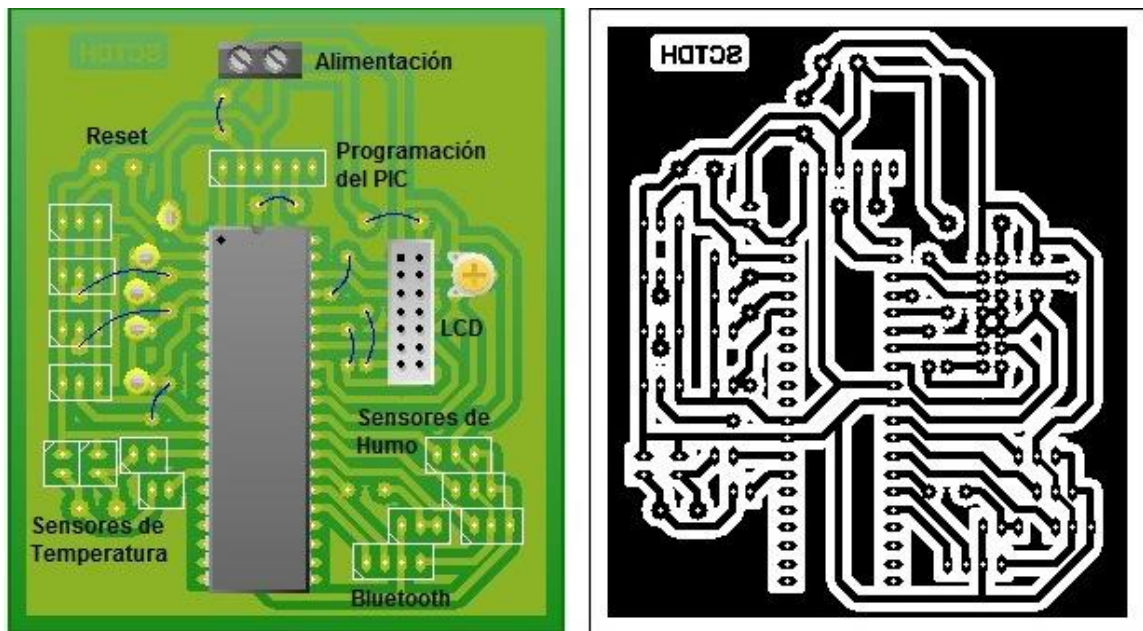
Figura 40. Diagrama SCTDH 3



Fuente: elaboración propia, con programa de simulación PROTEUS v.7.6.

En la figura 41 se presenta el diagrama de circuito impreso y los componentes ya instalados.

