

**Universidad de Oriente**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica**  
**Departamento de Telecomunicaciones**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Sistema de supervisión y control de las  
condiciones ambientales para la Región Militar  
Santiago de Cuba.**

**Autor: Alejandro Miguel Chales Tamayo**

**Tutor:**

**MSc. Ing. Daniel Iván Garrido Rodríguez.**

**Santiago de Cuba**

**Junio, 2015**

**Universidad de Oriente**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica**  
**Departamento de Telecomunicaciones**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Sistema de supervisión y control de las  
condiciones ambientales para la Región Militar  
Santiago de Cuba.**

**Autor: Alejandro Miguel Chales Tamayo**

**Tutor:**

**MSc. Ing. Daniel Iván Garrido Rodríguez.**

**Consultante: Cap. Ing. Ramón Peña Gómez**

**Santiago de Cuba**

**Junio, 2015**



### **COMPROMISO DEL AUTOR**

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

---

Firma del Autor

## PENSAMIENTO

*“Sin motivación no hay amor, sin amor por la tarea que se cumple, por la responsabilidad que se ejerce, no puede haber resultados.”*

*General de Ejército Raúl Castro Ruz*

## DEDICATORIA

*A mis padres y hermano, que han estado siempre cuando  
los he necesitado, a mi novia, a mi familia y amigos.  
A todos y cada uno de los que hicieron posible este sueño.*

## AGRADECIMIENTOS

A la Revolución por darme la oportunidad de formarme como profesional y educarme en los más altos principios éticos y morales, que deben caracterizar a un joven comunista de estos tiempos.

A mis padres Ana Cecilia y Neldi, por todo el amor y el apoyo, por la educación que me dieron, por la fe que siempre han tenido en mí, por la inmensa ayuda que me proporcionaron en la realización de este empeño, no podría un hijo tener mejores padres.

A Neldis Leandro, por ser hermano y amigo; un hermano no podría estar más orgulloso de tenerlo.

A mi novia Beatriz, por la comprensión y la paz que me transmitió en la realización de este trabajo, por ser la compañera dedicada que es y por el amor que me demuestra a diario.

A mis suegros Luisa y Ricardo, por ser mis padres sustitutos, por estar para mí en los buenos y malos momentos, por todos los consejos y por acogerme como uno más de sus hijos.

A mi profesor y tutor Daniel Iván Garrido Rodríguez, por todas sus enseñanzas, por la confianza depositada en mí, por su incalculable ayuda, por todo lo bueno que me inculcó, llevaré por siempre el orgullo de haber sido su alumno.

Al Cap. Ing. Ramón Peña Gómez, por su apoyo en la realización de este trabajo y muchos otros a lo largo de la carrera.

Al Teniente Coronel Jorge Trujillo Reyna y Teniente Coronel (r) José Aldana González, por toda la educación y formación militar que me dieron.

A mis profesoras y profesores Elizabeth, Berta, Ramón Maurisset, Héctor Rivas, por ser excelentes educadores.

A Roberto García y al profesor Manuel Verdecia por la ayuda y experiencias compartidas programando microcontroladores PIC.

A mis compañeros y amigos: Lalé, Bello, Eric, Guillén, Brugal, Aguilera, Eloy, José Miguel, Raisal y Jorge Miguel, por todo lo que compartimos y vivimos en esta larga carrera por alcanzar este gran sueño.

Al Teniente Coronel Javier Pérez Pérez, por su ayuda inconmensurable.

A todos aquellos que de una forma u otra, influyeron en mi formación, e hicieron su aporte para la consecución de este gran objetivo. A todos muchas gracias.

## RESUMEN

En el presente trabajo, se realiza el diseño de un sistema de supervisión y control de las condiciones ambientales para la Obra Ingeniera No. 1 de la Región Militar (RM) Santiago de Cuba, que permita proteger a los medios materiales que en ella se almacenan contra factores agresivos del clima como altos valores de temperatura y humedad relativa, los cuales a su vez provocan afectaciones como la corrosión, envejecimiento y biodeterioro de los mismos. En el informe se exponen aspectos teóricos relacionados con las variables climáticas y regularidades del clima dentro de las obras ingenieras, las normas de temperatura y humedad relativa que se deben cumplir para estos locales, se realiza una descripción física del local, así como un estudio acerca del microcontrolador PIC18F4550 y otros componentes electrónicos utilizados en el diseño. Por último se realiza el diseño del sistema.

**Palabras clave:** microcontroladores PIC, supervisión, condiciones ambientales.

## *ABSTRACT*

In the present work, comes true the design of a supervision and control system of the environmental conditions for the Engineer Work No.1 of the Military Region (RM) Santiago of Cuba, that permits protecting the material resources that in her they store themselves against aggressive factors of the weather like high values of temperature and relative humidity, which in turn provoke encumbrances like corrosion, aging and biodeterioration of the same. In the report, explain theoretic aspects related with the climatic variables and regularities of the weather within the engineering works, the standards of temperature and relative humidity that should come true for these premises, comes true a physical description of the locale, as well as a study about the microcontroller PIC18F4550 and other electronic components used in the design. Finally, the system design comes true.

**Keywords:** PIC microcontrollers, supervision, environmental conditions.

# ÍNDICE

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN .....                                                               | 1  |
| CAPITULO 1 . FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                                           | 3  |
| 1.1 Sistemas de control automático. ....                                         | 3  |
| 1.1.1 Clasificación de los sistemas de control .....                             | 4  |
| 1.2 Sistemas de medida.....                                                      | 5  |
| 1.2.1 Funciones de un sistema de medida.....                                     | 5  |
| 1.3 Microcontroladores PIC.....                                                  | 7  |
| 1.3.1 Microcontroladores gama baja .....                                         | 8  |
| 1.3.2 Microcontroladores gama media .....                                        | 8  |
| 1.3.3 Microcontroladores gama alta .....                                         | 9  |
| 1.4 Microcontrolador PIC18F4550.....                                             | 9  |
| 1.4.1 Memoria de programa (ROM) .....                                            | 14 |
| 1.4.2 Memoria EEPROM de datos .....                                              | 14 |
| 1.4.3 Memoria RAM .....                                                          | 14 |
| 1.4.4 Registros de Funciones Especiales (SFR) .....                              | 14 |
| 1.4.5 Registros de Funciones Generales .....                                     | 15 |
| 1.4.6 Puertos de Entrada/Salida (E/S) .....                                      | 15 |
| 1.4.7 Sistema de interrupciones.....                                             | 18 |
| 1.4.8 Módulo Conversor Analógico-Digital (A/D) .....                             | 20 |
| 1.4.9 Módulo I <sup>2</sup> C .....                                              | 22 |
| 1.4.10 Módulo EUSART .....                                                       | 23 |
| 1.5 Temporizador: TIMER 0 .....                                                  | 24 |
| 1.6 Herramientas para grabación de microcontroladores. ....                      | 26 |
| 1.7 Herramientas de diseño. ....                                                 | 27 |
| 1.7.1 Compilador C, MikroC Pro. ....                                             | 27 |
| 1.7.2 Entorno de desarrollo Proteus Professional. ....                           | 28 |
| CAPITULO 2 . CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL LOCAL.....                              | 30 |
| 2.1 Variables climáticas y regularidades del clima en las obras ingenieras ..... | 30 |
| 2.1.1 Temperatura .....                                                          | 31 |
| 2.1.2 Humedad relativa .....                                                     | 31 |
| 2.2 Caracterización de la Obra Ingeniera No.1.....                               | 32 |
| 2.2.1 Descripción física y características .....                                 | 33 |



|                                                                |                                                                       |    |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.2                                                          | Regularidades del clima dentro de la obra. ....                       | 34 |
| 2.3                                                            | Supervisores ambientales empleados actualmente por las FAR. ....      | 35 |
| 2.3.1                                                          | Supervisor Testo 605-H1-Termohigrómetro de bolsillo.....              | 35 |
| 2.3.2                                                          | Supervisor Testo 177-H1-Termohigrómetro. ....                         | 36 |
| 2.3.3                                                          | Supervisor Testo 425- Anemómetro térmico con sonda de velocidad. .... | 36 |
| 2.3.4                                                          | Supervisor Testo 608-H1/H2-Termohigrómetro.....                       | 37 |
| CAPITULO 3 . DISEÑO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL ..... |                                                                       | 38 |
| 3.1                                                            | Diseño del Hardware.....                                              | 39 |
| 3.2                                                            | Sensor de temperatura LM-35.....                                      | 41 |
| 3.2.1                                                          | Cálculo del error introducido por el sensor. ....                     | 41 |
| 3.3                                                            | Acondicionador de nivel .....                                         | 43 |
| 3.4                                                            | Convertor de voltaje a corriente.....                                 | 44 |
| 3.5                                                            | Convertor de corriente a voltaje.....                                 | 46 |
| 3.6                                                            | Fuente de alimentación para LM35 y acondicionadores de señal. ....    | 47 |
| 3.7                                                            | Sensor de humedad SHT-11.....                                         | 47 |
| 3.7.1                                                          | Especificaciones del sensor. ....                                     | 48 |
| 3.7.2                                                          | Comunicación con el sensor .....                                      | 50 |
| 3.7.3                                                          | Registro de estado .....                                              | 51 |
| 3.7.4                                                          | Medición de humedad relativa y temperatura.....                       | 52 |
| 3.7.5                                                          | Conversión de la señal recibida. ....                                 | 53 |
| 3.8                                                            | Actuadores.....                                                       | 55 |
| 3.9                                                            | Fuente de alimentación del dispositivo.....                           | 57 |
| 3.10                                                           | Diagrama de flujo del programa.....                                   | 58 |
| 3.11                                                           | Simulación del sistema de supervisión y control.....                  | 60 |
| 3.12                                                           | Diseño del circuito impreso.....                                      | 63 |
| 3.13                                                           | Valoración económica .....                                            | 66 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....                            |                                                                       | 68 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                               |                                                                       | 69 |
| GLOSARIO DE TÉRMINOS.....                                      |                                                                       | 71 |
| ANEXOS .....                                                   |                                                                       | 72 |

## INTRODUCCIÓN

La agresividad de la política imperialista contra la Revolución Cubana, ha obligado a invertir cuantiosos recursos en la preparación del país para la defensa, en este sentido una de las tareas más importantes ha sido la construcción de obras ingenieras para la protección del personal así como la conservación de medios técnicos y materiales desde tiempos de paz.

Resultan evidentes las afectaciones que provocan las condiciones ambientales agresivas presentes en las obras a los medios que en ellas se almacenan, es por eso que existen un conjunto de regulaciones y normas para la ejecución de procesos tecnológicos de conservación y almacenamiento de los mismos, las cuales pueden variar en correspondencia con el tipo de medio almacenado.

La actividad de control ambiental en las FAR se define como un conjunto de medidas encaminadas a conocer en las obras ingenieras el comportamiento de los factores climáticos, así como la aplicación de procedimientos, métodos y tecnologías en aras de minimizar los efectos negativos de las condiciones ambientales sobre el personal, la técnica de uso militar y otros medios materiales. [1]

El sistema de supervisión y control deberá registrar y controlar en todo momento los factores ambientales que se exigen en las normas para las diferentes categorías de técnica y medios materiales. Entre las variables de interés en este contexto se encuentran la temperatura y la humedad relativa.

### **Antecedentes del problema**

La Región Militar (RM) de Santiago de Cuba no dispone de ningún sistema para supervisar y controlar en tiempo real y de forma automatizada variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa en sus obras ingenieras, esto impide un control estricto sobre los factores agresivos que influyen en el medio ambiente de estas, los cuales provocan afectaciones diversas al personal, la técnica y a las propias instalaciones, muestra de ello lo constituye el deterioro por corrosión que afecta a algunos medios.

**Problema**

Inexistencia de condiciones ambientales adecuadas en la Obra No.1 de la Región Militar Santiago de Cuba.

**Objeto de estudio**

Sistemas de supervisión y control.

**Campo de acción**

Sistemas de supervisión y control con microcontroladores.

**Objetivo General**

Diseñar un sistema para supervisar y controlar las condiciones ambientales en la Obra No.1 de la RM Santiago de Cuba utilizando el microcontrolador PIC18F4550.

**Objetivos específicos**

- Estudiar los sistemas de supervisión y control de variables ambientales, las normas para las obras ingenieras de las FAR y el microcontrolador PIC18F4550.
- Realizar un levantamiento y caracterización de la Obra No.1 de la Región Militar Santiago de Cuba.
- Diseñar el sistema de supervisión y control con el microcontrolador PIC18F4550.

## **CAPITULO 1 . FUNDAMENTOS TEÓRICOS.**

En la actualidad, con los avances de nuevas tecnologías de la electrónica y las telecomunicaciones se han desarrollado diversos dispositivos para ejecutar el control ambiental en locales que por las condiciones climáticas a las que se encuentran expuestos o las actividades que en ellos se realizan lo requieren, utilizando como componentes básicos sensores y microcontroladores.

En este capítulo se realiza un estudio acerca de los sistemas de supervisión y control, y los microcontroladores PIC, específicamente el PIC18F4550.

### **1.1 Sistemas de control automático.**

El control automático ha jugado un papel importante en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Los avances en la teoría y práctica de control automático brindan medios para lograr el funcionamiento óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción, liberar de la complejidad de muchas rutinas, de las tareas manuales repetitivas [2].

El concepto de control es muy amplio y comprende escenarios de diversa complejidad. En su concepto más simple, el control supone el hecho de que un sistema gobierne a otro.

La palabra automático implica que existe cierta sofisticación en el sistema de control. Por lo general automático significa que el sistema es normalmente capaz de adaptarse a una gama variable de condiciones de operación y que es capaz de responder a cierta variedad de entradas de forma satisfactoria. Sin embargo no todos los sistemas de control tienen la característica de ser automáticos, normalmente, esta característica se logra realimentando al variables de salida y comparándolas con la señal de mando. [3]

De ahí que podemos concluir que el objetivo fundamental de un sistema de control es obtener en un proceso dado la respuesta deseada, pero sin la intervención directa del usuario sobre el sistema. Para ello el usuario se sirve de las variables de control, que le permiten especificar la respuesta que desea. A partir de estas señales, el sistema de control genera las llamadas señales de mando que son las que actúan sobre el equipo con el objetivo de modificar la salida del proceso. Generalmente el sistema trabaja con señales de baja potencia y gobierna unos accionamientos o actuadores.

### 1.1.1 Clasificación de los sistemas de control

Los sistemas de control poseen dos clasificaciones, dependiendo de si se compara o no la salida con la entrada:

#### **Sistema de control a lazo abierto:**

El sistema de control no recibe ningún tipo de información del comportamiento del proceso, es decir, la salida del proceso no afecta a la acción de control.

Este método se utiliza cuando se conoce de antemano la relación entre la entrada y la salida y no existen perturbaciones de ningún tipo. Una perturbación es una señal que modifica negativamente la salida de un sistema. Si sobre un sistema se producen perturbaciones impredecibles, los sistemas de control en bucle abierto no pueden corregir la situación ya que el sistema de control no recibe información sobre ese hecho. [4]

#### **Sistema control a lazo cerrado:**

Un sistema de control a lazo cerrado es aquel en el cual la acción de control es dependiente de la salida. Los sistemas de control de lazo cerrado se llaman comúnmente sistemas de control realimentados. En este caso el usuario fija las variables de referencia, que establecen el comportamiento deseado, y el sistema de control genera las señales de mando adecuadas, para que el proceso o variable regulada, se mantenga en el valor deseado a pesar de las perturbaciones.

Dentro de las características esenciales de estos sistemas podemos citar las siguientes:

- Aumento de la exactitud.
- Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- Efectos reducidos de la no linealidad. Cuando la entrada y la salida coinciden, no se requiere acción de control. Cuando existe una diferencia entre ambas, el dispositivo de comparación suministra una señal de acción de control al controlador. [5]

## 1.2 Sistemas de medida.

Un sistema de medida electrónico es aquel equipo cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador o a otro sistema técnico de control.



Fig. 1. Objeto de un sistema de medida.

### 1.2.1 Funciones de un sistema de medida

Considerando el sistema de medida como una caja negra, la entrada sería el valor verdadero de la variable a medir y la salida, el valor medido. Solo en el caso ideal, la diferencia entre ambos valores será nula, por lo que siempre cometeremos un error de medida. Las causas de este error son de origen diverso: ruido del sistema de medida, interferencias exteriores, desviaciones en los parámetros de componentes, mala calibración, etc. En un sistema podemos distinguir tres funciones principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y distribución de los datos.

- **Adquisición de datos:** la información de las variables a medir es adquirida y convertida en una señal eléctrica. De esta etapa dependerán en gran medida las prestaciones del sistema de medida.
- **Procesamiento de datos:** consiste en el procesamiento, selección y manipulación de los datos con arreglo a los objetivos perseguidos. Esta función suele ser realizada por un procesador digital, tipo microcontrolador o procesador digital de señal (*Digital Signal Processor* o DSP).
- **Distribución de datos:** el valor medido se presenta a un observador (por ejemplo mediante un *display*) se almacena (por ejemplo, en disco o en un chip de memoria) o bien se transmite a otro sistema.

A su vez, la función de adquisición de datos puede ser dividida en unidades funcionales más pequeñas. En primer lugar, la variable del mundo físico es convertida en una señal eléctrica mediante un dispositivo sensor a fin de poder ser procesada adecuadamente. Con frecuencia la señal procedente del sensor tiene unas características que la hacen poco

adecuada para ser procesada, señal de pequeño nivel, espectro grande, falta de linealidad, etc.

A continuación se muestra un esquema en bloques de un sistema de medida aplicado al control automático de procesos.

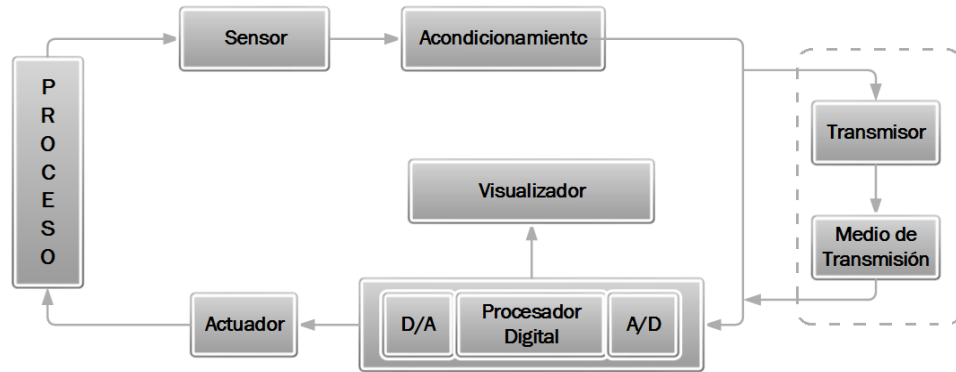


Fig. 1. Esquema general de un sistema de medida aplicado al control automático.

En el esquema, se aprecian los siguientes bloques fundamentales:

- **Sensor:** su misión es capturar la variable de proceso, variable física, y convertirla en una señal eléctrica.
- **Acondicionamiento de señal:** trata a la señal eléctrica para adaptarla al siguiente bloque de la cadena. El acondicionamiento puede incluir:
  - Amplificación.
  - Filtrado.
  - Conversión de niveles.
  - Conversión de tensión a corriente, y viceversa.
  - Conversión de tensión a frecuencia, y viceversa.
  - Linealización.
- **Visualizador:** unidad que presenta la información al usuario.
- **Sistema de control:** procesa los datos de acuerdo al algoritmo de control y genera la señal de control. Los sistemas de control pueden ser:
  - Analógicos: emplean circuitos analógicos para el control.
  - Digitales: basados en procesadores digitales.
- **Sistemas de transmisión remota:** permite transmitir la información a distancia, en caso de que sea necesario. [4]

### 1.3 Microcontroladores PIC

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de una computadora. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna. Esta última característica es la que le confiere la denominación de «controlador incrustado» (*embedded controller*).

El microcontrolador es una computadora dedicada. En su memoria sólo reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus líneas de entrada/salida soportan el conexionado de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar, y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única finalidad atender sus requerimientos. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

La diferencia entre un microcontrolador y un microprocesador radica en que este último, es un circuito integrado que no tiene memoria RAM interna. La CPU está formada por la Unidad de Control, que interpreta las instrucciones y la Unidad de Datos, que las ejecuta. Los terminales de un microprocesador sacan al exterior las líneas de los buses de direcciones, datos y control, que permiten conectarle la memoria y los módulos de E/S. Luego un microprocesador es un sistema abierto ya que su configuración es variable dependiendo de la aplicación a la que se destine. Los microcontroladores son sistemas cerrados, que contienen en su interior una computadora completa y de prestaciones limitadas que no se pueden modificar.

Los PIC son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por *Microchip Technology Inc.*

El nombre original es PICmicro (*“Peripheral Interface Controller”* o Controlador de Interfaz de Periférico), aunque son mayormente conocidos como PIC. Su antecesor fue el PIC1650, desarrollado en 1975 por la división de microelectrónica de *General Instrument*. [6]

Los microcontroladores PIC se clasifican en clases o gamas atendiendo al tamaño de sus instrucciones:

- Gama baja: microcontroladores con instrucciones de 12 bits.
- Gama media: microcontroladores con instrucciones de 14 bits.
- Gama alta: microcontroladores con instrucciones de 16 bits.



### 1.3.1 Microcontroladores gama baja

Los microcontroladores PIC de gama baja disponen de un repertorio de 33 instrucciones de 12 bits cada una. La memoria de programa tiene una capacidad de hasta 2k (2048) palabras de 12 bits y está organizada en páginas de 512 palabras cada una. La memoria de datos está formada por registros de 8 bits y se organiza en bancos de hasta 32 registros cada uno.

Los PIC de gama baja tienen una pila (*stack*) de dos niveles, para guardar direcciones de la memoria de programa. No tienen interrupciones. Su entrada y salida tiene un pequeño número de dispositivos, que comprende hasta tres puertos de entrada y salida de hasta 8 bits cada uno, un temporizador y un comparador. Su consumo en condiciones normales es menor de 2 mA a 5V, y en el modo de bajo consumo es menor de 3  $\mu$ A. [7] Se presentan con encapsulado de 18 y 28 terminales. Los PIC de gama baja son de tres familias:

- PIC16X5xx
- PIC12X5xx
- PIC10Fxxx

### 1.3.2 Microcontroladores gama media

Estos dispositivos tienen un repertorio de 35 instrucciones de 14 bits cada una, la memoria de programa puede llegar a ser de 8k (8192) palabras de 14 bits y se organiza en páginas de 2k (2048) palabras cada una. La memoria de datos está formada por registros de 8 bits y está organizada en bancos de 120 registros cada uno con un máximo de cuatro bancos. En general, los PIC gama media poseen algo de memoria EEPROM de datos. Todos tienen una pila de 8 niveles, donde se almacenan direcciones de la memoria de programa. Admiten interrupciones y tienen una amplia variedad de dispositivos de entrada y salida. Cuentan con varios puertos paralelos para la comunicación con dispositivos externos. Disponen de hasta tres temporizadores, dos módulos de captura, comparación y modulación de ancho de pulso (PWM), varios tipos de puertos serie para la comunicación serie asincrónica y sincrónica, un convertidos A/D de 10 bits asociado a un multiplexor con varias entradas analógicas, etc.

Los PIC de gama media se agrupan en las siguientes familias:

- PIC16, excepto los PIC16X5xx que son de gama baja.
- PIC12X6xx, con encapsulado de 8 terminales. [7]

### 1.3.3 Microcontroladores gama alta

Los microcontroladores de gama alta se distinguen por sus instrucciones de 16 bits, mayor profundidad en la pila y un sistema de interrupciones más elaborado que incluye, además de las interrupciones internas de los dispositivos integrados en el microcontrolador, varias entradas para interrupciones externas. Algunos de los PIC de la gama alta tienen una arquitectura abierta, que admite la ampliación de las memorias de programa y datos.

Los PIC de gama alta están disponibles en dos familias:

- PIC17
- PIC18

Los PIC17 poseen un repertorio de 58 instrucciones de 16 bits cada una. La memoria de programa puede ser de hasta 64k (65536) palabras de 16 bits cada una y la memoria de datos puede llegar a tener hasta 1k (1024) registros de 8 bits. La memoria de programa puede ser EPROM, ROM u OTP. La pila tiene 16 niveles de profundidad. Su sistema de interrupciones incluye el tratamiento de prioridades.

Una característica interesante de los PIC17 es su arquitectura abierta. Este tipo de microcontroladores puede trabajar en cuatro modos diferentes: como microcontrolador, microcontrolador protegido, microcontrolador ampliado y microprocesador.

Los PIC18 constituyen una numerosa familia de microcontroladores, que en su gran mayoría tienen memoria de programa de tipo FLASH. Tienen un repertorio de 77 instrucciones de 16 bits. La memoria de programa puede ser de hasta 2 MB y la memoria de datos puede tener hasta 4k (4096) registros de 8 bits cada uno.

Poseen una pila de 31 niveles de profundidad, así como un sistema de interrupción muy elaborado, con interrupciones internas provenientes de los dispositivos de entrada y salida integrados en el microcontrolador, y tres fuentes de interrupción externas.

Varios dispositivos PIC18 están diseñados para trabajar con tensiones bajas (2.0 a 3.6V) y con corrientes inferiores a los 2 mA. [7]

En el siguiente epígrafe se realiza un estudio acerca de esta familia de microcontroladores, específicamente el PIC18F4550.

## 1.4 Microcontrolador PIC18F4550

Este microcontrolador pertenece a la subfamilia de gama alta mejorada PIC18F2455/2550/4455/4550 de Microchip y mantiene la arquitectura básica de las gamas media y baja, se caracteriza fundamentalmente por tener arquitectura RISC avanzada

Harvard<sup>1</sup>: con bus de memoria de programa de 16 bits y bus de memoria de datos de 8 bits, memoria de programa tipo FLASH y comunicación USB.



Fig. 1. Microcontrolador PIC18F4550 físico.

El PIC18F4550 utiliza tres tipos de encapsulado: PDIP, TQFP y QFN y sus dimensiones se especifican en el manual del dispositivo. En la siguiente figura se muestran los encapsulados mencionados.

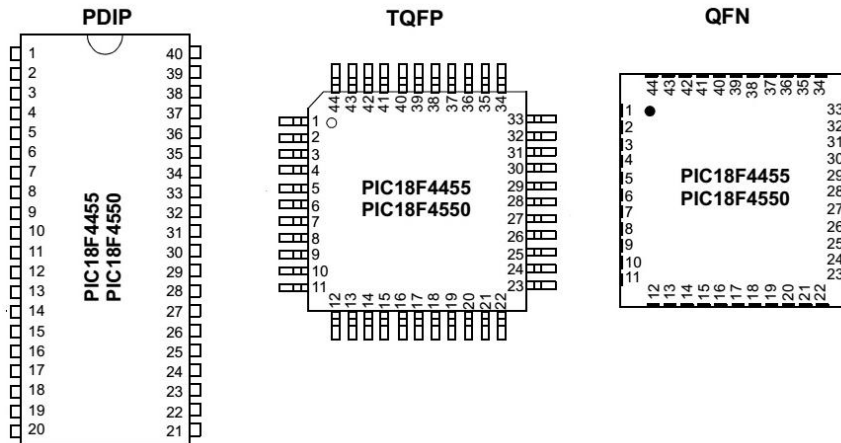


Fig. 1. Encapsulados para el PIC18F4550.

Características fundamentales:

- *Timer0*: Temporizador/Contador de 8 o 16 bits.
- *Timer1*: Temporizador/Contador de 16 bits.
- *Timer2*: Temporizador/Contador de 8 bits.
- *Timer3*: Temporizador/Contador de 16 bits.

<sup>1</sup> Arquitectura Harvard: arquitectura que utiliza buses diferentes para el acceso a memoria de programa y memoria de datos.

- Dos módulos de captura, comparación, PWM (Modulación de Ancho de Pulsos). Cada módulo posee un registro de 16 bits que puede operar como registro de captura, de comparación o como registro para el PWM.
- Puerto Serie Sincrónico Maestro (MSSP) con SPI (*Serial Peripheral Interface*, Modo maestro) e I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*, Maestro/Esclavo).
- Puerto Paralelo de Transmisión de Datos (SPP), el cual provee una interfaz de alta velocidad para mover datos hacia y desde sistema externo. Este puerto paralelo funciona como un puerto maestro con terminales para habilitación (#CS) y salidas de reloj para controlar el movimiento de datos (solo encapsulados de 40/44 pines).
- Módulo de comunicación USB, soporta comunicación de baja y alta velocidad.
- Repertorio de instrucciones simples RISC.
  - ✓ El microcontrolador cuenta con un set de 75 instrucciones.
- Frecuencia de operación 0 a 48 MHz.
- Oscilador interno de alta precisión.
- Voltaje de la fuente de alimentación de 2,0 V a 5,5 V.
- 33 terminales de entrada/salida
  - ✓ Alta corriente de fuente y de drenador para manejo de diodos LED.
  - ✓ Resistencias *pull-up* programables individualmente por *software*.
- Memoria de programa de 32k con tecnología FLASH.
  - ✓ El chip se puede reprogramar hasta 100000 veces.
- Opción de Programación Serie en el Circuito (*ICSP*).
  - ✓ El chip se puede programar incluso incorporado en el dispositivo destino.
- 256 bytes de memoria EEPROM.
  - ✓ Los datos se pueden grabar más de 1000000 veces.
- 2048 bytes de memoria RAM.
- Conversor A/D:
  - ✓ 13 canales.

- ✓ Resolución de 10 bits.
- Temporizador perro guardián (*watchdog timer*).
- Transmisor Receptor Universal Sincrónico Asincrónico Mejorado (EUSART) con detección del 9no bit de dirección.
- ✓ Soporta las comunicaciones series RS-485, RS-232.

Tabla 1. Resumen de las características fundamentales del PIC18F4550.

| Características                                      | PIC18F4550                                           |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Frecuencia de Operación                              | DC-48 MHz                                            |
| Memoria de programa FLASH (instrucciones de 2 bytes) | 32K                                                  |
| Memoria RAM de datos (bytes)                         | 2048                                                 |
| Memoria EEPROM de datos (bytes)                      | 256                                                  |
| Interrupciones                                       | 21                                                   |
| Puertos Entrada/Salida                               | A,B,C,D,E                                            |
| Líneas de Entrada/Salida                             | 35                                                   |
| Temporizadores                                       | 4                                                    |
| Módulos de Captura/Comparación/PWM (CCP)             | 1                                                    |
| Módulo de Captura/Comparación/PWM mejorado (ECCP)    | 1                                                    |
| Comunicación Serie                                   | MSSP,<br>EUSART                                      |
| Comunicación Paralela                                | SPP                                                  |
| Módulo de Comunicación USB                           | 1                                                    |
| Módulo CAD de 10 bits                                | 13 canales                                           |
| Comparadores Analógicos                              | 2                                                    |
| Set de Instrucciones                                 | 75<br>instrucciones                                  |
| Encapsulados                                         | PDIP(40 pines)<br>QFN(40 pines)<br>TQFN(40<br>pines) |

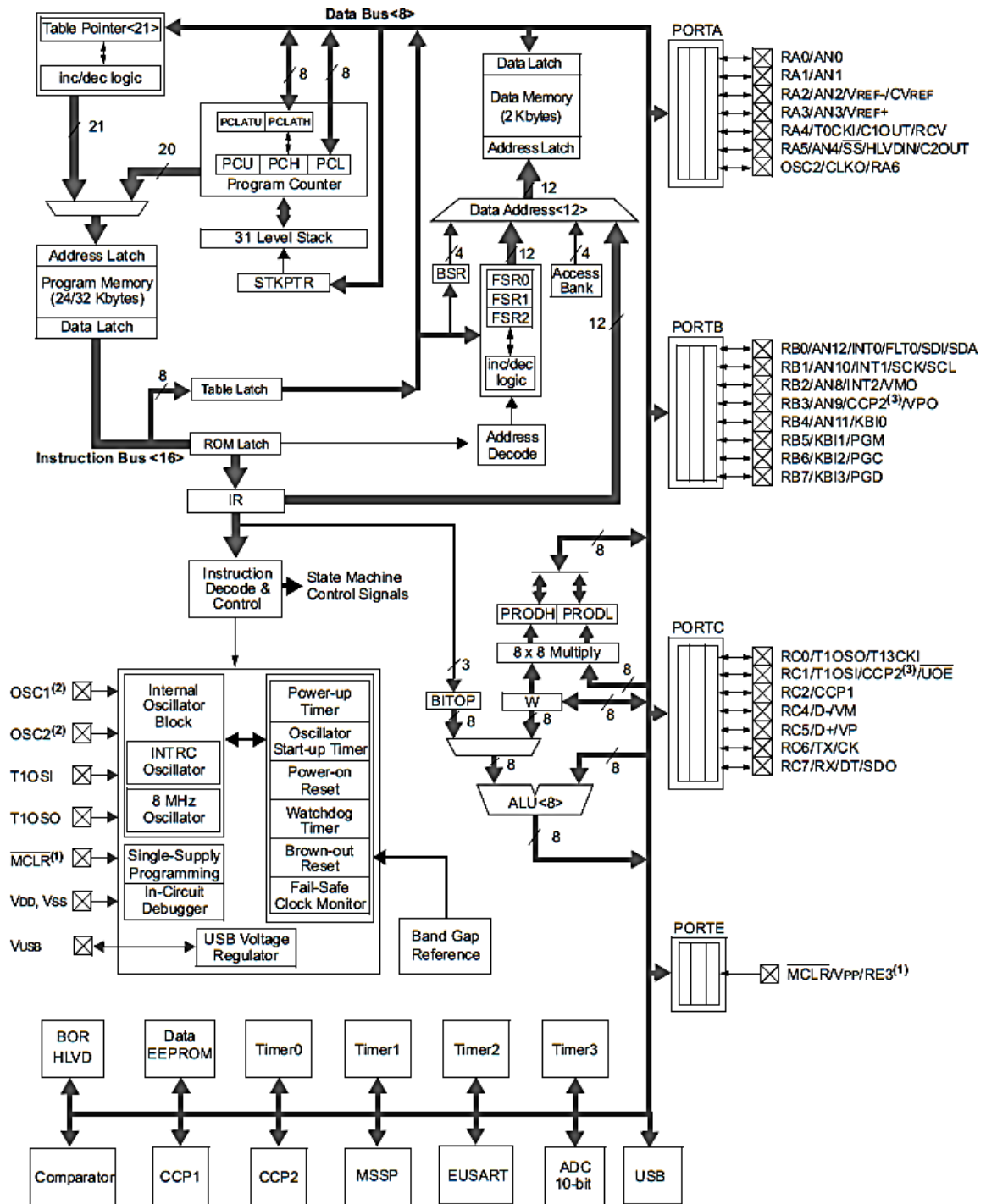


Fig. 1. Arquitectura del microcontrolador PIC18F4550.

#### **1.4.1 Memoria de programa (ROM)**

El programa de la aplicación se graba en la zona de memoria ROM, la cual ha sido implementada con tecnología FLASH.

En este tipo de memoria se pueden leer y escribir celdas individualmente, aunque, en general, para escribir en una celda hay que borrar primero su información. El borrado de estas memorias se realiza por bloques de celdas de memoria, no celda a celda. Esto las diferencia de las memorias EEPROM. La memoria se puede borrar o escribir un número finito de veces, aunque es bastante grande (del orden de  $10^5$ ). [6]

#### **1.4.2 Memoria EEPROM de datos**

Memoria no volátil de 256 bytes que puede ser reprogramada un número finito de veces, aunque muy grande (del orden de  $10^6$ ). Su contenido permanece guardado permanentemente una vez que se apaga la fuente de alimentación y puede ser modificado durante el funcionamiento del microcontrolador a través de registros.

#### **1.4.3 Memoria RAM**

Memoria SRAM interna de 2048 bytes que contiene los registros de funciones especiales y de propósito general. Almacena datos de forma temporal durante la ejecución del programa. Puede ser leída o escrita en tiempo de ejecución mediante diferentes instrucciones. Se divide en 16 bancos de memoria.

#### **1.4.4 Registros de Funciones Especiales (SFR)**

Son registros mediante los cuales se accede a diferentes periféricos del microcontrolador y se programan funciones de los mismos. Estos registros están implementados en la RAM y se clasifican en dos tipos: de núcleo (CPU) y de periférico.

A diferencia de los registros de propósito general, el propósito de los SFR es predeterminado durante el proceso de fabricación y no se pueden cambiar. Como los bits están conectados a los circuitos particulares en el chip (convertidor A/D, módulo de comunicación serie, etc.), cualquier cambio de su contenido afecta directamente al funcionamiento del microcontrolador o de alguno de los circuitos.

Otra característica de estas localizaciones de memoria es que tienen nombres (tanto los registros como sus bits), lo que simplifica considerablemente el proceso de escribir un programa. Como el lenguaje de programación de alto nivel puede utilizar la lista de todos los registros con sus direcciones exactas, con solo especificar el nombre de registro se puede leer o cambiar su contenido.

### 1.4.5 Registros de Funciones Generales

Los GPR constituyen la memoria de datos propiamente dicha disponible para el libre uso del usuario en sus programas. Estos se utilizan para guardar los datos temporales y resultados creados durante el funcionamiento. Por ejemplo, si el programa realiza un conteo, es necesario especificar la dirección de algún registro de propósito general y asignarle dicha función, luego diseñando una rutina para incrementar el valor de este registro, el microcontrolador ejecutará el programa sabiendo en qué lugar de la memoria será guardado el valor de conteo o suma.

### 1.4.6 Puertos de Entrada/Salida (E/S)

El microcontrolador PIC18F4550 dispone de cinco puertos de entrada/salida que conforman un total de 35 líneas de entrada/salida digitales, que poseen además al menos una función alternativa asociada a alguno de los módulos periféricos del dispositivo. En general, cuando una línea trabaja en modo alternativo, no podrá ser utilizada como entrada/salida digital estándar. En la figura 2.4 se muestra el diagrama genérico de un terminal de entrada/salida.

Cada puerto de E/S tiene asociado tres registros para su operación. Estos son:

- Registro TRIS: mediante él se pueden configurar cada una de las líneas de E/S del puerto como entrada o como salida.
- Registro PORT: permite leer el nivel lógico del pin y establecer el valor del latch de salida.
- Registro LAT: mediante este registro se puede leer o establecer el valor del latch de salida.

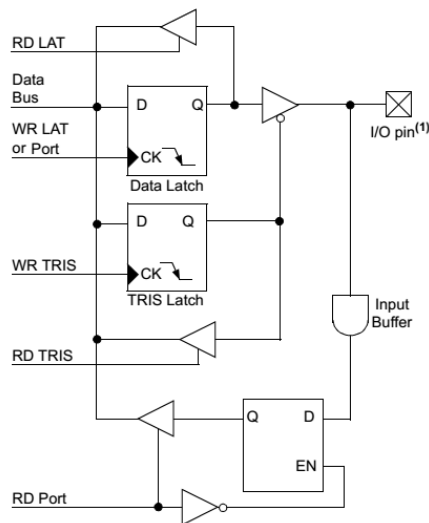


Fig. 1. Diagrama genérico de un terminal de E/S.



El microcontrolador posee los siguientes puertos de entrada/salida:

**Puerto A:** dispone de siete líneas de entrada salida. Las funciones alternativas son:

- RA0: entrada analógica (AN0)/ entrada de comparación (C1IN-).
- RA1: entrada analógica (AN1)/ entrada de comparación (C2IN-).
- RA2: entrada analógica (AN2)/ entrada de comparación (C2IN+).
- RA3: entrada analógica (AN3)/ entrada de comparación (C1IN+).
- RA4: entrada de reloj del *Timer* 0 (T0CKI)/salida de comparación (C1OUT).
- RA5: entrada analógica (AN4)/salida de comparación (C2OUT)/entrada de detección de tensión alta/baja HLVDIN.
- RA6: entrada del oscilador principal (OSC2)/salida de señal de reloj (CLK0).

En el *reset* los terminales RA0, RA1, RA2, RA3 y RA5 se configuran como analógicas, luego para usarlas como entradas/salidas digitales hay que desactivar la función analógica.

**Puerto B:** puerto bidireccional de 8 bit. Posee resistencias de pull-up interna en cada una de sus líneas que son habilitadas poniendo en '0' el bit de control RBPU del registro de control INTCON2. Después de un reset o cuando el puerto se configura como salida digital las resistencias se deshabilitan. Las funciones alternativas son:

- RB0: entrada analógica (AN12)/interrupción externa 0 (INT0)/entrada de fallo del ECCP (FLT0)/línea de datos SDI (módulo MSSP)/línea de datos SDA (módulo I<sup>2</sup>C).
- RB1: entrada analógica (AN10)/interrupción externa 1 (INT1)/línea de reloj SCK (módulo MSSP)/ línea de reloj SCL (módulo I<sup>2</sup>C).
- RB2: entrada analógica (AN8)/interrupción externa 2 (INT2)/salida de datos del USB (VCMO).
- RB3: entrada analógica (AN9)/línea de E/S del CCP2/ salida de datos del USB (VPO).
- RB4: entrada analógica (AN11)/interrupción por cambio en el pin KB10/salida CS del SSP.
- RB5: interrupción por cambio en el pin (KB11)/línea de programación (PGM).
- RB6: interrupción por cambio en el pin (KB12)/línea de programación (PGC).
- RB7: interrupción por cambio en el pin (KB13)/línea de programación (PGD).

**Puerto C:** dispone de 5 líneas de entrada/salida (RC0, RC1, RC2, RC6 y RC7) dos líneas de solo entrada (RC4 y RC5). El pin RC3 no está implementado. En el *reset* todas las líneas del puerto C quedan configuradas como entradas digitales.

- RC0: salida del oscilador del Temporizador 1 (T1OSO)/entrada de contador de los Temporizadores 1 y 3.
- RC1: entrada del oscilador del Temporizador 1 (T1OSI)/línea de entrada/salida del CCP2/salida OE del transceptor USB.
- RC2: línea de entrada/salida del CCP1/salida PWM del ECCP1.
- RC4: línea (D-) del bus USB/ línea de entrada del USB (VM).
- RC5: línea (D+) del bus USB/ línea de entrada del USB (VP).
- RC6: salida de transmisión del EUSART (TX)/línea de reloj del EUSART (CK).
- RC7: entrada de recepción del EUSART (RX) /línea de datos síncrona del EUSART (DT)/salida de datos del SPI (SDO).

**Puerto D:** puerto bidireccional de 8 bits. Posee resistencias de pull-up interna en cada una de sus líneas que son habilitadas poniendo en '0' el bit de control RDPU del registro de control INTCON2. Después de un *reset* o cuando el puerto se configura como salida digital las resistencias se deshabilitan. Las funciones alternativas son:

- RD0: línea de datos del SPP (SPP0).
- RD1: línea de datos del SPP (SPP1).
- RD2: línea de datos del SPP (SPP2).
- RD3: línea de datos del SPP (SPP3).
- RD4: línea de datos del SPP (SPP4).
- RD5: línea de datos del SPP (SPP5)/salida PWM del ECCP1 (P1B).
- RD6: línea de datos del SPP (SPP6)/salida PWM del ECCP1 (P1C).
- RD7: línea de datos del SPP (SPP7)/salida PWM del ECCP1 (P1D).

**Puerto E:** dispone de tres líneas de E/S (RE0, RE1 y RE2) y una línea de solo entrada (RE3). En el *reset* las líneas RE2-RE0 se configuran como entradas analógicas, para poder usarlas como líneas digitales es necesario desactivar la función analógica en el registro ADCON1. Las funciones alternativas son:

- RE0: entrada analógica (AN5)/salida de reloj 1 del SSP (CK1SSP).
- RE1: entrada analógica (AN6)/salida de reloj 2 del SSP (CK2SSP).

- RE2: entrada analógica (AN7)/salida de habilitación de SPP (OESPP).
- RE3: línea de *reset* externo (MCLR)/línea de programación (VPP).

#### 1.4.7 Sistema de interrupciones

Las interrupciones juegan un papel de suma importancia dentro de cualquier sistema basado en microcontroladores, pues estos deben habitualmente gestionar y controlar distintos periféricos asociados, que de forma continua, requieren la dedicación de la CPU para llevar a buen término las tareas que tienen asignadas.

Una interrupción la realiza de forma asíncrona un periférico o un dispositivo conectado físicamente al microcontrolador, cuando requiere a la CPU el desvío del flujo de ejecución del programa para gestionar y controlar los diversos sucesos que no se encuentran bajo su supervisión directa. De esta manera se mejora la eficiencia de la CPU, ya que esta no tiene que estar continuamente pendiente de si acontece o no un suceso en un instante de tiempo determinado, y puede realizar otras tareas de mayor interés, atendiendo a los sucesos tan sólo cuando estos se producen.

Los dispositivos PIC18F4550 poseen múltiples fuentes de interrupción y una función de prioridad que permite asignar a cada fuente de interrupción dos niveles de prioridad:

- Nivel alto de prioridad, vectorizado en la dirección 0008H.
- Nivel bajo de prioridad, vectorizado en la dirección 0018H.

Todas las interrupciones pueden ser programadas con cualquiera de los dos niveles de prioridad, con excepción de la interrupción externa 0 (que siempre tiene alta prioridad).

Como se especifica en la Tabla 2.1 el microcontrolador objeto de estudio posee 21 fuentes de interrupción dentro de las que se distinguen dos grupos:

- Grupo general de interrupciones:
  - ✓ Interrupción del Temporizador 0.
  - ✓ Interrupción por cambio en el puerto B.
  - ✓ Interrupciones externas 0, 1 y 2.
- Grupo de interrupciones de periféricos, dentro de las que podemos mencionar entre otras:
  - ✓ Interrupción de conversor A/D.
  - ✓ Interrupción de recepción del EUSART.
  - ✓ Interrupción de transmisión del EUSART.

✓ Interrupción de los Temporizadores: 1, 2 y 3.

Para el control de las interrupciones se utiliza al menos un registro: INTCON. Adicionalmente y dependiendo del periférico de que se trate se utilizan los siguientes registros:

- RCON.
- INTCON2.
- INTCON3.
- PIR1, PIR2.
- PIE1, PIE2.
- IPR1, IPR2.

Cada fuente de interrupción posee tres bits de control (excepto la interrupción externa 0 que solo tiene dos), cuya función es:

- Bit de habilitación de interrupción: permite habilitar a nivel individual la interrupción.
- Bandera (*flag*) de interrupción: se pone en '1' cuando se produce la interrupción independientemente de que esta esté habilitada o no. Esta bandera debe ponerse en '0' por software cuando se procesa la interrupción.
- Bit de prioridad de interrupción: establece si la interrupción es de alta o de baja prioridad (este bit no está disponible para la interrupción externa 0).

En el registro INTCON se controlan las interrupciones siguientes:

- Interrupción externa (proveniente del terminal INT).
- Interrupción por desbordamiento del Temporizador 0.
- Interrupción por cambio en los terminales RB7:RB4.

En el registro INTCON hay bits para habilitar individualmente estas interrupciones y hay otros bits que dan cuenta de que se han solicitado esas interrupciones.

Hay también un bit (GIE) para habilitar globalmente el sistema de interrupción.

| 7        | 6         | 5      | 4      | 3    | 2      | 1      | 0    |
|----------|-----------|--------|--------|------|--------|--------|------|
| GIE/GIEH | PEIE/GIEL | TMROIE | INTOIE | RBIE | TMROIF | INTOIF | RBIF |

Fig. 1. Estructura de registro INTCON.

**GIE/ GIEH (Global Interrupt Enable bit):** Con este bit se habilita el sistema de interrupción del microcontrolador. Se pone en 0 con *reset* y cuando se solicita una interrupción.

**PEIE (Peripheral Interrupt Enable bit):** Con este bit se habilitan las interrupciones de otras fuentes no presentes en el registro INTCON, sino en los registros PIE.