Figura 41. **Circuito impreso**

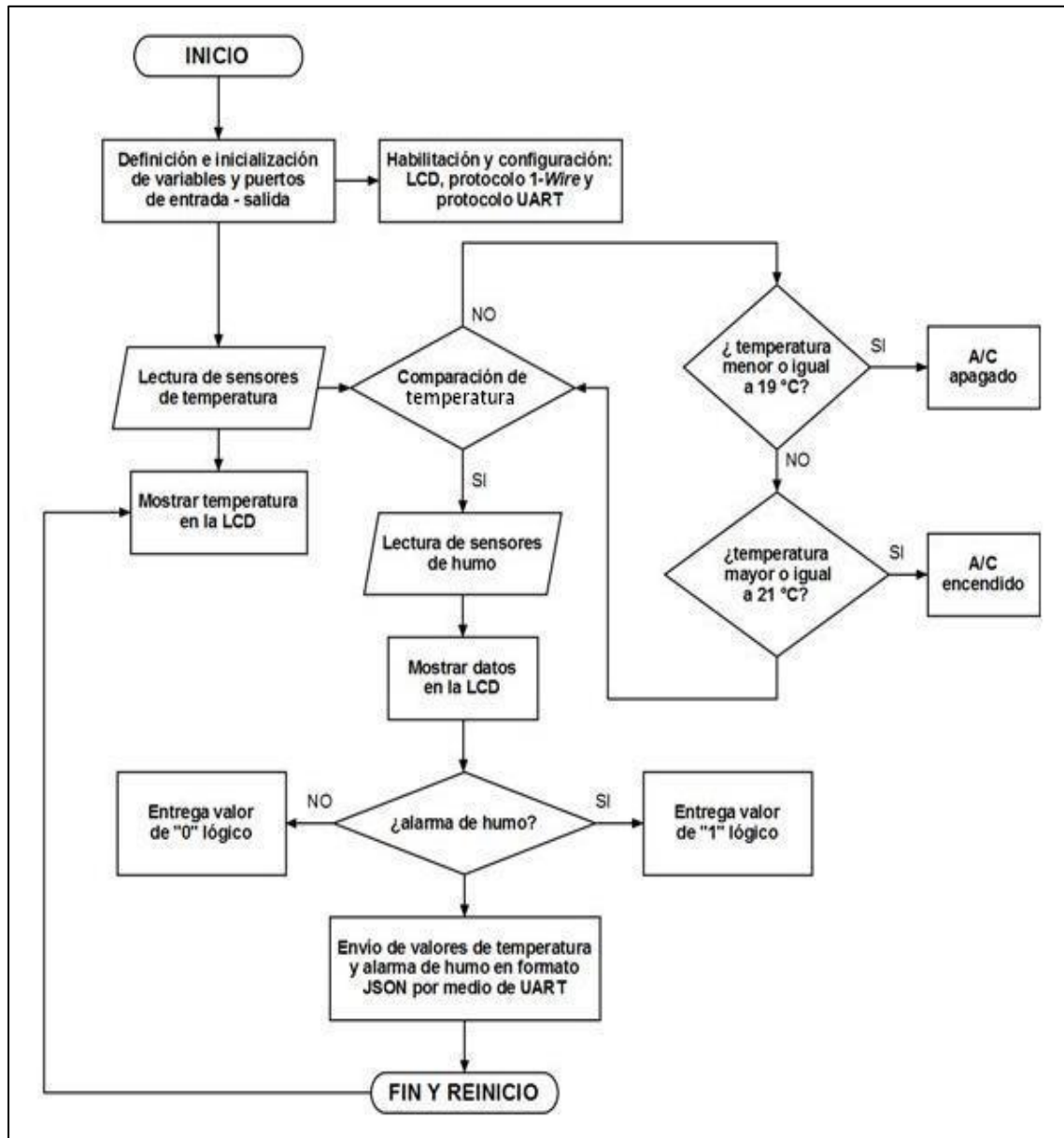


Fuente: elaboración propia, con programa para impresos PCB Wizard v.3.5.

5.6. Diagrama de flujo

En la figura 42 se presenta el diagrama de flujo del SCTDH. En él se muestran los procesos y toma de decisiones que realiza el PIC16F887.

Figura 42. Diagrama de flujo del SCTDH



Fuente: elaboración propia, con programa para diagramas EDGE Programmer v.6.2.