**TMR0IE, TMR0IF:** Bits relacionados con la interrupción del Temporizador 0.

**INT0IE, INT0IF:** Bits relacionados con la interrupción externa 0.

**RBIE, RBIF:** Bits relacionados con la interrupción por cambio en RB7:RB4.

#### 1.4.8 Módulo Conversor Analógico-Digital (A/D)

El módulo de CAD está formado por un conversor A/D de aproximaciones sucesivas con una resolución de 10 bits y 13 canales de entrada, precedido por un capacitor para el muestreo y retención (*sample and hold*) de la señal analógica que llega a través de un multiplexor analógico de hasta 13 entradas. La resolución de cada bit convertido tiene un valor que es función de la tensión de referencia de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$Resolución = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{1024} = V_{ref} / 1024 \quad (1.1)$$

La tensión de referencia determina los límites máximo y mínimo de la tensión analógica que se puede convertir. El voltaje diferencial mínimo es de 2V.

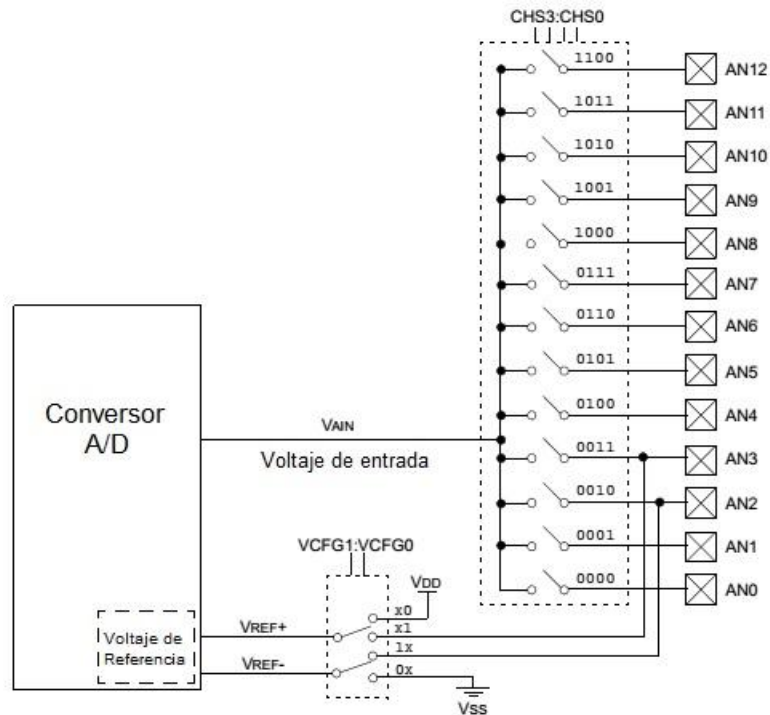


Fig. 1. Diagrama en bloques del módulo conversor A/D.

A través del canal de entrada seleccionado, se aplica la señal analógica al capacitor de muestreo y retención y luego se introduce al conversor, el cual proporciona un resultado digital de 10 bits de longitud.

El funcionamiento del conversor requiere la manipulación de cinco registros:

- ADRESH: parte alta del resultado de la conversión.
- ADRESL: parte baja del resultado de la conversión.
- ADCON0: registro de control 0.
- ADCON1: registro de control 1.
- ADCON2: registro de control 2.

En la pareja de registros ADRESH: ADRESL se sitúa el resultado de la conversión. El registro ADCON0 controla la operación del conversor, mientras que el ADCON1 se utiliza para configurar los terminales del puerto A como entradas analógicas o E/S digitales. Por otra parte, en el registro ADCON2 contiene los bits de configuración del tiempo de adquisición y la frecuencia de reloj para la conversión.

La digitalización de una señal analógica consta de dos etapas: el muestreo y retención, que tiene lugar en el circuito de igual nombre, y la propia conversión (donde ocurre la cuantificación y codificación). Cada una de estas etapas ocurre en un tiempo determinado.

En los PIC18F4550, el condensador de retención es de 25 pF y el tiempo que demora su carga es el tiempo de adquisición ( $T_{ACQ}$ ). Una vez transcurrido este tiempo puede comenzar la conversión, que dura un tiempo  $T_{CONV}$  (tiempo de conversión).



Fig. 1. Tiempos relacionados con la digitalización de una señal analógica en el módulo de conversión A/D.

Según el fabricante, el tiempo de adquisición mínimo es de 1.4  $\mu s$ . Este tiempo depende grandemente de la resistencia de salida ( $R_s$ ) del sistema medido. Se recomienda que  $R_s$  tenga como valor máximo 2.5 k $\Omega$ , para el cual se obtiene un tiempo de adquisición de 6.4  $\mu s$ .

El tiempo de conversión se programa mediante los bits ACQT2:ACQT0 del registro ADCON2 y puede tener valores entre  $2 \cdot T_{AD}$  y  $20 \cdot T_{AD}$ .

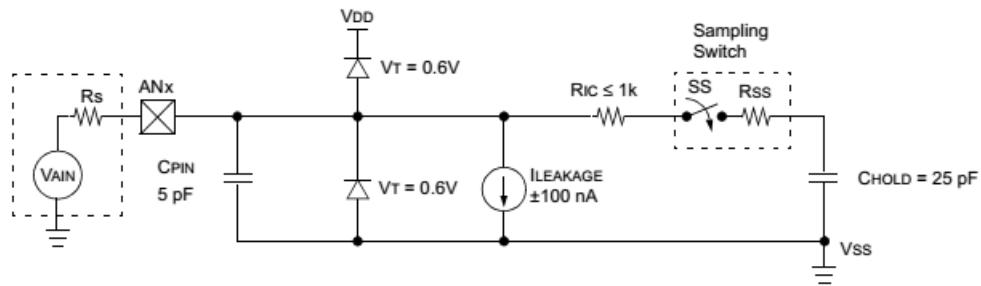


Fig. 1. Modelo de una entrada analógica.

Para un conversor A/D de 10 bits, el tiempo de conversión es 11 veces el tiempo de conversión de 1 bit ( $T_{AD}$ ), el cual a su vez, debe ser mayor de  $0.7 \mu s$ . Es decir:

$$T_{CONV} = 11T_{AD} > 7.7 \mu s \quad (1.2)$$

El valor de  $T_{AD}$  se obtiene como un múltiplo del período del oscilador del microcontrolador (2, 4, 8, 16, 32 o 64 veces  $T_{OSC}$ ) o como el período del oscilador RC interno. Esto se programa con los bits ADCS1 y ADCS0 del registro ADCON2.

#### 1.4.9 Módulo I<sup>2</sup>C

La comunicación serie es una forma de transferir datos digitales entre sistemas y circuitos integrados muy eficiente, dada la reducida cantidad de líneas que precisa.

En los PIC18F se ha implementado el módulo MSSP (Master *Synchronous* Serial Port), que proporciona una excelente interfaz de comunicación con otros microcontroladores y con diversos periféricos, entre los que destacan las memorias EEPROM serie, conversores A/D, los controladores de *display*, etc. El módulo MSSP admite dos de las alternativas más utilizadas en la comunicación serie síncrona:

- SPI (Serial Peripheral Interface).
- I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit).

El protocolo de comunicación serie I<sup>2</sup>C fue desarrollado por Philips en 1980 para cubrir sus propias necesidades en la implementación de diversos productos electrónicos que requerían una elevada interconexión de circuitos integrados. Este protocolo utiliza únicamente dos líneas para la transferencia de información entre los elementos que se

acoplan al bus. Una de dichas líneas se utiliza para la transmisión y recepción de datos (SDA), la otra se utiliza para enviar los pulsos de reloj (SCL). [8]

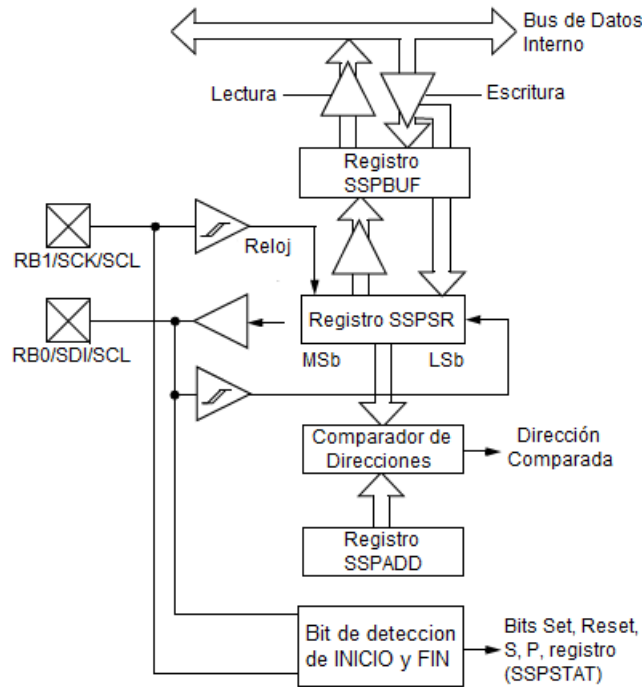


Fig. 1. Diagrama en bloques del módulo MSSP en modo I²C.

#### 1.4.10 Módulo EUSART

El módulo Transmisor-Receptor Sincrónico Asincrónico Universal (EUSART, por sus siglas en inglés), es el otro bloque con que cuenta el microcontrolador para la comunicación serie, puede ser configurado en modo asíncrono bidireccional (*full-duplex*) para la comunicación con ordenadores o en modo síncrono *semi-duplex* en cuyo caso intercambiaría información con otros periféricos como convertidores A/D y D/A, así como memorias EEPROM entre otros dispositivos.

Dentro de las características fundamentales del módulo EUSART podemos encontrar:

- Posee cuatro modos de trabajo:
  - Modo asíncrono de 9 bits.
  - Modo asíncrono de 8 bits.
  - Modo síncrono Maestro.
  - Modo síncrono Esclavo.
- Auto activación por detección de dato recibido.



- Detección automática de velocidad de comunicación (*baud rate*).
- Transmisión y detección de carácter de BREAK.

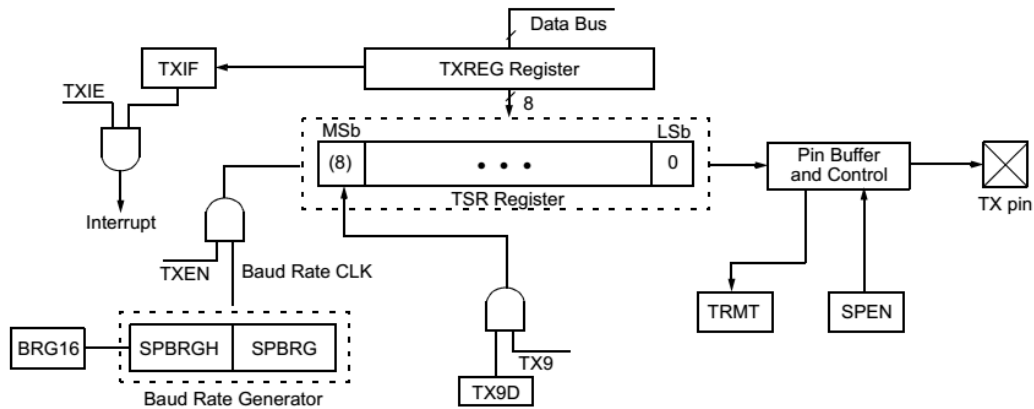


Fig. 1. Diagrama en bloques del transmisor EUSART (modo asíncrono).

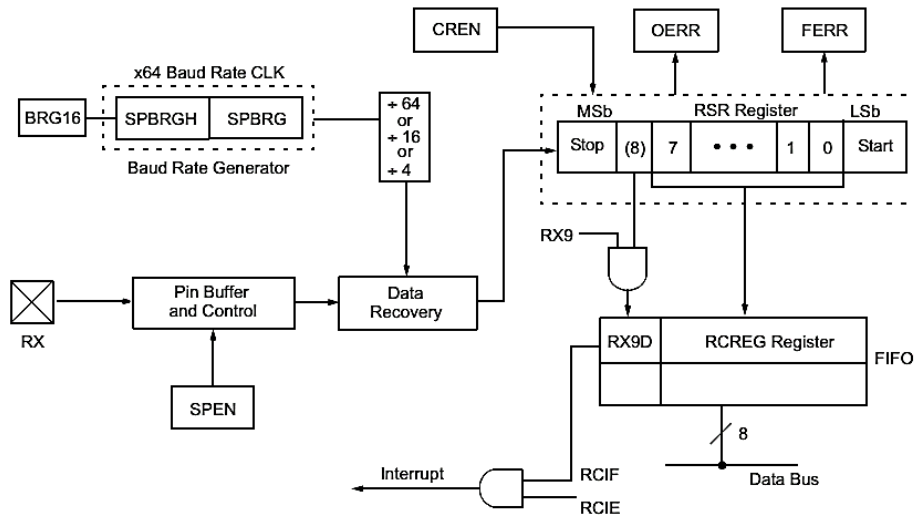


Fig. 1. Diagrama del receptor EUSART (modo asíncrono).

### 1.5 Temporizador: TIMER 0

Los *TIMER* o temporizadores son módulos integrados en los microcontroladores PIC que permiten realizar cuentas tanto de eventos internos como externos. Cuando la cuenta es interna se habla de temporización y cuando es externa se habla de contador. Los *timers* están íntimamente ligados al uso de las interrupciones, pero no por ello se utilizan siempre de forma conjunta.

El microcontrolador PIC18F4550 posee cuatro temporizadores, uno de 8 bits, dos de 16 bits y el TIMER 0 al que dedicaremos este epígrafe, que puede ser configurado como temporizador/contador de 8 o 16 bits.

Dentro de las características fundamentales del TIMER 0 podemos citar las siguientes:

- *Prescaler* programable por software.
- Fuente de reloj seleccionable (interna o externa).
- Interrupción por desbordamiento.

El registro T0CON es quien controla todo los aspectos de operación del módulo, incluida la selección del *prescaler*. A continuación se muestra la estructura del registro:

|        |        |       |       |       |       |       |       |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R/W-1  | R/W-1  | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 |
| TMR0ON | T08BIT | T0CS  | T0SE  | PSA   | T0PS2 | T0PS1 | T0PS0 |
| bit 7  |        |       |       |       |       |       | bit 0 |

Fig. 1. Registro de control T0CON.

TMR0ON: bit de control de habilitación del *Timer* 0.

T08BIT: bit de configuración del modo 8/16 bit.

- T08BIT= '0': modo de 16 bit.
- T08BIT= '1': modo de 8 bit.

T0CS: bit de configuración del modo contador/temporizador.

- T0CS= '0': modo temporizador (TMR0 se incrementa con cada ciclo de instrucción).
- T0CS= '1': modo contador (TMR0 se incrementa con cada transición de la señal externa en el terminal RA4/T0CKI).

T0SE: bit de selección de flanco en modo contador.

- T0SE= '0': TMR0 se incrementa en los flancos de subida de la señal externa en el terminal RA4/T0CKI.
- T0SE= '1': TMR0 se incrementa en los flancos de caída de la señal externa en el terminal RA4/T0CKI.

PSA: bit de activación del *prescaler*.

- PSA= '0': *prescaler* activado.
- PSA= '1': *prescaler* no activado.

T0PS2:T0PS0: bits de selección del *prescaler*.

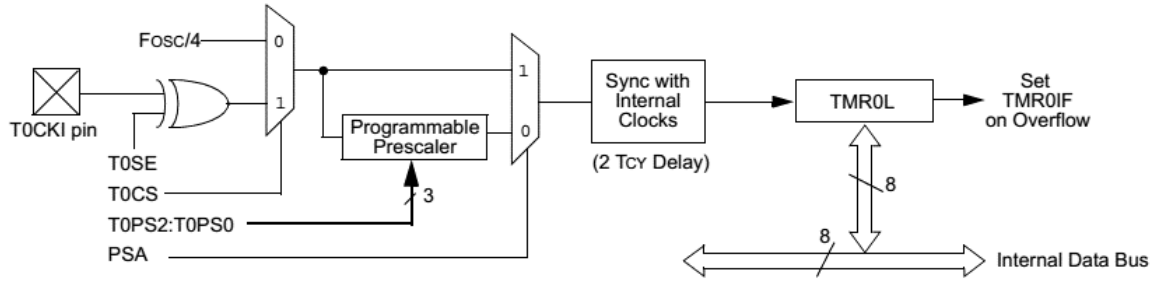


Fig. 1. Diagrama en bloques del Timer 0 en modo de 8 bit.

## 1.6 Herramientas para grabación de microcontroladores.

El desarrollo de un proyecto con microcontroladores PIC parte de la identificación de la problemática, luego se crea, edita y compila un programa utilizando lenguaje ensamblador o un lenguaje de alto nivel para entonces proceder a la programación eléctrica del dispositivo para lo cual es imprescindible la utilización de un módulo de grabación.

El microcontrolador PIC18F4550 puede ser programado de forma serie, utilizando los terminales RB6 y RB7 como entradas de reloj y datos, y otras tres líneas para voltaje de programación, fuente de alimentación y tierra (MCLR,  $V_{DD}$  y  $V_{SS}$ ).

Existe una gran variedad de dispositivos programadores, algunos utilizan el puerto serie y otros el puerto paralelo. La diferencia entre ellos radica en que los primeros utilizan como fuente de alimentación la proporcionada por el propio puerto, mientras que los últimos necesitan de fuentes externas para generar los voltajes de alimentación y de programación. Dentro de los programadores más populares se encuentran los suministrados por la compañía Microchip como: PICSTART Plus, PICKit2, PICKit3, aunque no son los únicos.



Fig. 1. Programadores de Microchip.

Independientemente de la existencia de programadores comerciales, cada diseñador puede construir el suyo de forma didáctica y más económica, al respecto existe abundante información en Internet. A continuación mostramos un ejemplo.

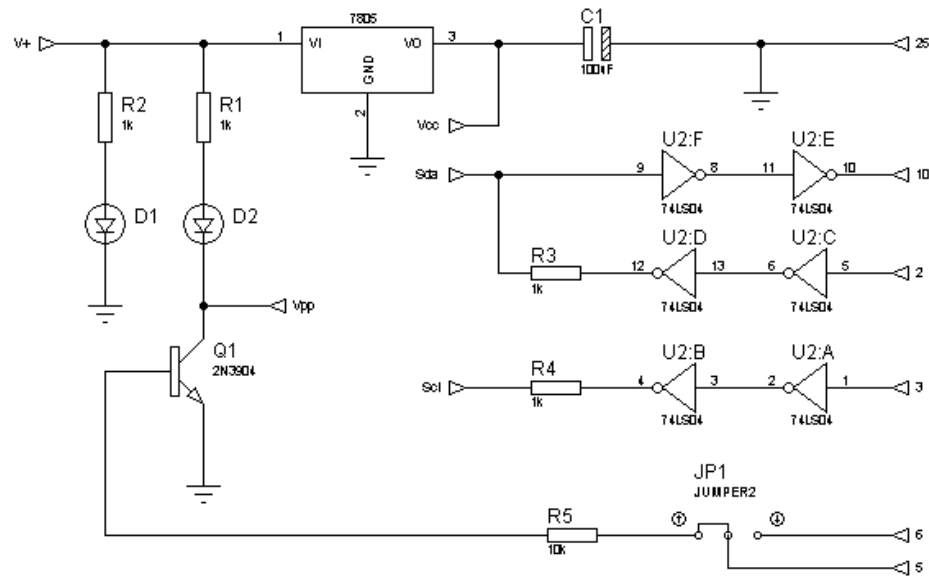


Fig. 1. Programador PIC Pablin II.

Este circuito permite grabar microcontroladores PIC de 8, 18, 28 y 40 terminales utilizando el puerto paralelo de la PC. Se energiza con una fuente de alimentación de 12 V no regulada que suministre además una corriente superior a 300 mA.

## 1.7 Herramientas de diseño.

### 1.7.1 Compilador C, MikroC Pro.

La programación de microcontroladores se basa en un código de máquina que es conocido como código ensamblador, este código contiene una a una las instrucciones del programa, este código ensamblador o también conocido como código *assembler* es minucioso, y tedioso de editar. El *assembler* crea códigos de programa extensos y de difícil comprensión.

La creación de compiladores de alto nivel facilitó la edición y creación de programas en todo modo de programación lógica, por supuesto los microcontroladores no fueron la excepción, comercialmente existen varios compiladores de diferentes fabricantes y diferentes lenguajes de alto nivel. [9]

MikroC Pro es un paquete de software muy potente para el desarrollo de aplicaciones con microcontroladores PIC. Este proporciona un conjunto de herramientas dentro de las cuales

se encuentra el compilador de C, parte esencial del entorno de desarrollo integrado (IDE). En la siguiente figura se muestra la interfaz gráfica de MikroC PRO v.6.0.

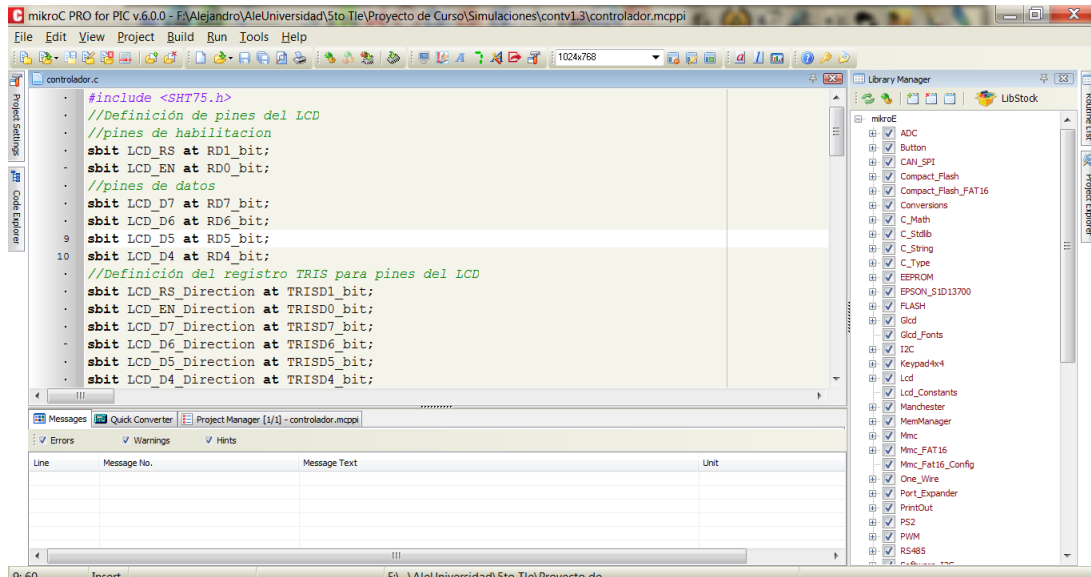


Fig. 1. Interfaz gráfica de MikroC Pro v. 6.0.

Dentro de las características fundamentales del IDE podemos citar:

- Posee un conjunto de librerías y estructuras predefinidas para adquisición de datos, manejo de memoria y *displays*, conversiones, etc., además de un conjunto amplio de ejemplos cuyo código puede ser incorporado a los proyectos, lo que facilita el desarrollo de aplicaciones de forma rápida.
- Genera el código .HEX estándar compatible con todos los programadores.
- Utiliza la herramienta “mikroICD” (*In-Circuit Debugger*) para la depuración en tiempo real y chequear la ejecución del programa a nivel de hardware.
- Genera el archivo .COFF (*Common Object File Format*) para la depuración con el software MPLAB de Microchip.

### 1.7.2 Entorno de desarrollo Proteus Professional.

El diseño del sistema se realizó utilizando el programa ISIS (*Intelligent Schematic Input System*, Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente), el cual forma parte del paquete *software* Proteus Professional. A través de ISIS se diseñó el esquema eléctrico del circuito y se simuló empleando para ello el Sistema de Modelado Virtual (VSM, por sus siglas en inglés). ISIS permite un control total sobre la apariencia final de los esquemas, permitiendo al usuario modificar el ancho de las líneas, el estilo de relleno los colores y las fuentes.

Posee una muy buena colección de bibliotecas de modelos tanto para confeccionar esquemas, simular o diseño de circuitos impresos. Además, permite la creación de nuevos componentes, su simulación e incluso, la posibilidad de solicitar al fabricante (Labcenter Electronics) que cree un nuevo modelo. El programa ISIS posee un entorno de trabajo formado por distintas barras de herramientas y una ventana de trabajo.

El VSM Proteus Professional posee otro entorno de trabajo además del ISIS, el ARES, este posibilita realizar diseños del circuito impreso así como su visualización en 3D. Una vez diseñado en ISIS el esquema electrónico, se genera automáticamente la lista de redes (*Netlist*) en ARES. Una red es un grupo de terminales interconectados entre sí y la lista de redes es una lista con todas las conexiones que forman un diseño. ARES es capaz de recibir esta lista de redes para diseñar, a partir de ella, un circuito impreso. Los componentes pueden encontrarse en la biblioteca de la aplicación con los tipos de encapsulado y con la denominación técnica referente a la forma física de los componentes.

## CAPITULO 2 . CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL LOCAL

En la actualidad, con los avances de nuevas tecnologías de la electrónica y las telecomunicaciones se han desarrollado diversos dispositivos para ejecutar el control ambiental en locales que por las condiciones climáticas a las que se encuentran expuestos o las actividades que en ellos se realizan lo requieren, utilizando como componentes básicos sensores y microcontroladores. En este capítulo se realiza un estudio de las variables climáticas a controlar, así como una caracterización de la Obra Ingeniera No.1 RM Santiago de Cuba.

### 2.1 Variables climáticas y regularidades del clima en las obras ingenieras

La Psicrometría es la rama de la Física que estudia las propiedades físicas y termodinámicas de las mezclas de aire y vapor de agua. Es el fundamento científico esencial del control ambiental. Estas propiedades están determinadas por la interacción de las diversas magnitudes físicas.

El estado psicométrico de la atmósfera es uno de los factores del clima y depende de los valores y la interacción de estas magnitudes, por eso es común denominarlas variables climáticas, que se definen como aquellas magnitudes físicas elementales, que permiten ser individualizadas y medidas, mediante la concreción de las cuales es posible caracterizar un estado determinado del clima.

El medio ambiente de las obras ingenieras está caracterizado por la interacción de magnitudes y factores climáticos, así como de otras magnitudes y factores de la naturaleza física, química y biológica. Las magnitudes y factores climáticos son los más importantes, ya que determinan de forma directa o indirecta el comportamiento de las demás.

Dicha interacción se manifiesta en los tres niveles ambientales presentes en estas obras:

- **El ambiental**, que es el medio ambiente exterior al cual están expuestas normalmente las personas, las plantas, los animales y las propias instalaciones.
- **El interior**, que es aquel que está contenido dentro de ellas.

- **El local**, que es aquel encerrado dentro de los propios medios preservados y en los recintos donde estos se almacenan.

Estos niveles ambientales están interactuando de forma constante, principalmente de forma termodinámica.

Las variables climáticas se dividen en variables **físicas** y **cinemáticas**. Las primeras expresan el estado físico del aire y las segundas caracterizan el movimiento de las partículas de este. Las variables climáticas que pueden ser medidas directamente, como la temperatura, la presión y la humedad relativa se denominan **variables climáticas primarias**. Existen otras, denominadas **variables climáticas secundarias** que solo se pueden determinar a partir de las primeras mediante cálculos basados en leyes físicas. En este trabajo solo nos referiremos a las variables primarias, específicamente: la temperatura y la humedad relativa. [1]

### 2.1.1 Temperatura

Se define la temperatura (T), como la magnitud física que da la medida de la intensidad del movimiento caótico de las moléculas. Esta determina la dirección espontánea de la transmisión de energía durante el intercambio de calor. Es uno de los parámetros principales que caracteriza el estado de un sistema termodinámico en un instante dado.

En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el Kelvin (K), y la escala correspondiente es la escala Kelvin o escala absoluta, que asocia el valor «cero Kelvin» (0 K) al «cero absoluto», y se gradúa con un tamaño de grado igual al del grado Celsius.

Existe una amplia gama de instrumentos para medir temperatura, entre los que se encuentra el **termógrafo electrónico**, el cual consiste en un termómetro eléctrico (de termorresistencia, termopar o termistor) asociado a un microcontrolador simple que permite programar las mediciones y almacenar en memoria los valores medidos.

### 2.1.2 Humedad relativa

Se define la humedad como el contenido de vapor de agua en el aire. Se expresa a través de cuatro magnitudes fundamentales: humedad absoluta, humedad relativa, razón de mezcla y temperatura del punto de rocío.



La **humedad relativa (Hr) del aire**, es la relación expresada en porcentaje, entre la masa de vapor de agua contenido en un volumen de aire y la masa de vapor de agua que saturaría dicho volumen a una temperatura y presión total dadas.

El instrumento registrador de la humedad relativa es el higrógrafo, que posee características similares al termógrafo, salvo el elemento sensible que será de sensor capacitivo.

En la actualidad, es muy frecuente la fabricación y empleo de instrumentos que miden simultáneamente humedad y temperatura a los cuales se les denomina termohigrógrafos.

## **2.2 Caracterización de la Obra Ingeniera No.1**

El comportamiento de las variables climáticas en el interior de una fortificación, tiene regularidades respecto a su homólogo del exterior. Por esto antes de realizar cualquier estudio del medio ambiente en el interior de una de ellas, es necesario conocer el comportamiento microclimático en el exterior. Para ellos es importante conocer las características climáticas de nuestro país.

La ubicación de Cuba en el arco de las Antillas mayores determina el predominio en nuestro clima de condiciones tropicales y de un régimen estacional de lluvias.

Dentro de las particularidades del clima cubano podemos encontrar la ocurrencia de fenómenos naturales como los huracanes, frentes fríos, que afectan con más frecuencia la mitad occidental del país.

En el campo de las temperaturas, las variaciones más notables están asociadas con la altitud. Las llanuras poseen temperaturas medias anuales de 24 °C y aunque en la región oriental se registran valores promedio superiores a los 26 °C. En los tres sistemas montañosos se produce una disminución gradual de la temperatura media anual, que en la Sierra Maestra resulta inferior a 20 °C. La amplitud de las oscilaciones, diaria y anual, de la temperatura aumenta hacia el centro de la isla.

La precipitación media anual es de 1375 mm, con dos estaciones bien definidas. De mayo a octubre se produce el período lluvioso (estación de lluvias), en el que se registra el 80 por ciento de los totales anuales. La estación o período seco comprende los meses de noviembre hasta abril y durante este solo se produce el 20 por ciento de las precipitaciones.

Estas características del clima condicionan en gran medida el estado de las variables ambientales dentro de las fortificaciones, lo que provoca que existan diferencias en el estado psicrométrico de las diferentes zonas en estas instalaciones. [1]

A continuación se muestra la vista superior de la Obra Ingeniera No. 1 de la RM Santiago de Cuba.

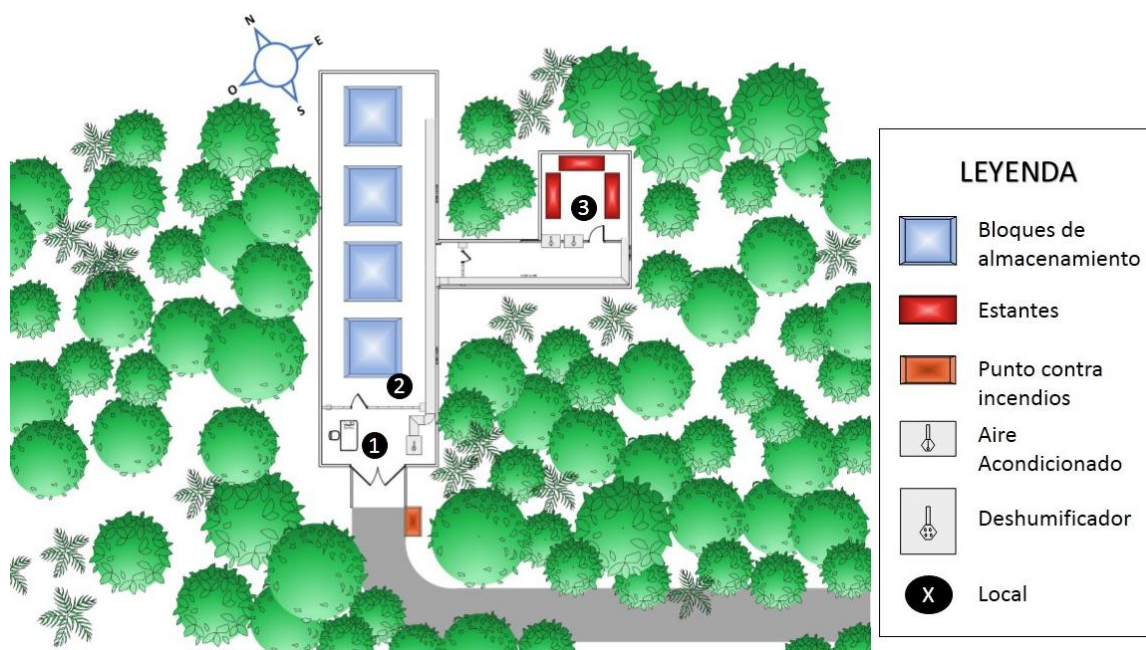


Fig. 2. Vista superior de la Obra Ingeniera No. 1 RM Santiago de Cuba.

### 2.2.1 Descripción física y características

Las obras de fortificaciones de alta protección se encuentran ubicadas en lugares con poco acceso de personal, exceptuando el que trabaja directamente en ellas, están designadas para la conservación de la técnica de uso militar y medios materiales.

La Obra Ingeniera No.1 tiene un área total de 758 m<sup>2</sup>, y contiene en su interior medios materiales, que por sus características deben mantenerse en un régimen climático estable para su preservación en buen estado. Está dividida en tres áreas o locales, dos de los cuales se utilizan para el almacenamiento de los medios materiales y además están aislados del medio exterior desde el punto de vista termodinámico a través de manta de polietileno de baja densidad que se ubica a la entrada de cada local.

Como parte del sistema de climatización de la obra esta cuenta con un aire acondicionado de 1 Ton y un equipo deshumificador, este último conectado a un sistema de conductos flexibles a través del cual fluye la corriente de aire generada por el equipo para la disminución de la temperatura y humedad relativa.

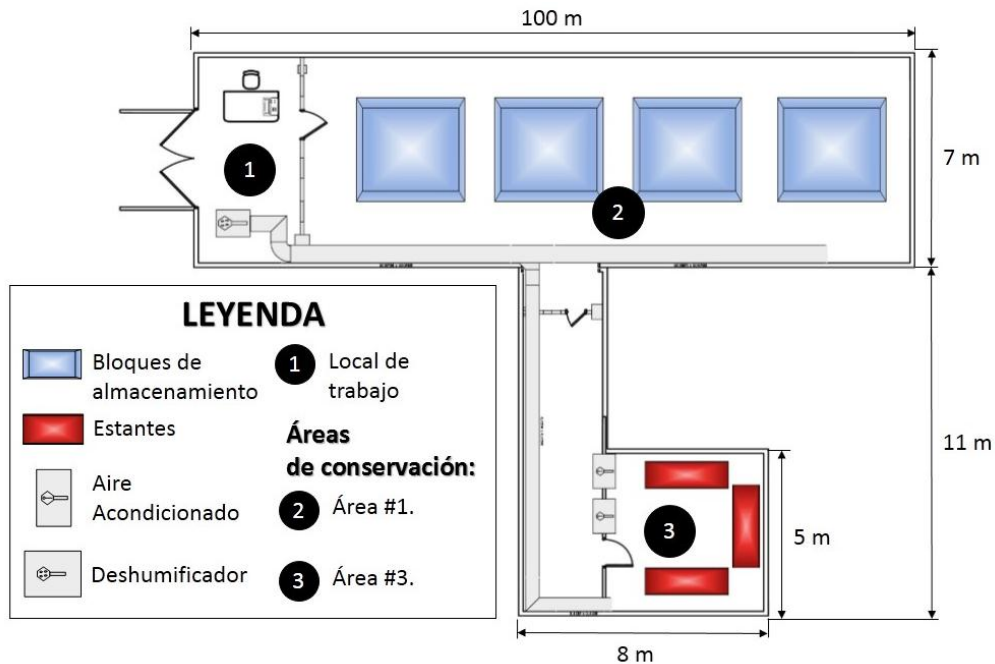


Fig. 2. Descripción física de la Obra No.1.

### 2.2.2 Regularidades del clima dentro de la obra.

El comportamiento del clima en las fortificaciones no es único en toda su extensión. Aún en obras como la mostrada en la Fig. 1.2, que se caracterizan por tener valores estables de humedad y temperatura, existen diferencias entre los diferentes puntos que la conforman.

En el comportamiento climático de los puntos interiores, influyen dos factores:

- La mayor o menor cercanía del punto a la entrada de la obra.
- El sentido de la dirección del aire.

En un punto cercano a la entrada hay influencia del aire exterior, principalmente si recibe su flujo desde fuera de la obra. Por el contrario si el punto cercano a la entrada recibe el flujo de aire desde el interior, sus características estarán cercanas a las de los puntos internos.

Por lo antes expuesto, las partes interiores de estas obras se clasifican, de acuerdo con sus características climáticas, en:

- Zonas de contacto: son aquellas que tienen un estado termodinámico cercano al medio exterior.
- Zonas interiores: son aquellas que mantienen un estado termodinámico de equilibrio en el interior.

- Zonas de transición: son aquellas que tienen un estado termodinámico entre los anteriores.

Desde el punto de vista térmico, la Obra No.1 presenta una gran inercia a los cambios de temperatura. Las características isotérmicas en su interior son tan marcadas que, las condiciones de confort solo se pueden alcanzar con el empleo del equipo deshumificador.

Las mediciones realizadas evidencian que tanto la humedad como la temperatura, de las zonas de contacto y de transición, siguen la oscilación diaria que poseen estas variables en el exterior, pero atenuadas y desfasadas en tiempo, o sea, que los momentos de mayor o menor temperatura y humedad relativa en el exterior no coinciden, en valor y horario, con sus similares de las zonas mencionadas.

Dentro de las características más sobresalientes del clima en el interior de la Obra No.1 podemos señalar que:

- La temperatura es muy estable (por lo general, entre 26 °C y 29 °C), sin oscilación sensible diaria (está por encima de la mínima diaria y por debajo de la máxima).
- Los valores de humedad relativa son igualmente muy estables y están entre 74 - 78 %.

Según las normas establecidas por el Manual de Control Ambiental de las FAR, los medios materiales que se almacenan dentro de esta obra deben mantenerse a una temperatura entre 20 y 25 °C y una humedad relativa del 60 %.

## **2.3 Supervisores ambientales empleados actualmente por las FAR.**

Existe una amplia variedad de instrumentos que son empleados para las labores de supervisión de las condiciones ambientales dentro de las obras ingenieras. A continuación se relacionan algunos de ellos y sus características fundamentales.

### **2.3.1 Supervisor Testo 605-H1-Termohigrómetro de bolsillo.**

Este supervisor permite la medición de temperatura, humedad relativa y cálculo del punto de rocío. Para la medición de temperatura utiliza un sensor NTC<sup>2</sup> en un rango de 0 a +50°C con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  y resolución de  $0.1^{\circ}\text{C}$ . El rango de medición de humedad es

---

<sup>2</sup> **NTC** (Negative Temperature Coefficient): se refiere a un termistor con coeficiente de temperatura negativo, por lo que cuando la temperatura aumenta su resistencia disminuye.

de 5 a 95% HR con una precisión de  $\pm 3\%$ HR con una resolución de 0.1%HR. Tiene un precio de \$120. En la siguiente figura se muestra la imagen del Testo 605-H1.



Fig. 2. Supervisor ambiental Testo 605-H1.

### 2.3.2 Supervisor Testo 177-H1-Termohigrómetro.

Es un dispositivo registrador y con él se puede medir temperatura y humedad relativa. Dispone de cuatro canales con sensores internos y conector para sonda de temperatura externa. Cuenta con cabezales de protección para entornos de aire sucio o gases corrosivos. Memoria de hasta 48000 lecturas. Su precio es \$1370. En la figura siguiente se muestra la imagen del supervisor.



Fig. 2. Supervisor Testo 177-H1.

### 2.3.3 Supervisor Testo 425- Anemómetro térmico con sonda de velocidad.

Con este supervisor se puede efectuar la medición de la temperatura, además de la velocidad del aire y el caudal volumétrico por un conducto de ventilación. Posee una sonda telescópica de velocidad/temperatura con sensor NTC de temperatura. El rango de medición de velocidad del aire es de 0 a 20 m/s con una precisión de  $\pm 0.03$  m/s y una resolución de 0.01 m/s. El rango de medición de temperatura va desde -20 a +70°C con una precisión de  $\pm 0.5$ °C y una resolución de 0.1°C. Su precio es \$567. A continuación se muestra la imagen del Testo 425.



Fig. 2. Supervisor ambiental Testo 425.

### 2.3.4 Supervisor Testo 608-H1/H2-Termohigrómetro

Este supervisor permite la medición de humedad relativa, temperatura y punto de rocío. En el modelo 608-H2 se puede configurar una alarma que se dispara cuando se sobrepasan los valores límites medidos. Para la medición utiliza un sensor de humedad y un sensor NTC de temperatura. Tiene un costo de \$93. A continuación se muestra una tabla con las características técnicas para ambos modelos y su imagen.

Tabla 2. . Características técnicas del supervisor Testo 608-H1/H2.

| Parámetro                        | Testo 608-H1 | Testo 608-H1 |
|----------------------------------|--------------|--------------|
| Rango de medición de temperatura | 0...+50°C    | -10...+70°C  |
| Rango de medición de humedad     | 10...95%HR   | 2...98%HR    |
| Precisión (a +25°C)              | ±3%HR/±0.5°C | ±2%HR/±0.5°C |
| Resolución                       | 0.1%HR/0.1°C | 0.1%HR/0.1°C |



Fig. 2. Supervisor Testo 608-H1/H2.

## CAPITULO 3 . DISEÑO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL

En este capítulo se describe el proceso de diseño del hardware, los componentes utilizados y sus características. Además se describe el software implementado para el prototipo empleando para ello su diagrama de flujo. Finalmente se realiza una valoración económica del sistema.

En la siguiente imagen se muestra un esquema en bloques general del dispositivo, con algunos de sus componentes fundamentales.

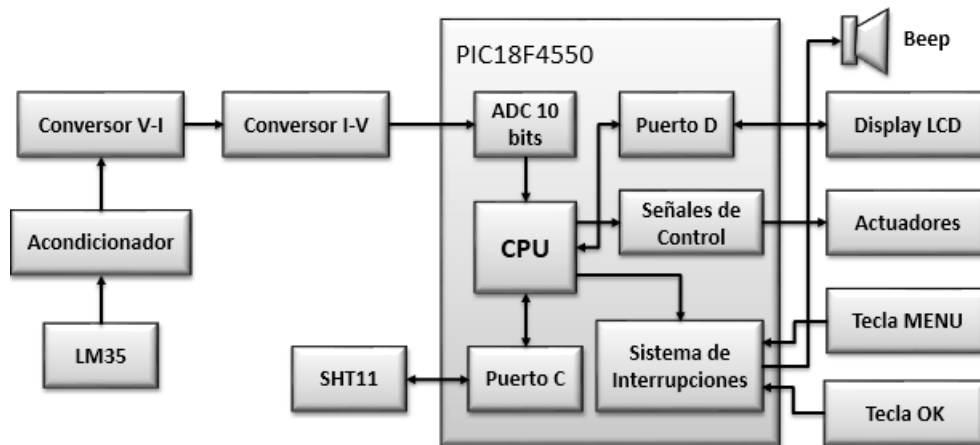


Fig. 3. Esquema en bloques del dispositivo.

El sistema debe ser capaz de supervisar y controlar tanto la temperatura como la humedad relativa. Para lograr ello debe realizar mediciones de ambos parámetros, hacer comparaciones con los valores definidos por el usuario y accionar o no los equipos de climatización (aires acondicionados y deshumidificador). La colocación de los sensores para la supervisión y control de las variables ambientales ya mencionadas, se hará de la siguiente forma:

El sensor de humedad-temperatura SHT11 se colocará en el “Área de conservación #1”, cercano a la toma de aire del deshumidificador, debido a que por el diseño del sistema de conductos esta será el área de mayor concentración de humedad relativa.

El sensor de temperatura será colocado en el “Área de conservación #2”, ya que los medios que se almacenan allí, deben permanecer a temperaturas inferiores a los 25 °C. Además el dispositivo debe visualizar en un *display* LCD las mediciones realizadas por los sensores.

### 3.1 Diseño del Hardware

Para el diseño del hardware se debe considerar en primera instancia los componentes a emplear y las funcionalidades del dispositivo, las cuales se enumeran a continuación:

- El dispositivo debe tener un teclado, que permita al usuario definir los parámetros de configuración, este contará de cuatro teclas: MENU (para ingresar al menú de configuración), OK (para seleccionar los parámetros a configurar: temperatura o humedad) y dos teclas: INC y DEC para incrementar o decrementar los parámetros según lo establecido.
- Para la medición de temperatura en el Área No.2 se utiliza el sensor LM35, por lo que se utilizará uno de los terminales del puerto A que está asociado al módulo conversor analógico digital, como canal analógico de entrada. Para la medición de la humedad relativa y temperatura en el Área No.1 se utiliza el sensor SHT-11 de *Sensirion*, el cual utiliza un protocolo similar al I<sup>2</sup>C para establecer la comunicación con el microcontrolador: posee un terminal bidireccional para los datos u otro para la señal de reloj.
- Teniendo en cuenta que el sensor de temperatura estará situado a más de 20 metros del dispositivo controlador, se precisa de un conversor de voltaje a corriente y uno de corriente a voltaje, para evitar pérdidas en la señal por caídas de tensión en el cable.
- Para la visualización se utiliza un *display* LCD LM016L, el cual cuenta con un bus de datos de 8 bits y tres señales de control. En el diseño solo se emplean cuatro líneas del bus de datos, pues el controlador de *display* HD44780 lo permite, además el compilador posee librerías para LCD que solo necesitan cuatro líneas del bus para el envío de los datos e instrucciones, lo cual supone ahorrar terminales del microcontrolador.
- El circuito de control se encargará de energizar o no los equipos de climatización, dispondrá de dos líneas para control de aires acondicionado, y una para el deshumificador.

A continuación se muestra el esquema eléctrico del dispositivo:



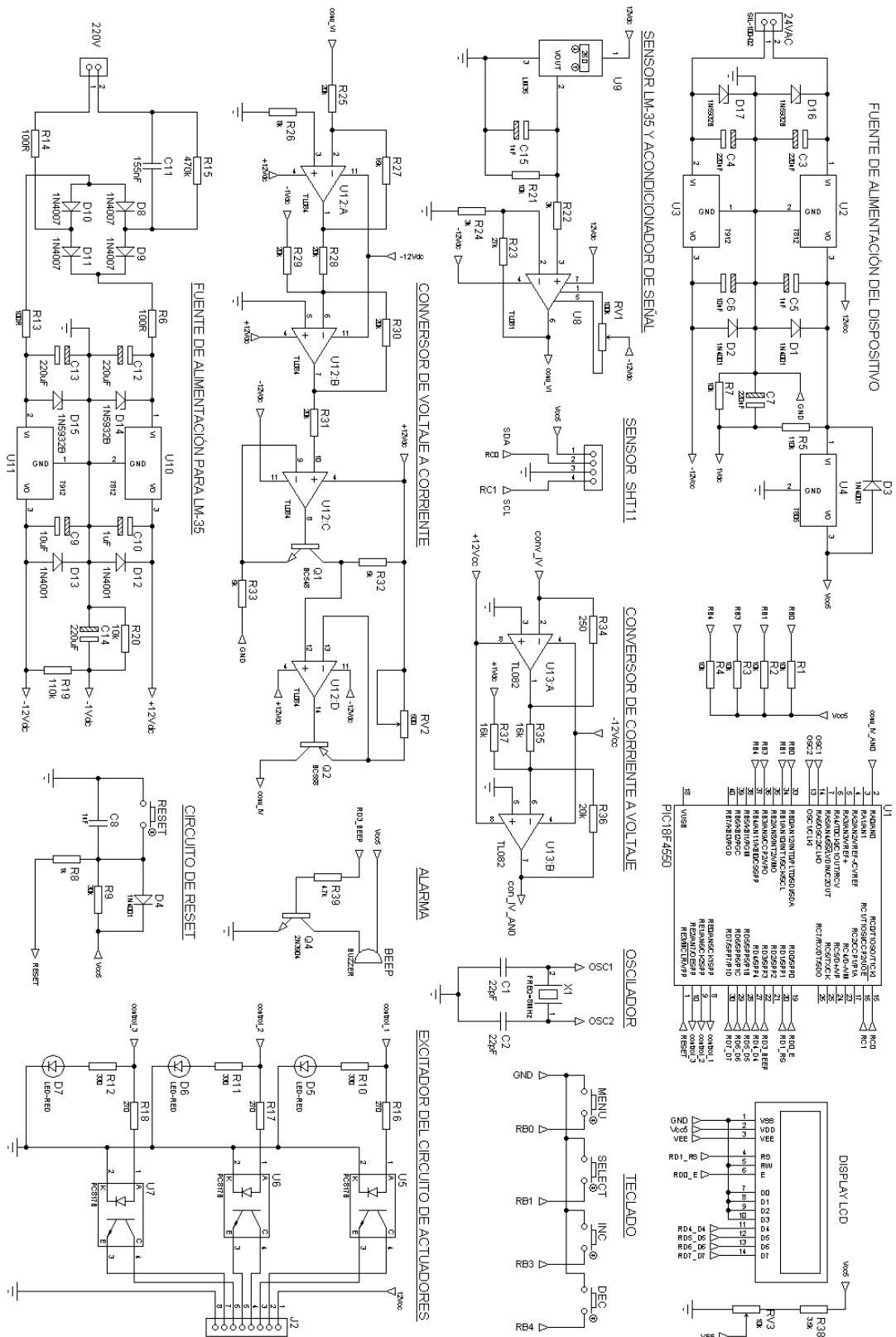


Fig. 3. Esquema eléctrico del dispositivo.