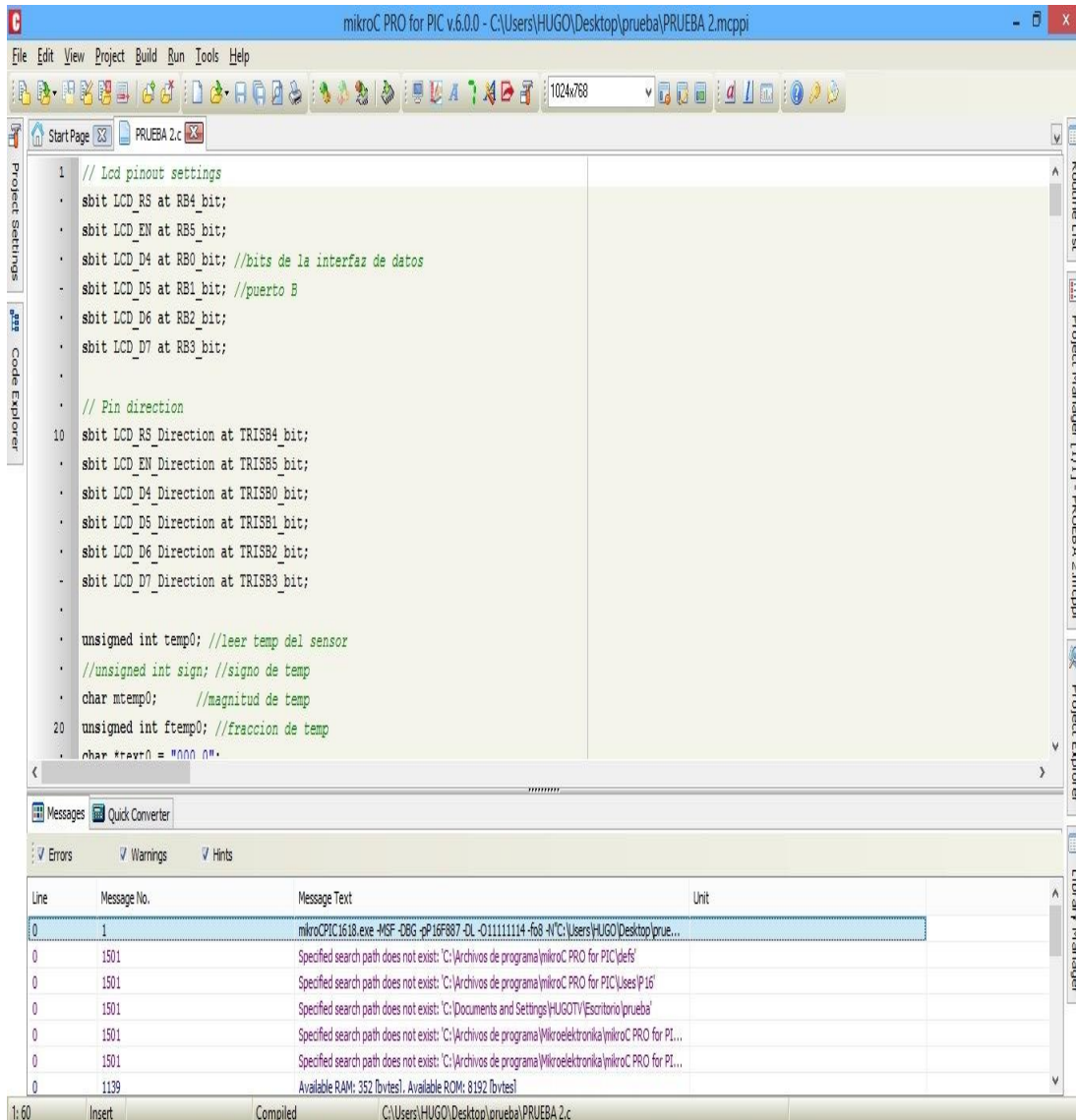
5.7. Programación y grabación del microcontrolador

Para realizar el programa se utiliza el compilador mikroC, desarrollado por Microelectrónica. Este software permite crear un código de programación en lenguaje C, además cuenta con muchas librerías especiales para hardware y software, entre ellas se pueden mencionar la librería 1-Wire, librería UART, y la librería de la LCD, también posee herramientas adicionales que ayudan a comprender de mejor forma el código, debido a sus prestaciones se considera como una excelente solución en el desarrollo de programas para microcontroladores.

Una vez que se compila el código, mikroC se encarga de convertirlo en un archivo .HEX, el motivo de este proceso es debido a que el microcontrolador solo puede entender un lenguaje de unos y ceros, es importante mencionar que antes de compilar el código se deben habilitar las librerías utilizadas, configurar los parámetros del módulo oscilador, la frecuencia del reloj, y el PIC que se va a utilizar.