### 3.2 Sensor de temperatura LM-35.

El LM35 es un sensor de temperatura de precisión dentro de un circuito integrado de tres terminales que no requiere de calibración externa, cuyo voltaje de salida es linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius.

A continuación se listan algunas de sus características fundamentales:

- Sensor calibrado directamente en grados Celsius.
- Sensibilidad de +10mV/°C.
- Puede trabajar en un rango de temperatura de -55°C a +150 °C.
- Tensión de alimentación entre 4 y 30 V.

En la siguiente figura se muestra el aspecto físico del dispositivo, su distribución de terminales así como la vista en ISIS.

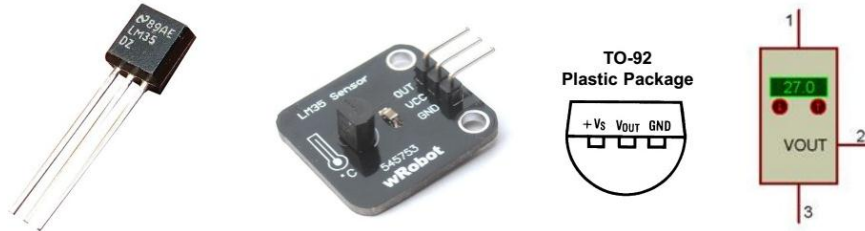


Fig. 3. Sensor de temperatura LM-35.

#### 3.2.1 Cálculo del error introducido por el sensor.

Como el sistema que se propone debe ser lo más preciso posible, se impone calcular el error que introduce el sensor en la medición. Para ello se determina el error para el peor de los casos empleando la siguiente fórmula:

$$\delta_{pc} = \delta_{no\ linealidad} + \delta_{estaticos} + \delta_{variables} \quad (3.1)$$

Donde  $\delta_{pc}$  es el error para el peor de los casos.

Primeramente se calcula el campo de voltaje a la salida del LM35, teniendo en cuenta que el voltaje a la salida del sensor se puede determinar mediante la siguiente fórmula:

$$V_{sen} = S \times T \quad (3.2)$$

Donde:

$V_{sen}$ : Voltaje a la salida del sensor.

$S$ : Sensibilidad del sensor.

$T$ : Temperatura.

Para la temperatura mínima ( $T = 0^{\circ}\text{C}$ ), aplicando la ecuación (3.2) sería:

$$V_{sen} = S \times T_{min}$$

$$V_{sen} = 10\text{mV}/^{\circ}\text{C} \times 0^{\circ}\text{C}$$

$$V_{sen} = 0\text{ mV}$$

Para la temperatura máxima ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ), igualmente aplicando la ecuación (3.2) se tiene:

$$V_{sen} = S \times T_{max}$$

$$V_{sen} = 10\text{mV}/^{\circ}\text{C} \times 50^{\circ}\text{C}$$

$$V_{sen} = 500\text{ mV}$$

Entonces:

$$CV_{sen} = V_{sen}(50^{\circ}\text{C}) - V_{sen}(0^{\circ}\text{C}) \quad (3.3)$$

Donde:  $CV_{sen}$  - Campo de voltaje de salida del sensor.

$$\text{Luego: } CV_{sen} = 500\text{ mV} - 0\text{ mV} = 500\text{ mV}$$

#### Cálculo del error de linealidad

Se calcula para una desviación máxima de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , que es el peor caso según el fabricante, aunque este también plantea que la desviación típica es de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . Luego el error de linealidad se calcula de la siguiente forma:

$$\delta_L = \frac{\pm 0.5^{\circ}\text{C} \times 10\text{mV}/^{\circ}\text{C}}{500\text{mV}} \times 100 = \pm 1\% \quad (3.4)$$

Donde  $\delta_L$  : error de linealidad

#### Cálculo de errores estáticos

Error de ganancia:

$$\Delta S = \pm 0.3\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta G = S \times \Delta T = (\pm 0.3\text{ mV}/^{\circ}\text{C}) \times 50^{\circ}\text{C} = \pm 15\text{ mV} \quad (3.5)$$

$$\delta_G = \frac{\Delta G}{CV_{sensor}} \times 100 = \frac{\pm 15\text{ mV}}{500\text{ mV}} \times 100 = \pm 3\% \quad (3.6)$$

Donde:

$\Delta G$  : Error absoluto de ganancia.

$\delta_G$  : Erro relativo de ganancia.

$\Delta T$  : Variación de temperatura.

### Cálculo de errores variables

#### Error de autocalentamiento:

Según la hoja de datos del dispositivo, el autocalentamiento es de  $0.08^{\circ}\text{C}$ . Teniendo en cuenta este parámetro se calcula el error que introduce el sensor debido a su calentamiento en un ambiente estático:

$$\delta_{cal} = \frac{\pm 0.08^{\circ}\text{C} \times 10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}}{500 \text{ mV}} \times 100 = 0.16\% \quad (3.7)$$

Donde:

$\delta_{cal}$  : Error de autocalentamiento del sensor.

### Cálculo del error para el peor de los casos

$$\delta_{pc} = \sum \delta_i \quad (3.8)$$

$$\delta_{pc} = \delta_L + \delta_G + \delta_{cal} \quad (3.9)$$

$$\delta_{pc} = 1\% + 3\% + 0.16\% = 4.16\%$$

### Cálculo del error más probable

$$\delta_{mp} = \sqrt{\sum \delta_i^2} \quad (3.10)$$

$$\delta_{mp} = \sqrt{1^2 + 3^2 + 0.16^2} = 3.16\%$$

## 3.3 Acondicionador de nivel

Como se explicó en el epígrafe anterior el sensor LM35 entrega a su salida valores de tensión que son linealmente proporcionales a la temperatura del medio que lo circunda, además su corriente de salida es de solo 10 mA, es por ello que se precisa del diseño de un acondicionador de nivel, el cual consta de una etapa amplificadora para elevar las variaciones de  $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  a la salida de este.

Para poder realizar las operaciones de supervisión y control es necesario convertir el valor de tensión analógica entregado por el sensor a un valor digital, esto se realiza a través del módulo conversor analógico digital del microcontrolador PIC, el cual fue configurado con

una resolución de 10 bits y una tensión de referencia de 5V, lo cual limita a un rango entre 0 y 5 V los valores de tensión en el canal analógico de entrada al conversor.

En condiciones normales la temperatura dentro de la obra no debe exceder los 50°C, ya que como se explicaba anteriormente su valor va a estar por debajo de la máxima diaria.

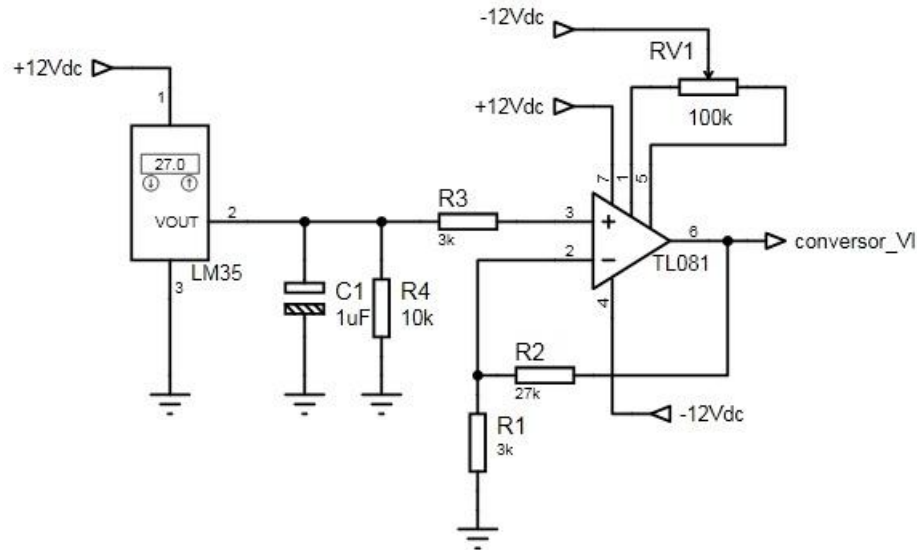


Fig. 3. Acondicionador de nivel para sensor de temperatura.

En la figura 3.4 se muestra el circuito diseñado, la resistencia R4 y el capacitor C1 se utilizan para que el voltaje a la salida del sensor no se vea afectado por el ruido y las interferencias eléctricas. La resistencia R3 y el potenciómetro RV1 se utilizan para fines de compensación de la corriente de polarización y el voltaje de offset de entrada respectivamente. La ganancia de la etapa amplificadora se fijó en 10 por lo que  $R2/R1=9$ , obteniéndose  $R2=27k$  y  $R1=3k$ .

### 3.4 Conversor de voltaje a corriente.

En muchos de los entornos de la instrumentación electrónica, el lugar donde se debe efectuar la medición de un determinado parámetro o variable está definido por el propio proceso o sistema que se desea monitorear y en muchos casos suele ser inamovible.

En este caso, el procesamiento de la información entregada por el sensor de temperatura LM35 hasta convertirla en un valor que será presentado y utilizado por el sistema de supervisión y control ocurre en un lugar diferente a donde se realiza la medición y la distancia que los separa es apreciable y superior a los 20 m, es por ello que se utiliza un circuito para convertir la señal de voltaje de DC a la salida del acondicionador a una señal de corriente en el rango de 4 a 20 mA.

Para el diseño del circuito se tuvo en cuenta que la relación entre el valor mínimo y el

máximo que este entrega a su salida es del 20 %: 4mA es el 20% de 20mA.

A este convertidor ingresa la señal proveniente del acondicionador con valores entre 0 y 5V, pero para que se cumpla la relación de porcentaje anterior entre el máximo y mínimo valor de corriente, la señal que entrega el acondicionador debe cumplir la misma condición, de modo que es necesario realizar el acondicionamiento previo de esta. A continuación se muestra el circuito.

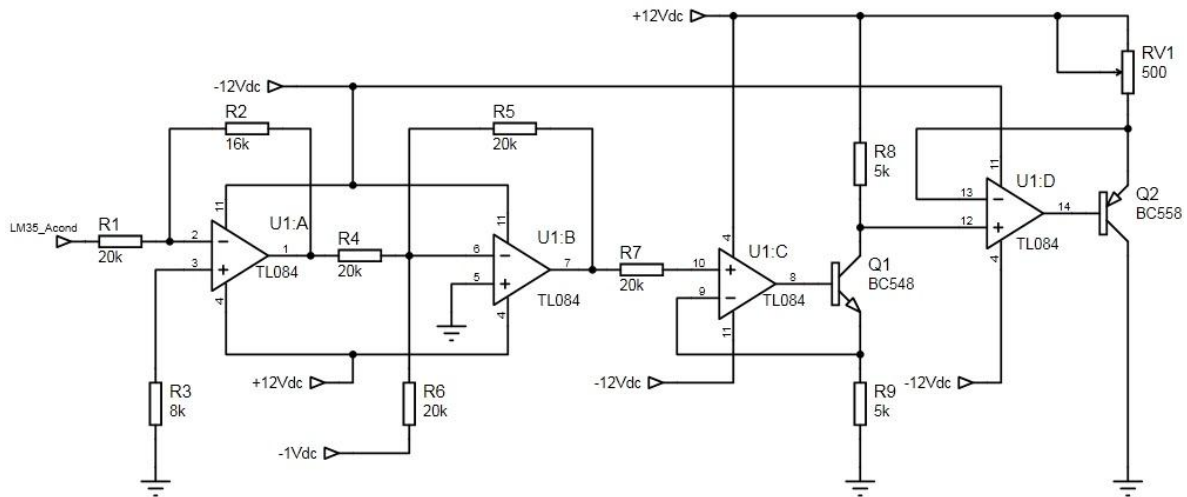


Fig. 3. Conversor de voltaje a corriente.

Con el circuito de la figura 3.5 se realiza el acondicionamiento de la señal de entrada de 1 a 5V, ello teniendo en cuenta que 1V representa el 20% de 5V.

La primera estructura es un amplificador inversor, seguido por un sumador ponderado, que suma a la señal -1Vdc, dado que este valor de tensión representa el 20 % del máximo que se puede tener a la entrada. De esta forma se logra que para 0 V en la entrada haya 1V a la salida del sumador.

Se debe cumplir además que para 5V en la entrada, se tenga este mismo resultado a la salida del sumador. Para ello se necesita que a la salida de la primera estructura haya -4V, para lograrlo se fijó la ganancia de esta etapa a 4/5. De esta forma se logra cumplir con las condiciones planteadas anteriormente.

La siguiente estructura, no es más que una modificación del amplificador no inversor básico, la cual entrega a su salida una corriente proporcional al voltaje de entrada. En ella el voltaje en R7 es igual a V. cuando el voltaje de entrada es máximo ( $V_+=5V$ ). Como  $V_+=V$ . entonces  $V_{R7}=5V$ . Teniendo en cuenta lo anterior se fijó para Q1 una corriente de 1mA resultando  $R9=5k$ , fijando además  $V_{CE}=2V$ ,  $R8=5k$ .

En la última estructura el voltaje en la resistencia de colector de Q2 es igual a  $V_-$  y como  $V_+ = V_-$  y  $V_+ = V_{R8}$  entonces  $V_{RcQ2} = V_{R8}$ . Como para el máximo voltaje de entrada la corriente de salida máxima es 20 mA, entonces  $R_C$  debe tener un valor de  $250\Omega$ , en este caso se utiliza el potenciómetro RV1 para lograr un mejor ajuste de la corriente de salida.

### 3.5 Conversor de corriente a voltaje.

Una vez que la señal se ha convertido a corriente, resulta necesaria su transformación inversa, para poder ser procesada por el convertor A/D del microcontrolador PIC. En la siguiente figura se muestra el circuito diseñado.

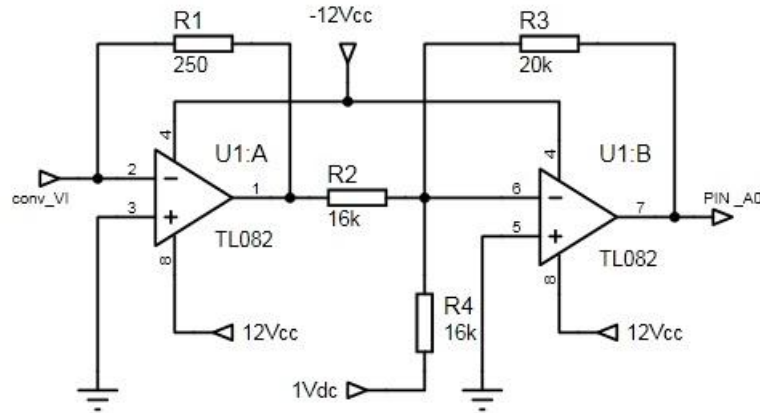


Fig. 3. Conversor de corriente a voltaje.

La primera etapa del circuito constituye un conversor de corriente a voltaje cuya resistencia de realimentación  $R1$  es igual a  $250\Omega$ , de modo que para 20mA que es el máximo valor de corriente que se puede tener a la entrada, habrá -5V a la salida, y para el mínimo valor (4mA) se tendrá -1V. Evidentemente, para el correcto procesamiento de la señal entregada por el LM35 está debe ser de nuevo llevada a un rango de 0 a 5V, esto se logra realizando el proceso inverso.

La segunda etapa no es más que un amplificador sumador no inversor, en el cual se suma la señal proveniente del paso anterior con una señal de 1V al igual que en el circuito anterior, pero esta vez con polaridad positiva. En este caso la ganancia de la etapa tiene un valor  $A=5/4$ , lo que garantiza que cuando haya, por ejemplo, -5V a la salida del conversor de corriente a voltaje y esta tensión se le suma 1V en el sumador y se amplifique se tengan 5V a la salida; de igual manera si a la salida de la primera etapa se tiene -1V se tendrá 0V a la salida del sumador.

### 3.6 Fuente de alimentación para LM35 y acondicionadores de señal.

Teniendo en cuenta lo planteado en epígrafes anteriores, en lo relacionado con que la medición de temperatura se realizará en un lugar distante del circuito principal, para la alimentación tanto del sensor LM35, el acondicionador de nivel y el conversor de voltaje a corriente, se necesita una fuente que genere  $\pm 12V$ , teniendo en cuenta que es la tensión que necesitan los amplificadores operacionales utilizados en este caso para fines de acondicionamiento y que el sensor de temperatura posee un rango de tensión de alimentación entre 4 y 30V.

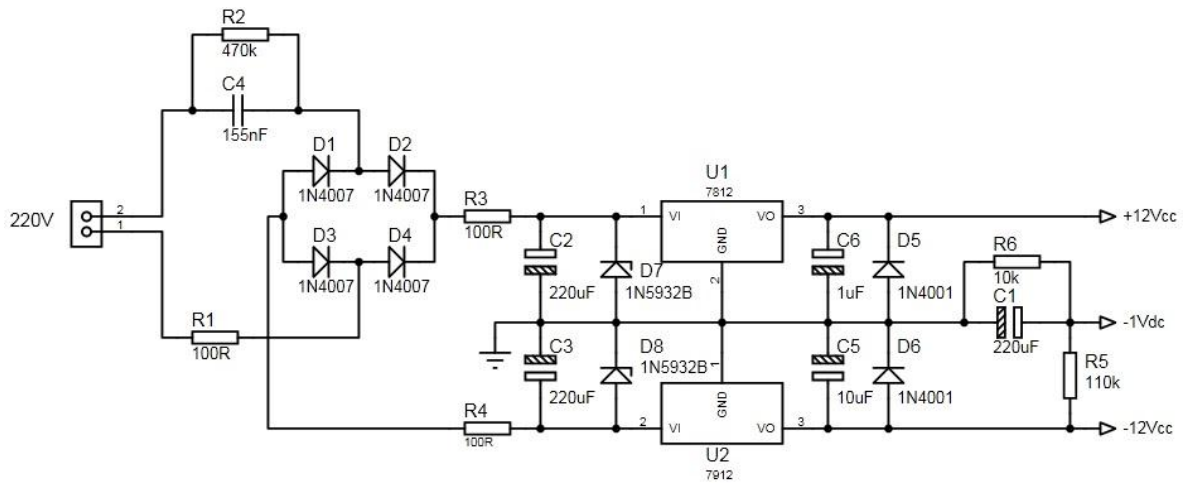


Fig. 3. Fuente de alimentación para: sensor LM35, acondicionador de señal y conversor de voltaje a corriente.

Se diseñó una fuente sin aislamiento galvánico (sin transformador), teniendo en cuenta que los componentes a alimentar son de baja potencia. El capacitor C4 se utiliza para limitar la corriente a través del puente de diodos. La resistencia R1 protege el circuito contra los picos de tensión producto de la conmutación. A continuación del puente de diodos aparece una resistencia para limitar la corriente y luego los filtros de fuente. Luego a la salida de los reguladores de voltaje aparecen C5 y C6, que son capacitores de desacoplo para mejorar la respuesta transitoria de la tensión regulada a la salida. Los diodos D5 y D6 se emplean para proteger la fuente contra cortocircuitos en la carga.

### 3.7 Sensor de humedad SHT-11.

El SHT-11 es uno de los sensores de humedad relativa y temperatura pertenecientes a la familia SHT-1x de *Sensirion*. El dispositivo contiene además de los elementos del sensor un bloque para el procesamiento de señal y proporciona un rendimiento digital totalmente calibrado. Utiliza un sensor capacitivo para medir la humedad relativa que a su vez está



conectado a un conversor analógico digital de 14 bits de resolución. Cada SHT se calibra individualmente en una cámara de humedad de precisión. Los coeficientes de la calibración se programan en una memoria OTP en el chip.



Fig. 3. Sensor SHT-11.

La humedad relativa es un parámetro que depende en gran medida de la temperatura. Por ello es importante mantener el sensor a la misma temperatura que el aire del local.

El encapsulado del sensor está diseñado para que exista mínima transferencia de calor a sus terminales. En caso que el dispositivo esté montado en una placa en la que el calentamiento de los componentes electrónicos que la forman sea apreciable, este debe montarse de manera tal que no haya transferencia de calor o sea lo menor posible.

El SHT-11 no es sensible a la luz, incluso puede estar expuesto directamente al sol o a los rayos ultravioletas y no afectarse la precisión de la medición realizada.

### 3.7.1 Especificaciones del sensor.

Tabla 3. Distribución de terminales del SHT-11. [10]

| Pin | Nombre | Descripción                    |  |
|-----|--------|--------------------------------|--|
| 1   | GND    | Tierra                         |  |
| 2   | DATA   | Señal de datos (bidireccional) |  |
| 3   | SCK    | Señal de reloj                 |  |
| 4   | VDD    | Tensión de alimentación        |  |
| NC  | NC     | No conectado                   |  |

La tensión de alimentación del SHT-11 puede estar en el rango de 2.4 a 5.5V, aunque el fabricante recomienda 3.3V. Los terminales VDD y GND están aislados a través de un capacitor de desacoplamiento de 100 nF.

El sensor no es direccionable a través del protocolo I<sup>2</sup>C, aunque puede estar conectado al bus I<sup>2</sup>C sin interferir a ningún dispositivo conectado a este último. A continuación se muestra el circuito de conexión típico, que incluye además la resistencia de pull-up entre el terminal de datos y VDD debido a que este es un pin *tri*-estado.

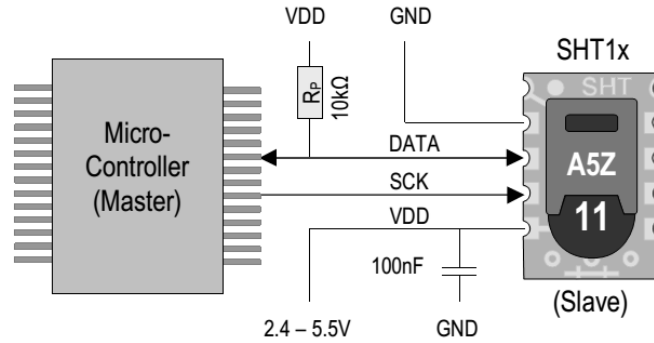


Fig. 3. Esquema de interconexión entre el microcontrolador y el SHT-11. [10]

### Entrada de reloj serie (SCK)

Este terminal se utiliza con el objetivo de establecer el sincronismo en la comunicación del SHT-11 con el microcontrolador. Puesto que la interface consiste en lógica estática, no necesita de una frecuencia mínima de operación.

### Terminal de datos serie (DATA)

El terminal *tri*-estado DATA se utiliza para la transferencia de datos desde y hacia el sensor. Para enviar un comando: una vez que ocurre un flanco de subida en la señal de reloj (SCK) y mientras esta permanezca en nivel alto. Para leer un dato del sensor: una vez que SCK va a nivel y se produce un nuevo flanco de subida en dicha señal de reloj. A continuación se muestra la carta de tiempo.

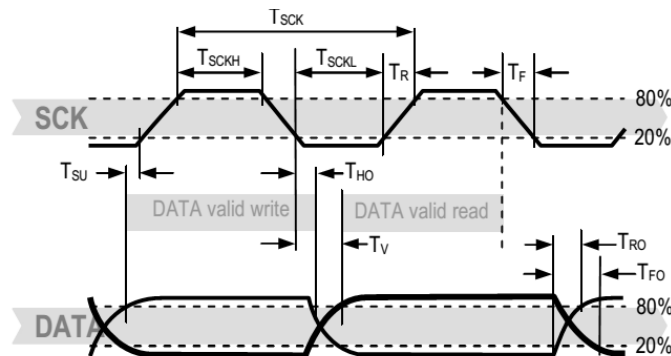


Fig. 1. Diagrama de tiempo del SHT-11. [10]

En la figura, la línea gruesa es la controlada por el sensor y la más delgada es la manejada por el microcontrolador.  $T_{SCKH}$  y  $T_{SCKL}$  son el tiempo en alto y en bajo de la señal de reloj (SCK) respectivamente;  $T_R$  y  $T_F$ : tiempo de subida y de caída de la señal SCK;  $T_{FO}$  y  $T_{RO}$ : tiempo de caída y subida de la señal de datos (DATA).  $T_V$ : tiempo válido de la señal DATA;  $T_{SU}$ : tiempo inicial de la señal de datos;  $T_{HO}$ : tiempo de retención de la señal DATA.

### 3.7.2 Comunicación con el sensor

Una vez que el sensor ha sido alimentado por la fuente de 5 V, este necesita 11 ms para salir del modo de reposo (*sleep mode*), durante este tiempo no se podrá enviar ningún comando. La comunicación termina después del bit de ACK del dato CRC (suma de verificación). Si la suma de verificación (CRC-8) no es utilizada, entonces el controlador termina la comunicación una vez recibido el dato menos significativo de la medición. El dispositivo vuelve automáticamente al modo de reposo luego de ser realizada la medición y completada la comunicación.

Para enviar un comando, debe enviarse una secuencia de "Inicio de Transmisión". Esto consiste en poner en nivel bajo la señal DATA mientras SCK está en alto, seguido de un pulso en bajo y uno en alto de SCK, luego de este último la señal DATA vuelve a nivel alto. El proceso explicado anteriormente se muestra en la siguiente figura:

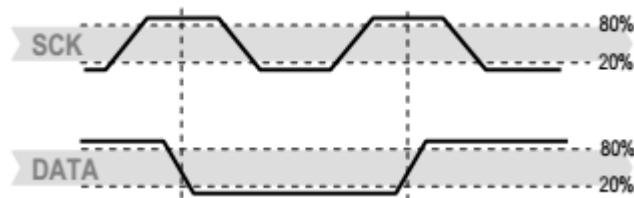


Fig. 3. Secuencia de "Inicio de Transmisión". [10]

Una vez inicializada la transmisión, le siguen tres bits de dirección (siempre '000') y cinco bits de comando. El sensor indica que ha recibido el comando poniendo en bajo la señal DATA, y acto seguido comienza la medición. La señal de datos se vuelve a poner en nivel alto después del noveno bit de la señal de reloj. En la Tabla 3.2 aparece la lista de comandos para el SHT11.

Si se perdiera la comunicación con el dispositivo, esta se puede restablecer empleando la siguiente secuencia: manteniendo la señal DATA en nivel alto, enviar nueve ciclos de reloj, para luego poner en nivel bajo la señal DATA, enviar la secuencia de inicio de transmisión y el comando deseado, lo explicado anteriormente se aprecia en la siguiente figura:

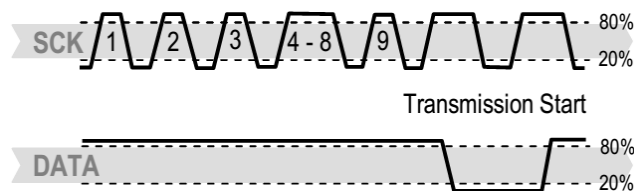


Fig. 3. Secuencia para reiniciar la comunicación. [10]

Tabla 3. Lista de comandos del SHT-11. [10]

| Comando                                                                                            | Código |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Reservado.                                                                                         | 0000x  |
| <b>Medir Temperatura.</b>                                                                          | 00011  |
| <b>Medir Humedad Relativa.</b>                                                                     | 00101  |
| Leer registro de estado                                                                            | 00111  |
| Escribir registro de estado                                                                        | 00110  |
| <b>Restauración</b> (Reset), limpia registro de estado y espera 11 ms antes del siguiente comando. | 11110  |

### 3.7.3 Registro de estado

Algunas de las funciones avanzadas del SHT11 tales como la selección de la resolución de la medición, la recarga de la memoria OTP, entre otras, se pueden activar enviando un comando al registro de estado. En la siguiente tabla se muestran los bits de este registro.

Tabla 3. Bits del registro de estado del SHT11

| Bit | Tipo | Descripción                                                                       | Valor por defecto | Observaciones                                                                 |
|-----|------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 7   |      | Reservado                                                                         | 0                 |                                                                               |
| 6   | R    | Detección de bajo voltaje<br>'0' para $V_{DD} > 2.47$<br>'1' para $V_{DD} < 2.47$ | X                 | No posee valor por defecto, este bit solo se actualiza después de la medición |
| 5   |      | Reservado                                                                         | 0                 |                                                                               |
| 4   |      | Reservado                                                                         | 0                 |                                                                               |
| 3   |      | No utilizado                                                                      | 0                 |                                                                               |
| 2   | R/W  | Heater                                                                            | 0                 | Apagado                                                                       |
| 1   | R/W  | No recargar OTP                                                                   | 0                 | Recargar                                                                      |
| 0   | R/W  | '1'=Resolución 8 bit HR/12 bit Temp.<br>'0'=Resolución 12 bit HR/14 bit Temp.     | 0                 | 12 bit HR<br>14 bit Temp.                                                     |

**Resolución de la medición:** La resolución por defecto es de 14 bit (temperatura) y 12 bit (humedad), se puede reducir a 12 y 8 bit respectivamente. Es muy usada particularmente en aplicaciones de alta velocidad o de muy baja potencia.

Detección de bajo voltaje: esta función detecta y notifica cuando el voltaje de alimentación es inferior a los 2.47 V con una precisión de  $\pm 0.05$  V.

Heater: el chip posee un elemento para su autocalentamiento, lo cual eleva la temperatura del sensor de 5 a 10 °C por encima de la temperatura ambiente, esto es muy útil para análisis de funcionalidad, por ejemplo, se puede realizar una medición de temperatura y humedad relativa y luego activar el *heater* y comparar. Con esto se puede ver el incremento de la temperatura mientras disminuye la humedad relativa.

Recargar OTP: con esta operación se cargan los datos de calibración en el registro después de cada medición. Esta se puede desactivar para reducir el tiempo de medición aproximadamente 10 ms.

#### **3.7.4 Medición de humedad relativa y temperatura**

Para medir la humedad relativa debe enviarse el comando '00000101', así como '00000011' para temperatura, luego el microcontrolador debe esperar a que la medición se complete, esto demora un tiempo de 20/80/320 ms para mediciones de 8/12/14 bits. El tiempo varía dependiendo de la frecuencia del oscilador interno.

El sensor indica que ha terminado la medición poniendo la línea DATA en nivel bajo. Luego el microcontrolador envía la señal de sincronismo SCK y lee el dato. La medición es guardada en el sensor mientras no sea leída, esto permite que el microcontrolador realice otras tareas y pueda obtener el dato en cualquier momento con solo enviar la señal SCK.

Durante el proceso de lectura, se transmiten dos bytes de medición y uno de suma de verificación (CRC-8 *checksum*).

El microcontrolador debe enviar un ACK cada vez que lea un byte. La comunicación se completa una vez que el microcontrolador toma el byte CRC y envía el bit de ACK, luego del cual el sensor va a modo reposo en espera de la próxima medición. Si no se utiliza suma de verificación se obvia el bit de ACK y se termina la transmisión. En la siguiente figura se muestra este proceso:

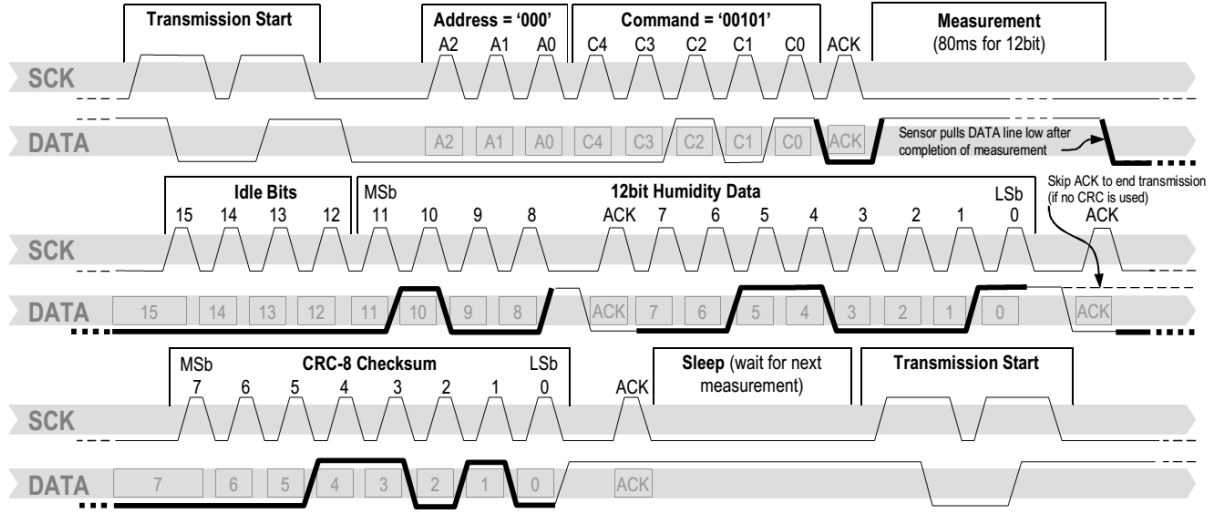


Fig. 3. Ejemplo de secuencia de medición de humedad relativa. [10]

El proceso que se ilustra en la figura, se corresponde con la medición de humedad relativa (HR), el cual comienza cuando el microcontrolador envía la secuencia de inicio '00000101', a la que el sensor responde con un ACK y poniendo la línea DATA en nivel bajo hasta que la medición se complete. Luego envía dos bytes correspondiente al valor de humedad relativa y un byte CRC para comprobar la integridad de los datos. El valor de los primeros dos bytes es: "0000'0100'0011'0001", cuyo valor en decimal es 1073 y sus primeros cuatro bits están en cero porque la resolución es de 12 bits. [10]

### 3.7.5 Conversión de la señal recibida.

La señal recibida por el microcontrolador debe ser convertida a un valor de humedad relativa lineal, para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$HR_{lineal} = c_1 + c_2 \cdot SO_{HR} + c_3 \cdot SO_{HR}^2 (\%HR) \quad (3.11)$$

Donde:

- $SO_{HR}$  – dato de 12 u 8 bits que entrega el sensor por la línea DATA.
- $c_1, c_2, c_3$  – coeficientes de conversión para el cálculo de temperatura.

Tabla 3. Coeficientes de conversión para obtener HR lineal. [10]

| $SO_{HR}$ | $c_1$   | $c_2$  | $c_3$       |
|-----------|---------|--------|-------------|
| 12 bit    | -2.0468 | 0.0367 | -1.5955E-6  |
| 8 bit     | -2.0468 | 0.5872 | -4.0845 E-4 |

En la siguiente figura se muestra la relación entre el dato que entrega el sensor y la humedad relativa, pero sin corregir la linealidad:

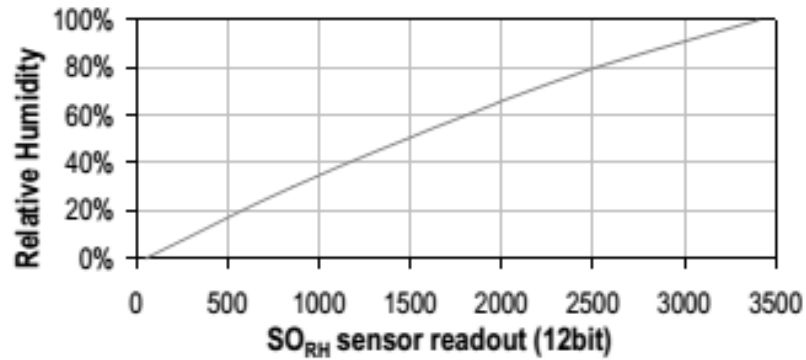


Fig. 3. Conversión del dato entregado por el SHT11 a humedad relativa. [10]

Cuando la temperatura es diferente a 25 °C, es necesario realizar compensación por temperatura a la señal entregada por el sensor. Para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$HR_{real} = (T_{°C} - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{HR}) + HR_{lineal}(\%) \quad (3.12)$$

Donde:

- $T_{°C}$ — temperatura en grados Celsius.
- $t_1, t_2$ — coeficientes de compensación por temperatura.

A continuación se muestra una tabla con los valores de los coeficientes de compensación para una resolución de 12 bits.

Tabla 3. Coeficientes de compensación de temperatura. [10]

| $SO_{HR}$ | $t_1$ | $t_2$   |
|-----------|-------|---------|
| 12 bit    | 0.01  | 0.00008 |

Para convertir el valor de la lectura digital correspondiente a la medición de temperatura, se utiliza la siguiente fórmula:

$$T = d_1 + d_2 \times SO_T \quad (3.13)$$

- $SO_T$ — dato de 14 o 12 bit que entrega el sensor por el terminal DATA.
- $d_1, d_2$ — coeficientes de conversión para el cálculo de temperatura.

A continuación se muestra la tabla con los coeficientes:

Tabla 3. Coeficientes para el cálculo de temperatura

| SO <sub>T</sub> | d <sub>2</sub> (°C) | VDD   | d <sub>1</sub> (°C) |
|-----------------|---------------------|-------|---------------------|
| 14 bit          | 0.01                | 5 V   | -40.1               |
| 12 bit          | 0.04                | 3.5 V | -39.7               |

Aunque el sensor no puede medir directamente la temperatura del punto de rocío este se puede calcular a través de la temperatura y la humedad medidas por el sensor mediante la siguiente aproximación para un rango de -40 a 50°C:

$$T_d(RH, T) = T_n \times \frac{\ln\left(\frac{HR}{100}\right) + \frac{m \times T}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{HR}{100}\right) - \frac{m \times T}{T_n + T}} \quad (3.14)$$

Donde RH es la humedad relativa, T la temperatura, y m y T<sub>n</sub> dos constantes cuyos valores se muestran a continuación:

Tabla 3. Parámetros para el cálculo de la temperatura del punto de rocío (T<sub>d</sub>).

| Rango de temperatura | T <sub>n</sub> (°C) | m     |
|----------------------|---------------------|-------|
| 0-50°C               | 243.12              | 17.62 |
| -40-0°C              | 272.62              | 22.46 |

Como se expuso al principio del epígrafe, el sensor utiliza un protocolo de comunicación similar al I<sup>2</sup>C, pero no igual, ya que no es direccionable a través del bus I<sup>2</sup>C del microcontrolador, por esa razón fue necesaria la implementación de una librería en el IDE mikroC Pro 6.0 para establecer la comunicación, empleando para su desarrollo la carta de tiempo y los modelos de cálculo de temperatura y humedad relativa detallados anteriormente y que los ofrece el fabricante en la hoja técnica del dispositivo.

### 3.8 Actuadores

Muchos sistemas digitales controlan a otros sistemas o realizan funciones de control tales que deben ser interconectados a una etapa de potencia para actuar sobre cargas resistivas o inductivas, todo ello mediante el uso de relevadores y contactores electromagnéticos,



tiristores, TRIAC, etc. La manipulación de altas corrientes implica tener consideraciones de protección para el sistema digital.

Cada terminal del microcontrolador PIC18F4550 admite una corriente de salida máxima de 25 mA, y en su conjunto los terminales de entrada/salida admiten 200 mA máximos a la salida, de manera que no pueden existir más de cuatro terminales manejando dicha corriente (25 mA). Con el objetivo de proteger al microcontrolador contra corrientes excesivas, se aisló eléctricamente la etapa digital del circuito de potencia mediante optoacopladores, esto permite que en caso de que ocurra un cortocircuito en la etapa de potencia o alguna otra anomalía eléctrica se garantice la protección de la circuitería digital de control. En la figura 3.12 se muestra el circuito de actuación diseñado.

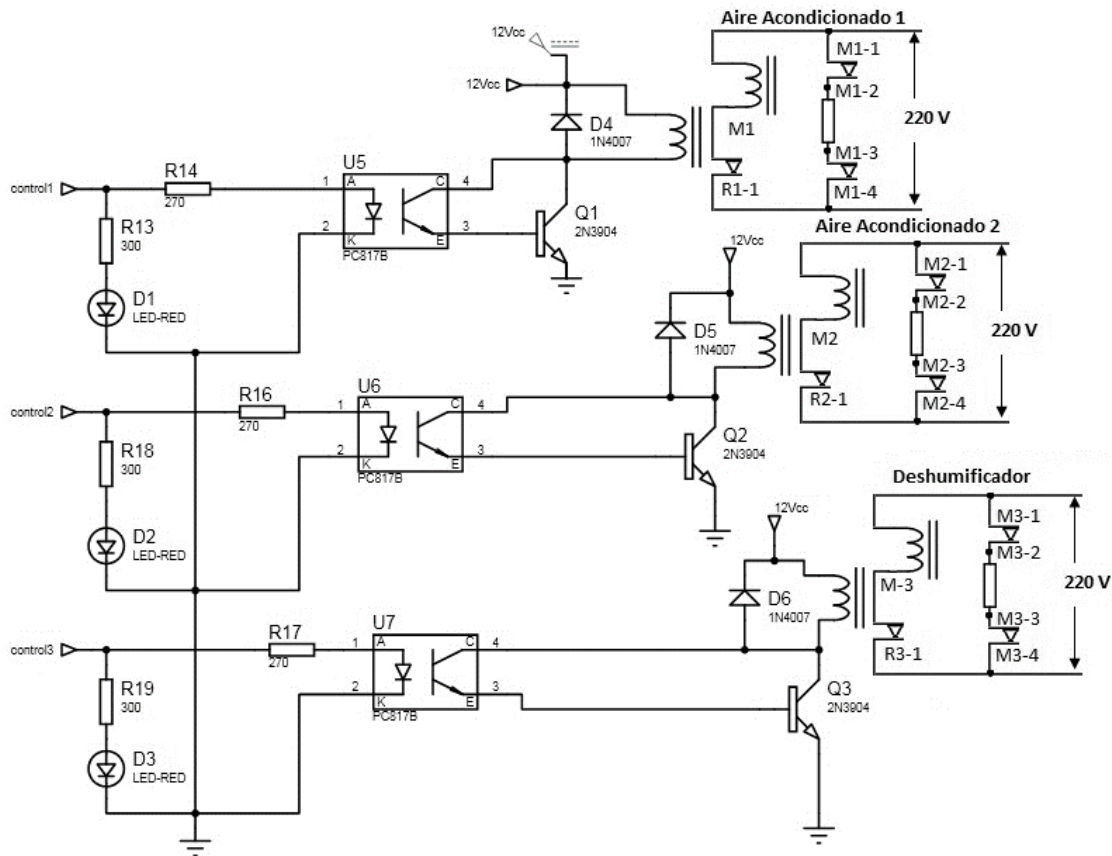


Fig. 3. Circuito actuador.

El control por hardware se implementó con lógica positiva: un “1” a la salida del microcontrolador activa el control, un “0” lo desactiva.

El cálculo de las resistencias que polarizan tanto los diodos LED que indican si el control está activado o no, así como los emisores de los respectivos optoacopladores, se realizó

teniendo en cuenta que el valor de corriente no superase los 25 mA. A continuación mostramos un ejemplo:

En el terminal “control1”, para tener una iluminación aceptable del diodo D1, se necesitan 2 V y 9 mA, con una salida de 5 V por el pin RE0 del puerto E. Aplicando la ley de Ohm se tiene que:

$$I_{LED} = \frac{V_{RE0} - V_{LED}}{R_{LED}} \quad (3.15)$$

$$R_{LED} = \frac{5V - 2V}{0.09A} = 300\Omega$$

Se escogió una resistencia de 330  $\Omega$

En la rama compuesta por el emisor del optoacoplador, la corriente disponible es:

$$I_D = I_{RE0} - I_{LED} \quad (3.16)$$

$$I_D = 25\text{ mA} - 9\text{ mA} = 16\text{ mA}$$

Para calcular el valor de  $R_D$  se estimó una corriente de 15 mA, para un voltaje típico del emisor del optoacoplador de 1.2 V:

$$R_D = \frac{V_{RE0} - V_{tipico}}{15\text{ mA}} \quad (3.17)$$

$$R_D = \frac{5V - 1.2V}{15\text{ mA}} = 253\Omega$$

Se escogió una resistencia de 270  $\Omega$ , por tanto:

$$I_D = \frac{5V - 1.2V}{270\Omega} = 14\text{ mA}$$

Luego la corriente total es:

$$I_{RE0} = 9\text{ mA} + 14\text{ mA} = 23\text{ mA}$$

Por tanto, se asegura un funcionamiento correcto, teniendo en cuenta que la corriente es inferior a la máxima establecida por el fabricante.

### 3.9 Fuente de alimentación del dispositivo

Para el diseño de la fuente de alimentación se tuvo en cuenta que esta debe entregar, cuatro niveles de tensión: +12V, -12V, +5V y +1V.

La fuente se compone de tres reguladores integrados: dos positivos (7812 y 7805) y uno negativo (7912). La tensión de entrada es igual a  $\pm 24\text{VAC}$ , luego se regula a  $\pm 12\text{V}$  y por último a 5V. Para obtener +1V se realiza una divisor de tensión. En la siguiente figura se muestra la fuente diseñada.

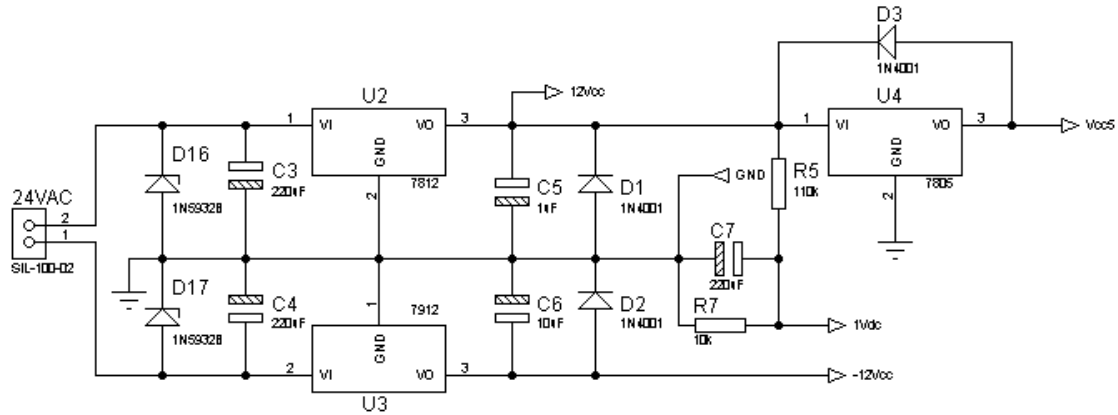


Fig. 3. Fuente de alimentación del dispositivo.