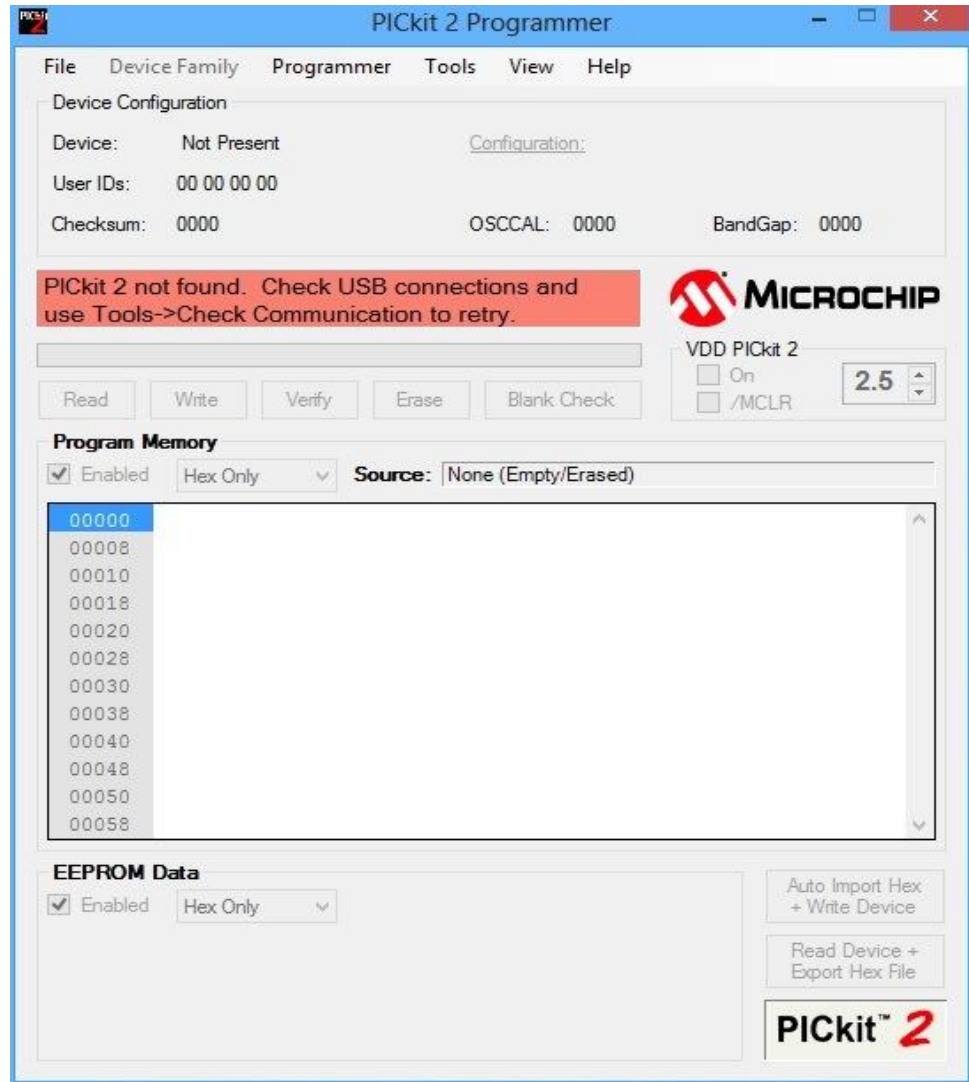
Para grabar el código en el microcontrolador se utiliza el software PICkit 2 Programmer, desarrollado por Microchip Technology Inc. Esta aplicación permite grabar el código .HEX directamente en el microcontrolador, este proceso se realiza a través de una programadora USB. Antes de grabar el microcontrolador es recomendable verificar que se puede leer el dispositivo, luego de esto se debe borrar el dispositivo y asegurarse de que esta en blanco, por último se carga el archivo .HEX y se escribe en el microcontrolador. En la figura 43 se ilustra el compilador mikroC, y en la figura 44 se ilustra la aplicación PICkit 2 Programmer.