### 3.10 Diagrama de flujo del programa

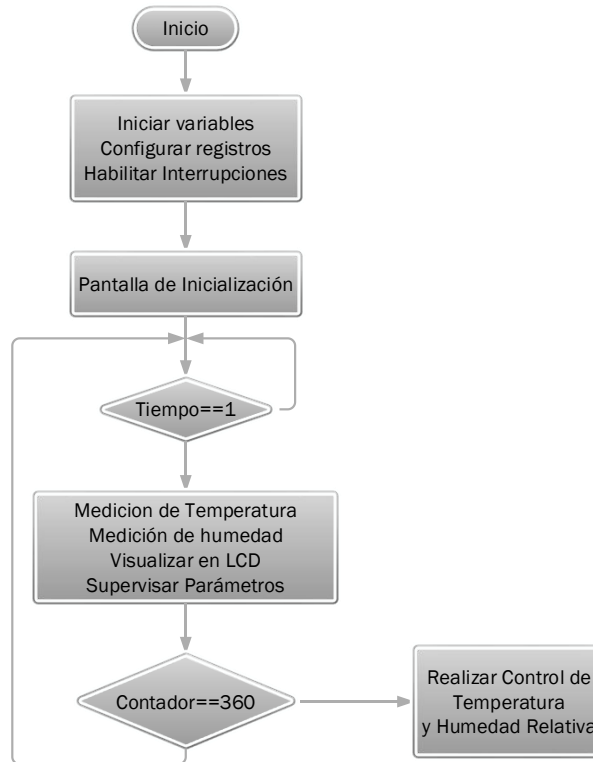


Fig. 3. Diagrama de flujo del programa principal.

En la figura 3.16 se aprecia el diagrama de flujo del programa principal para controlar el hardware diseñado anteriormente. Inicialmente se configuran los registros y módulos internos del microcontrolador y luego se realizan las mediciones correspondientes. Además en esta primera parte del programa el controlador se encarga de activar los equipos de

clima, presentar el estado en que se encuentra el control y los valores obtenidos como resultado de la medición en el *display* LCD.

Para que el dispositivo ejecute el control como es debido se deben determinar bajo qué circunstancias este debe activar los equipos de climatización. El programa principal debe utilizar estas circunstancias como parámetros variables y de acuerdo a ellos decidir qué acción realizar. Estos requerimientos son provistos por el usuario que manipulará el dispositivo y son los siguientes:

- Ingresar la temperatura máxima y mínima permisible.
- Ingresar la humedad relativa máxima y mínima permisible.

La segunda parte del programa se dedica a las operaciones planteadas anteriormente realizadas mediante interrupciones. A continuación se muestra el diagrama de flujo de la rutina de atención a interrupciones.

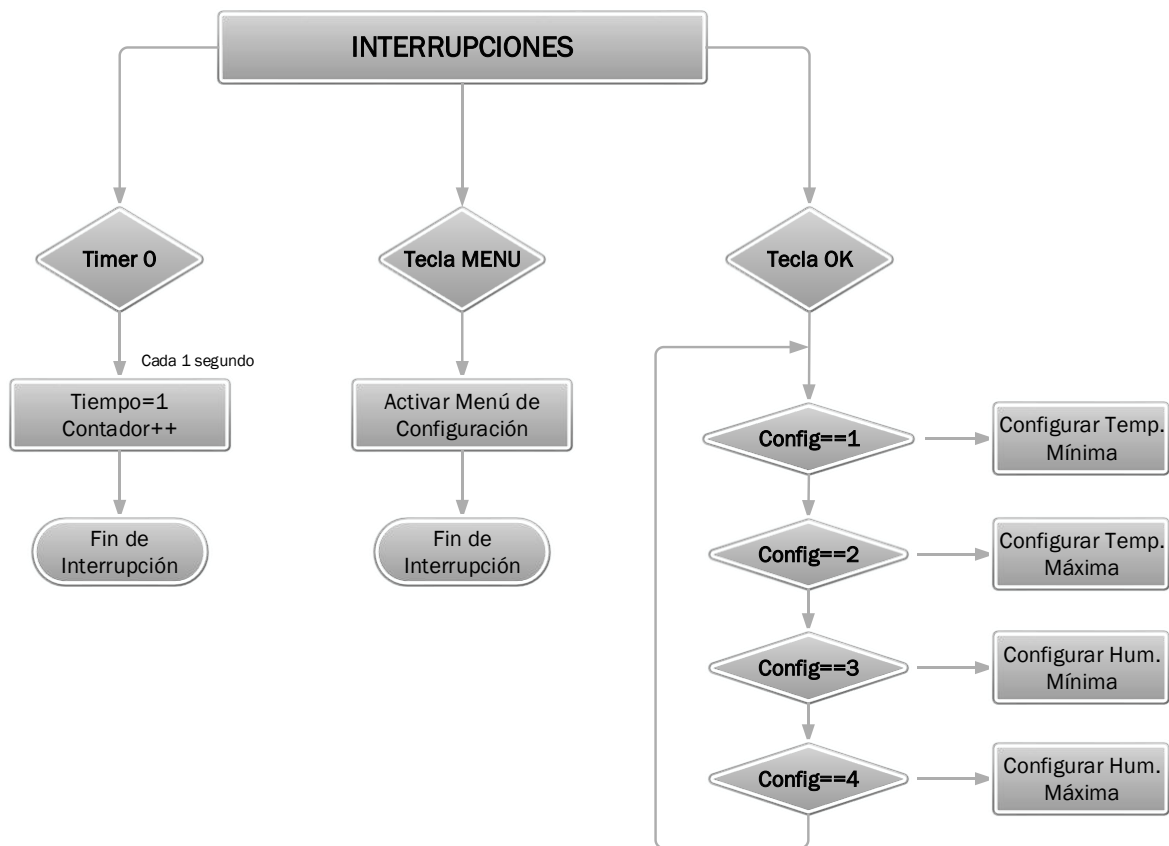


Fig. 3. Diagrama de flujo de la rutina de atención a interrupciones

Se utilizaron tres de las fuentes de interrupción que tiene el microcontrolador PIC18F4550, dos externas para la activación del menú y la selección de los parámetros a configurar y la

del Timer 0 que modifica la variable “tiempo” que controla la visualización de los datos en el LCD y la variable “contador ” empleada para la realización del control. El programa se editó y se compiló con el IDE mikroC Pro 6.0. En la siguiente tabla se realiza un resumen con las funciones implementadas en el programa:

Tabla 3. Funciones implementadas

| Función                                                                                                                 | Descripción                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>void</b> display_LCD_Visualizar()                                                                                    | Función para realizar las mediciones y visualizar los datos en el LCD. |
| <b>void</b> actualizar_datos_config(unsigned int temp1,unsigned int temp2,unsigned int humedad1, unsigned int humedad2) | Función para guardar los parámetros configurados.                      |
| <b>void</b> Supervision_Parametros()                                                                                    | Función para supervisar la variables ambientales                       |
| <b>void</b> Realizar_Control()                                                                                          | Función para activar el control de la variables ambientales            |
| <b>void</b> Encuestar_Teclado()                                                                                         | Función que atiende las teclas INC y DEC del teclado.                  |
| <b>void</b> Beep()                                                                                                      | Función para generar un tono cada vez que se presiona una tecla.       |
| <b>float</b> Calculo_Punto_Rocio()                                                                                      | Función que calcula la temperatura del punto de rocío.                 |
| <b>void</b> interrupt ()                                                                                                | Rutina de atención a las interrupciones                                |

### 3.11 Simulación del sistema de supervisión y control

Una vez diseñado el circuito se verificó su funcionamiento en ISIS Proteus Professional, comprobándose la precisión de la medición visualizada en el display LCD y que esta estuviera en correspondencia con el valor entregado por los sensores. Además se

comprobó el funcionamiento del control a partir del método de supervisión implementado mediante histéresis por software. A continuación se muestran imágenes del proceso de simulación:

1. Inicialización: Se muestra en la pantalla el nombre del sistema y la versión, a continuación aparece el mensaje “Cargando”, en señal de que se está inicializando el sistema.

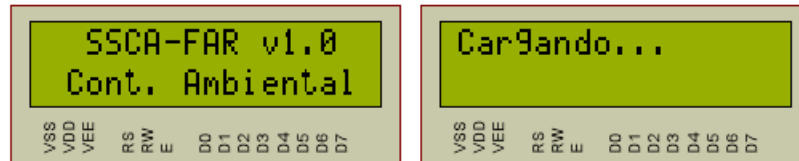


Fig. 3. Inicialización del sistema.

2. Pantalla Principal: transcurridos 5 segundos aproximadamente, el sistema muestra su pantalla principal, en la que son mostrados los valores de temperatura y humedad relativa capturados por los sensores, se muestra además la temperatura del punto de rocío que se calcula a partir de los parámetros antes mencionados. Los datos mostrados se actualizan cada un segundo aproximadamente y se controla por la interrupción del Timer 0.

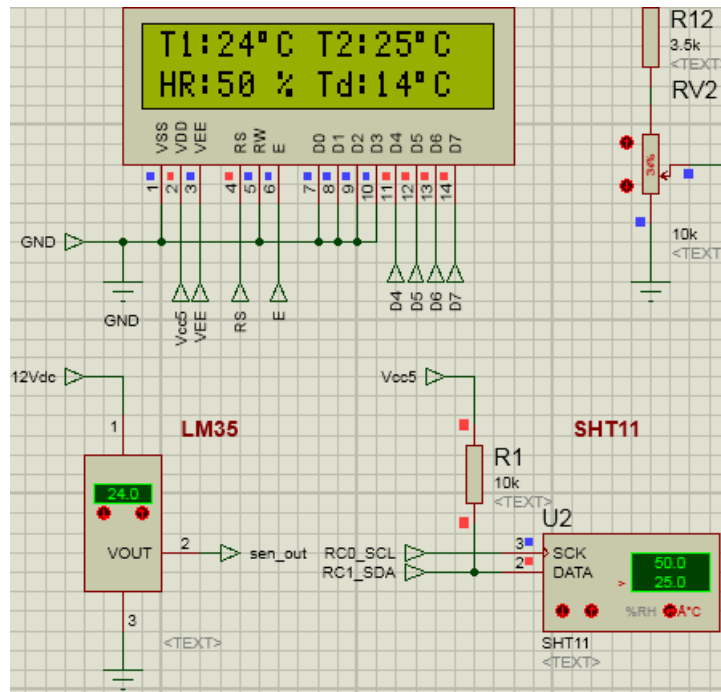


Fig. 3. Pantalla principal del sistema.

3. Menú de Configuración: Si se presiona la tecla “MENU” se puede acceder al modo de configuración de los parámetros en el cual se puede definir el rango de temperatura y humedad para realizar el control. La tecla “OK” permite el desplazamiento por las diferentes pantallas de configuración. Las teclas “INC” y “DEC” permiten incrementar o decrementar los parámetros.

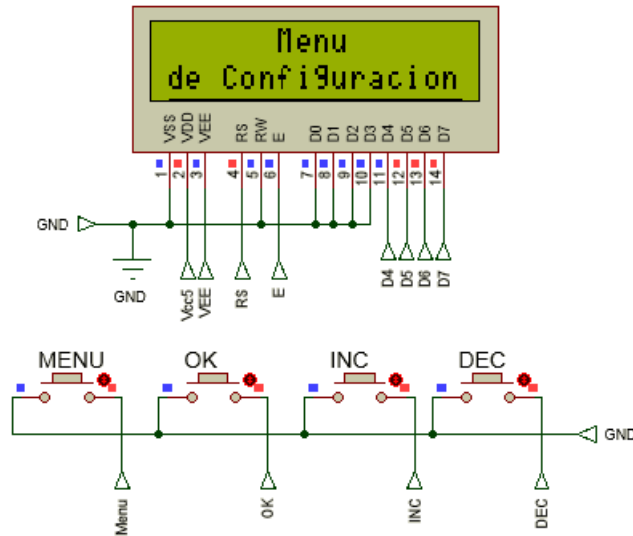


Fig. 3. Inicialización del "Menú de Configuración".

4. Configuración de Temperatura: Se define el rango de temperatura a controlar, los valores se modifican presionando “INC” y “DEC” hasta obtener el deseado.

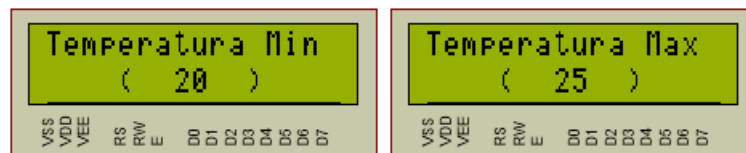


Fig. 3. Configuración de Temperatura.

5. Configuración de Humedad Relativa: Se define el rango de humedad relativa a controlar, los valores se modifican igual que en el caso anterior.

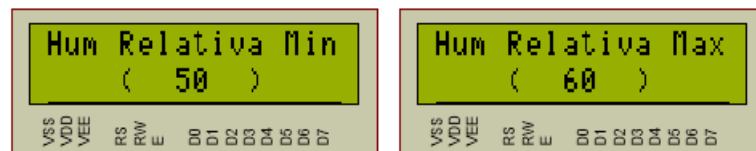


Fig. 3. Configuración de Humedad Relativa.

6. Realización del control: Cuando alguno de los parámetros llega a su valor límite se activa el control, energizándose los relevadores y magnéticos que actúan sobre los equipos de climatización.

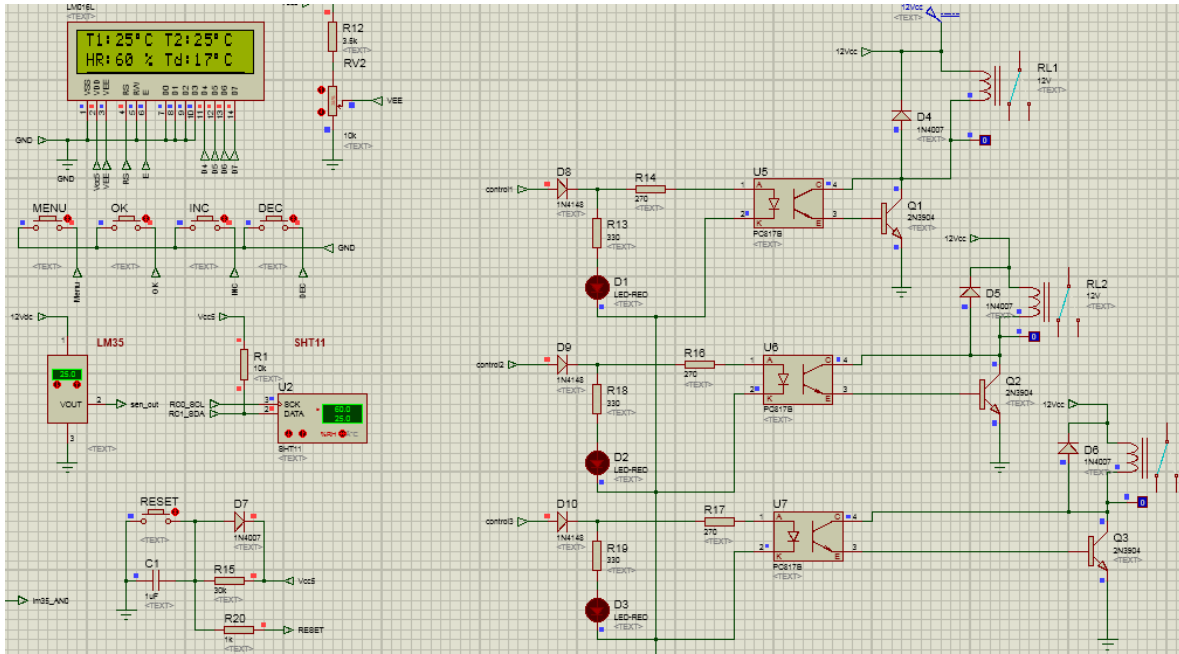


Fig. 3. Activación del control.

### 3.12 Diseño del circuito impreso.

El circuito impreso o PCB (*Printed Circuit Board*, por sus siglas en inglés) se realizó utilizando el paquete de software de simulación y diseño electrónico Proteus Professional, se utilizó el programa ISIS para el diseño del esquema eléctrico y luego se exportó al ARES, donde una vez creada la lista de nodos (Netlist), se colocaron los componentes en la ubicación deseada y se realiza el sistema de pistas o venas de forma automática.

Existen varios métodos para la fabricación de circuitos impresos, dentro de ellos podemos encontrar: la impresión serigráfica, el fotograbado, el fresado y la impresión en material termosensible. A continuación se explica un sencillo método, para obtener el circuito impreso utilizando recursos de fácil adquisición.

Para realizar la transferencia del PCB a la placa se necesita:

1. Diseño o dibujo del circuito impreso.



2. Papel: se recomienda el uso de papel satinado o cromado, que se utiliza en la impresión de revistas o catálogos, este incluso no necesariamente debe ser papel virgen sino que puede estar impreso.
3. Impresora Láser: el tóner de impresión es el que formará las pistas de circuito impreso.
4. Placa virgen.
5. Plancha: es la herramienta fundamental en el procedimiento, ya que permite transferir el circuito impreso en papel a la placa de cobre.
6. Taladro con barreno de 1mm.
7. Cloruro férrico.

Una vez que se tiene el dibujo del circuito impreso se transfiere al papel, debe tenerse en cuenta que al realizarse este procedimiento la imagen quedará invertida, por lo que debe antes de la impresión debe corregirse esto para que las pistas del PCB diseñado en la computadora no queden invertidas en la placa de cobre.

La próxima etapa del proceso es realizar la transferencia del tóner del papel a la placa, utilizando para ello el calor de la plancha, no sin antes realizar una limpieza al PCB sobre el cual se alinearé el papel con la impresión realizada con el dibujo de las pistas y se fijará con cinta adhesiva para evitar que el papel se corra durante el proceso de planchado y se estropee el circuito. Durante 5 o 10 minutos se aplica calor al papel y luego se sumerge en un recipiente con agua aproximadamente 10 minutos para retirarlo completamente del PCB quedando solamente el tóner impregnado en la placa.

El último paso es eliminar el cobre no deseado sumergiendo la placa en un recipiente con cloruro férrico, es necesario aclarar que durante este procedimiento se debe mover el recipiente para evitar que el ácido ya combinado con el cobre se deposite sobre la placa y actúe como aislante.

A continuación se muestra una vista del módulo principal del dispositivo en tres dimensiones y el circuito impreso diseñado en ARES, el resto de los módulos se incluyeron en los anexos.

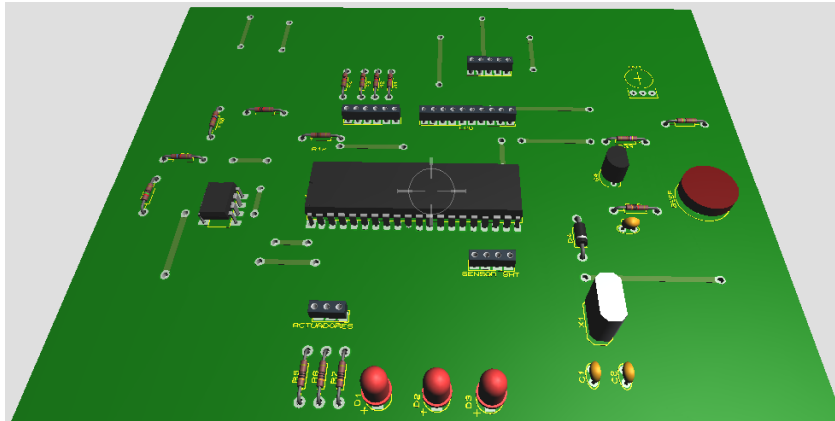


Fig. 3. Modelado 3D del módulo principal del dispositivo.

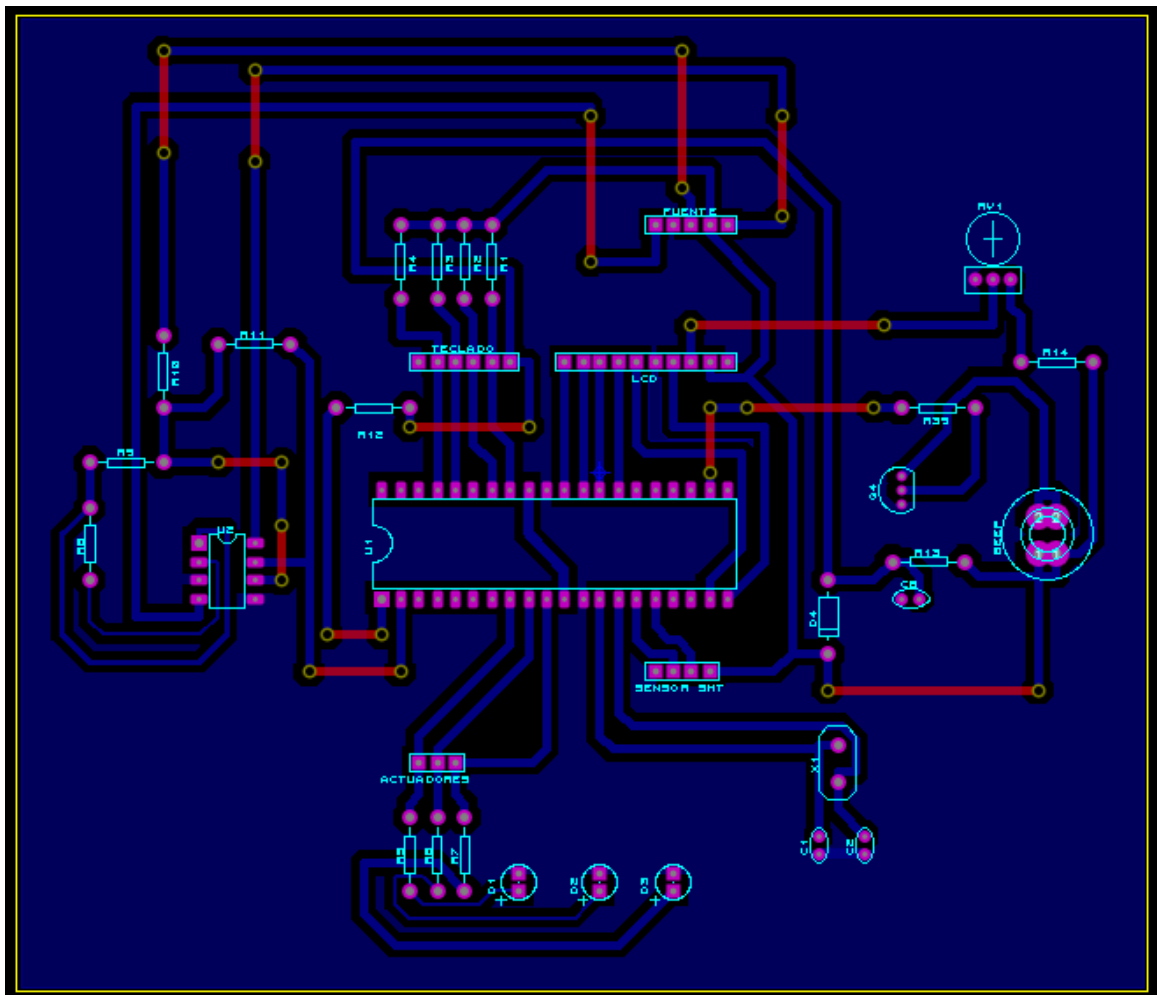


Fig. 3. Circuito impreso del módulo principal del dispositivo.

### 3.13 Valoración económica

Los supervisores comerciales existentes en el mercado internacional tienen un costo bastante elevado, según el estudio realizado en el capítulo 2 su precio oscila entre los \$93 y \$1,370 dólares. Es destacable además, que ninguno de los supervisores estudiados y otros existentes, cuenta con el módulo de control. A continuación se realiza una valoración económica de los componentes utilizados en el diseño.