Figura 43. **Compilador mikroC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **PICkit 2 Programmer**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Es esencial tener conocimiento de las características y de los elementos básicos que conforman un sistema de control, ya que de esta forma se puede diseñar y realizar un sistema de control óptimo.
2. El microcontrolador PIC16F887 cumple con las especificaciones requeridas del diseño, gracias a que su módulo de comunicación serial permite la conexión con los sensores de temperatura y el módulo Bluetooth.
3. Para monitorear la temperatura en un área específica, la mejor opción es utilizar sensores digitales, debido a que entregan una señal lógica que es manejable directamente por el microcontrolador y además presentan bajas pérdidas en la transmisión de datos.
4. Es fundamental implementar una base de datos en el servidor principal del Centro de Cálculo e Investigación Educativa de la Facultad de Ingeniería, para poder llevar un registro de los datos proporcionados por el módulo Bluetooth del Sistema de Control de Temperatura y Detección de Humo SCTDH.
5. El SCTDH es un sistema muy versátil que permite ser adaptado en ambientes industriales, empresas, centros educativos e incluso viviendas.

RECOMENDACIONES

1. Tomar en cuenta el ruido eléctrico que se puede presentar en el sistema de control a causa del aire acondicionado.
2. Estudiar nuevos tipos de microcontroladores que puedan realizar procesamiento e intercambio de información de manera más rápida y eficiente.
3. Realizar pruebas de ubicación de los sensores en varios puntos de la sala de servidores antes de instalarlos de forma definitiva.
4. Evaluar si es necesaria la implementación de más sensores de temperatura y humo para obtener una mejor respuesta del SCTDH.
5. Investigar nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica para la transmisión de datos entre dispositivos.
6. Tomar en cuenta la interferencia de otras tecnologías inalámbricas que puedan estar funcionando dentro de la sala de servidores, ya que pueden afectar el rendimiento en la transmisión de datos.
7. Puesto que los datos que envía el SCTDH se almacenan en una base de datos de un servidor central, considerar la importancia de hacer una copia de seguridad de los datos de forma periódica.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANGULO, José; ANGULO, Ignacio. *Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones Primera Parte PIC16F84*. 3a ed. España: McGraw-Hill, 2003. 357 p. ISBN: 84-481-3788-4
2. BATES, Martin. *Interfacing PIC Microcontrollers. Embedded design by interactive simulation*. Gran Bretaña: Elsevier, 312 p. ISBN: 978-0-7506-8028-8
3. COOPER, William; HELFRICK, Albert. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. México: Pearson Educación, 450 p. ISBN: 968-880-236-0
4. *DS18S20 High Precision 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet*. [en línea]. Estados Unidos: Maxim Integrated Products Inc., 2010 [ref. de 31 de julio de 2014]. Disponible en Web:
<<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf>>
5. GOLNARAGHI, Farid; KUO, Benjamín C. *Automatic Control Systems*. 9a ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 944 p. ISBN: 978-0470-04896-2
6. KUO, Benjamín. *Sistemas de control automático*. 7a ed. México: Prentice Hall, 1996. 897 p. ISBN: 968-880-723-0

7. LABIOD, Houda; AFIFI, Hossam; DE SANTIS, Constantino. *Wi-fi, Bluetooth, ZigBee and WiMax*. Holanda: Springer, 2007. 316 p. ISBN: 978-1-4020-5396-2
8. NISE, Norman. *Control Systems Engineering*. 6a ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 998 p. ISBN: 978-0470-54756-4
9. OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. 3a ed. México: Pearson Educación, 1998. 997 p. ISBN: 970-17-0048-1
10. *PIC16F887 Data Sheet*. [en línea]. Estados Unidos: Microchip Technology Inc., 2007 [ref. de 17 de julio de 2014]. Disponible en Web:
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291D.pdf>>
11. *Technical Data MQ-2 Gas Sensor*. [en línea]. China: Hanwei Electronics Co.,Ltd., [ref. de 5 de agosto de 2014]. Disponible en Web:
<<http://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/MQ-2.pdf>>