Tabla 3. Precio de los componentes utilizados.

| Componente                          | Cantidad | Precio (USD) | Total |
|-------------------------------------|----------|--------------|-------|
| PIC18F4550                          | 1        | 5.36         | 5.36  |
| LCD LM016L                          | 1        | 9.50         | 9.50  |
| Sensor de temperatura LM-35         | 1        | 6.25         | 6.25  |
| Sensor de Humedad-Temperatura SHT11 | 1        | 8.36         | 8.36  |
| Interruptor Push-Button             | 5        | 1.33         | 6.65  |
| Buzzer                              | 1        | 0.70         | 0.70  |
| Diodos                              | 13       | 0.14         | 1.82  |
| Transistores                        | 6        | 0.20         | 1.20  |
| Resistores ½ W 1 %                  | 35       | 0.07         | 2.45  |
| Resistores 1 W 5 %                  | 3        | 0.16         | 0.48  |
| Condensadores electrolíticos        | 11       | 0.12         | 1.32  |
| Condensadores cerámicos             | 3        | 0.16         | 0.48  |
| Regulador de Tensión                | 5        | 0.56         | 2.80  |
| LED                                 | 3        | 0.14         | 0.42  |
| Optoacoplador PC817                 | 3        | 0.30         | 0.90  |
| TL081                               | 1        | 0.44         | 0.44  |
| TL082                               | 1        | 0.49         | 0.49  |
| TL084                               | 1        | 0.68         | 0.68  |
| Relé                                | 3        | 2.50         | 7.50  |
| Magnético                           | 3        | 3.25         | 9.75  |
| PCB 10x20 cm                        | 3        | 2.40         | 7.20  |
| Cristal de cuarzo 8 MHz             | 1        | 1.09         | 1.09  |
| Potenciómetros                      | 3        | 0.54         | 1.62  |
| Total                               | -        | -            | 77.46 |

El costo del dispositivo es aproximadamente \$ 78.00 USD, esto puede resultar variable dependiendo del proveedor, la revisión de los precios se realizó por los catálogos “*Mouser Electronics*” y “*Electronix Express*”.

Luego podemos concluir, que el dispositivo diseñado es una alternativa económicamente viable que evita tener que invertir un mayor presupuesto para la importación de los dispositivos supervisores que existen en el mercado.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Se realizó un diseño que presenta ventajas económicas, con respecto a los supervisores comerciales existentes en el mercado: es más barato e incluye el módulo de control.
2. Se implementó una librería para la comunicación del SHT11 con el microcontrolador utilizando la hoja técnica del dispositivo. El SHT11 es un sensor de humedad y temperatura de la compañía *Sensirion* que utiliza un protocolo de comunicación similar al I<sup>2</sup>C, pero no igual, ya que el dispositivo no se puede direccionar a través del bus I<sup>2</sup>C del microcontrolador.
3. Se pudo comprobar el funcionamiento del dispositivo a través de la simulación, arrojando resultados satisfactorios en la medición realizada por los sensores, la supervisión y el control.
4. Se realizó un estudio sobre el microcontrolador PIC18F4550, demostrándose su utilidad para el diseño de este tipo de aplicaciones, porque además de tener excelentes prestaciones, es un dispositivo económico y permite el desarrollo de proyectos escalables a los que se le puedan añadir otras funcionalidades.

### Recomendaciones

1. Realizar la implementación y puesta a punto del sistema, realizando las pruebas de funcionamiento correspondientes.
2. Añadirle al dispositivo comunicación con una computadora, a través de la red IP, de manera que pueda brindar información a distancia sobre las variables ambientales que se supervisan y controlan en la obra.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dirección de Ingeniería del Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias, "Manual de Control Ambiental", 2013.
- [2] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 1980.
- [3] B. C. Kuo, "Ingeniería de Control Moderna", CECSA, 1989.
- [4] M. A. Pérez García, J. C. Álvarez Anton, J. C. Campo Rodríguez, F. J. Ferrero Martín y G. J. Grillo Ortega, "Instrumentación Electrónica", Madrid: International Thomson, 2004.
- [5] V. Gomez Mejía y P. A. Cerón Torres, «Control de temperatura por medio de un autómata basado en el microcontrolador PIC16F877,» Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto, 2006.
- [6] Mikroelektronika, «[www.mikroe.com](http://www.mikroe.com),» 1998. [En línea]. Available: <http://www.mikroe.com/chapters/view/79/capitulo-1-el-mundo-de-los-microcontroladores/>. [Último acceso: 28 Octubre 2014].
- [7] F. E. Valdés Pérez y R. Pallás Areny, "Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC", Barcelona, Cataluña: MARCOMBO, Ediciones Técnicas, 2007.
- [8] J. M. Angulo Usategui y I. Angulo Martínez, "Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones. Primera parte: El PIC16F84. Lenguajes PBASIC y Ensamblador", McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.U., 2003.
- [9] J. R. Clavijo Mendoza, "Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C", Primera ed., 2001.
- [10] Sensirion Company, "*SHT1X. Humidity and Temperature Sensor Datasheet*". Version 4.3., 2010.
- [11] R. H. Sampieri, C. F. Collado y P. B. Lucio, Metodología de la Investigación, Irapuato: McGraw Hill, 2006.
- [12] D. I. Garrido Rodríguez y E. Guillán Joa, "Aplicaciones de la Electrónica", Santiago de Cuba, 2014.

- [13] National Semiconductor Corporation, "*LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor Datasheet*", 1997.
- [14] R. Maurisset Marcos, «Diseño de un sistema para la supervisión y control de las condiciones ambientales del Laboratorio de Ensayos Preclínicos del CNEA,» Santiago de Cuba, 2011.
- [15] Microchip Technology Inc., "*PIC18F2455/2550/4455/4550 Datasheet*", Chandler, Arizona: Microchip Technology Inc., 2004.
- [16] A. Palazzesi, «Construye tus propios PCB,» *Revista uControl*.
- [17] J. Suárez Rosales, «Metodología para el diseño de Sistemas de Adquisición de Datos.,» Santiago de Cuba, 2012.
- [18] E. García Breijo, "Compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores PIC", Primera ed., México D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2008.
- [19] P. M. Cuasqui Sandoval y O. I. Arias Juárez, «Implementación de un sistema electrónico automatizado de riego para cultivos de invernadero,» Quito, 2013.
- [20] R. Pallás Areny, "Adquisición y distribución de señales", Barcelona: MARCOMBO, 1993.
- [21] . J. Matas Alcalá y R. R. Ramos Lara, "Microcontroladores MCS-51 y MCS-251", Segunda ed., Ediciones UPC, 2001.

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

ADC – Conversor Analógico-Digital

CPU – Unidad Central de Procesamiento

CRC – Chequeo de Redundancia Cíclica

GIE – Habilitación de Interrupción Global

IDE – Entorno de Desarrollo Integrado

ISR – Rutina de Interrupción

PCB – Placa de Circuito Impreso

PIC – Controlador de Interfaz de Periférico

RAM – Memoria de Acceso Aleatorio

ROM – Memoria de Solo Lectura

SHT – Sensor de Humedad Temperatura

USB – Bus Serie Universal



## ANEXOS

### Anexo I Circuito impreso de los módulos del dispositivo.

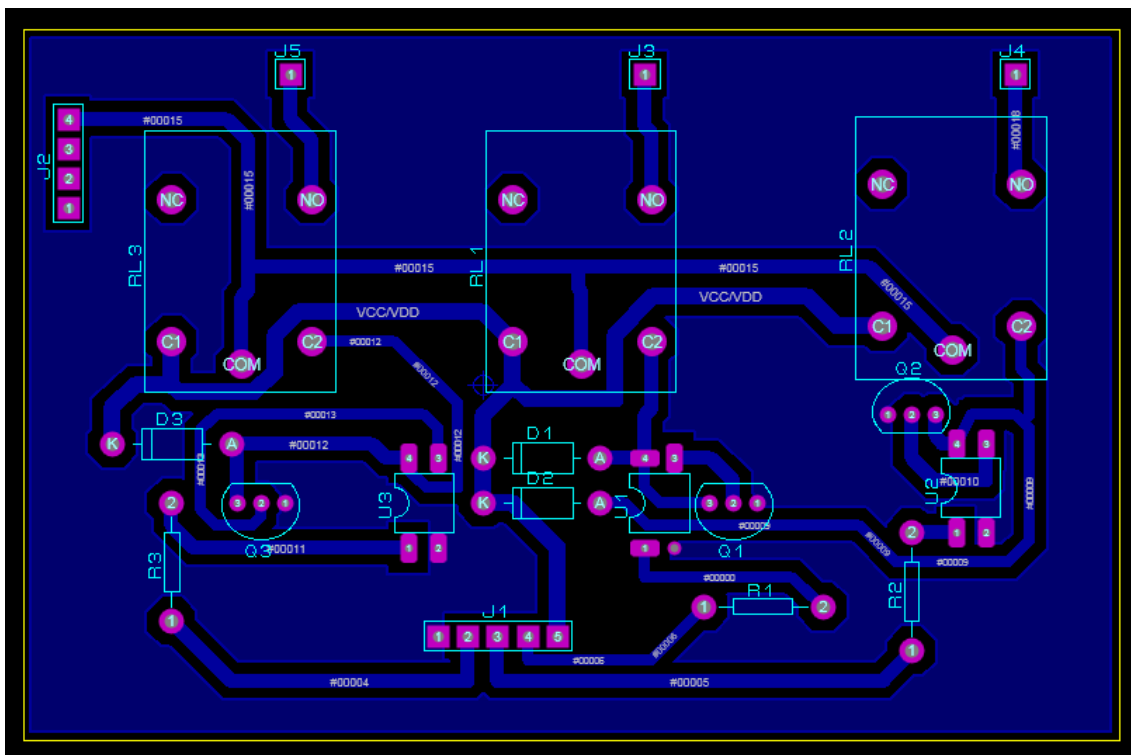


Ilustración Circuito de Actuadores

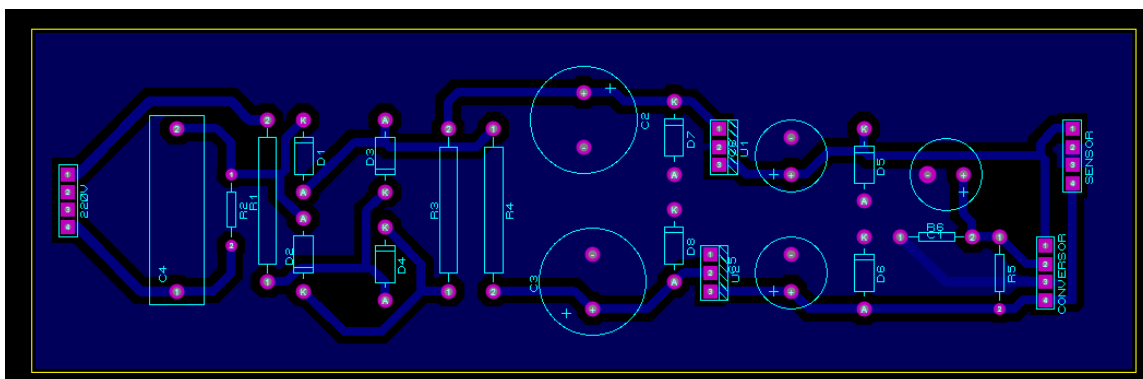


Ilustración Fuente para el sensor de temperatura y convertor de voltaje a corriente.

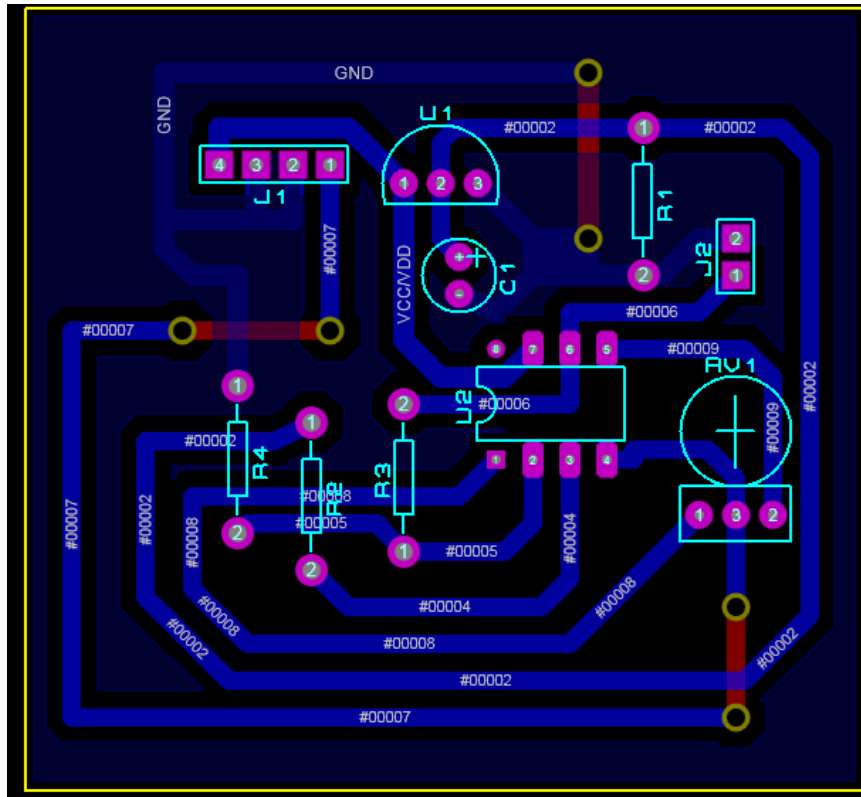


Ilustración Sensor de temperatura y acondicionador de señal.

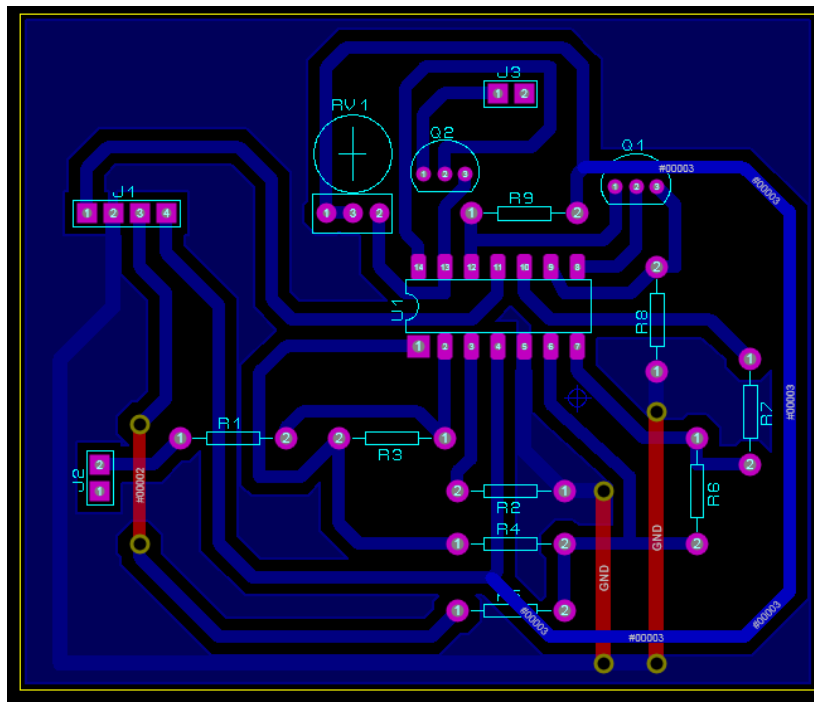


Ilustración Conversor de voltaje a corriente.

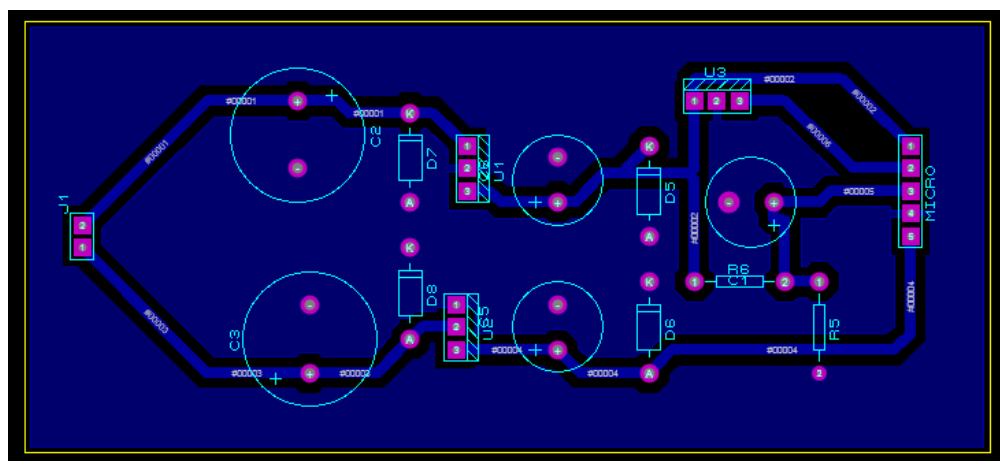


Ilustración Fuente de alimentación del dispositivo.

**Anexo II** Distribución de terminales del PIC18F4550

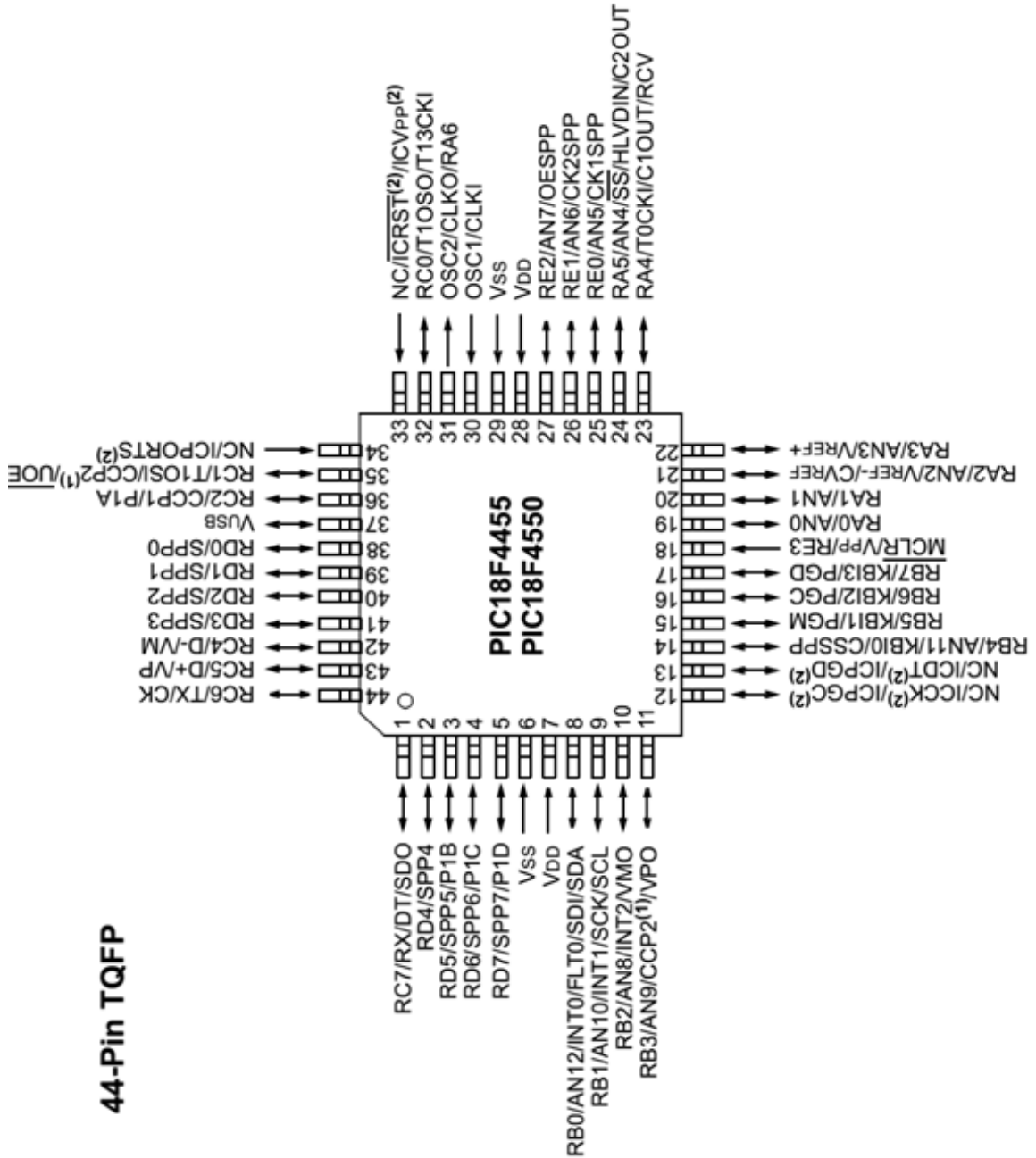


Ilustración Encapsulado TQFP de 44 terminales

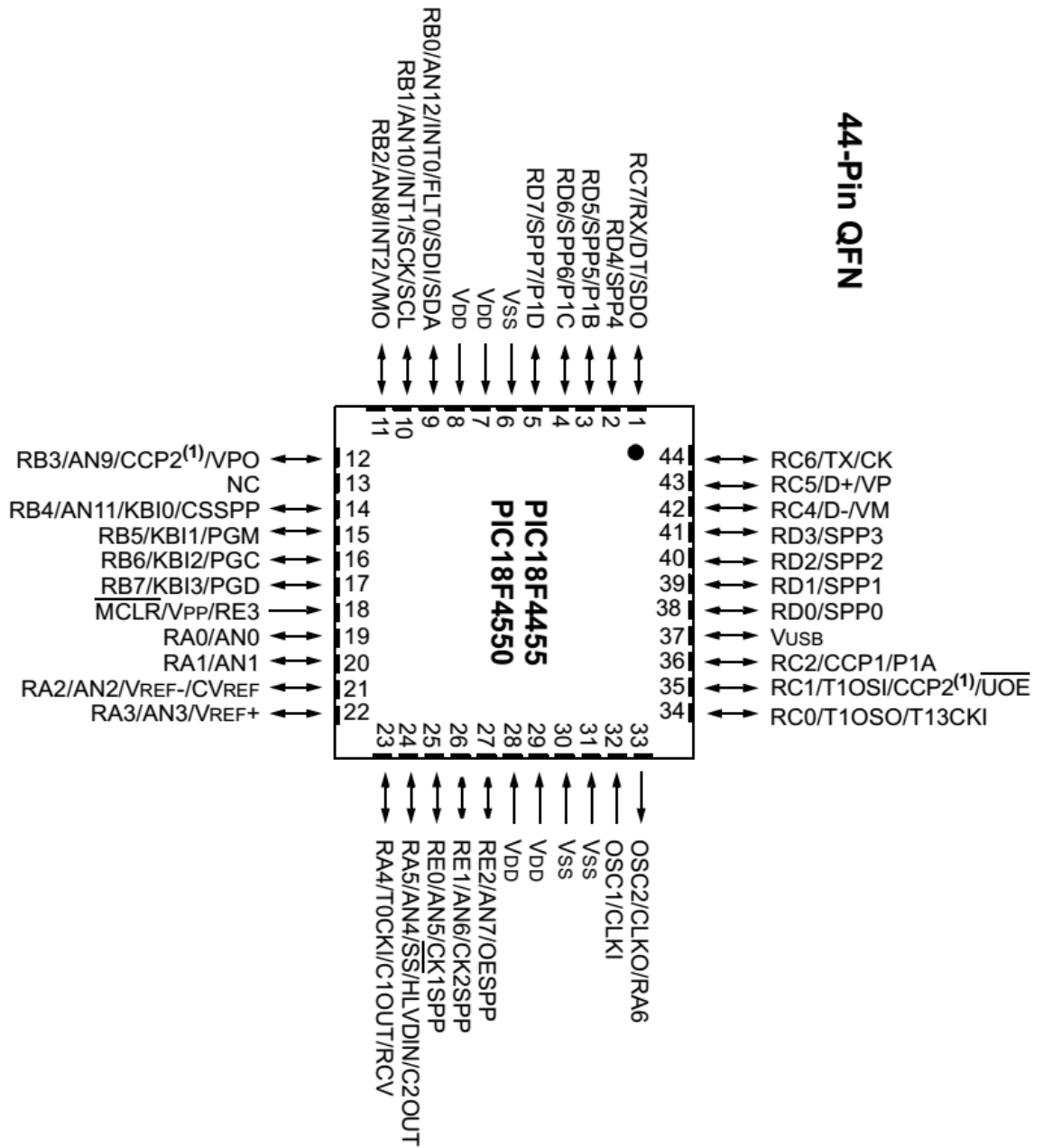


Ilustración Encapsulado QFN de 44 terminales.

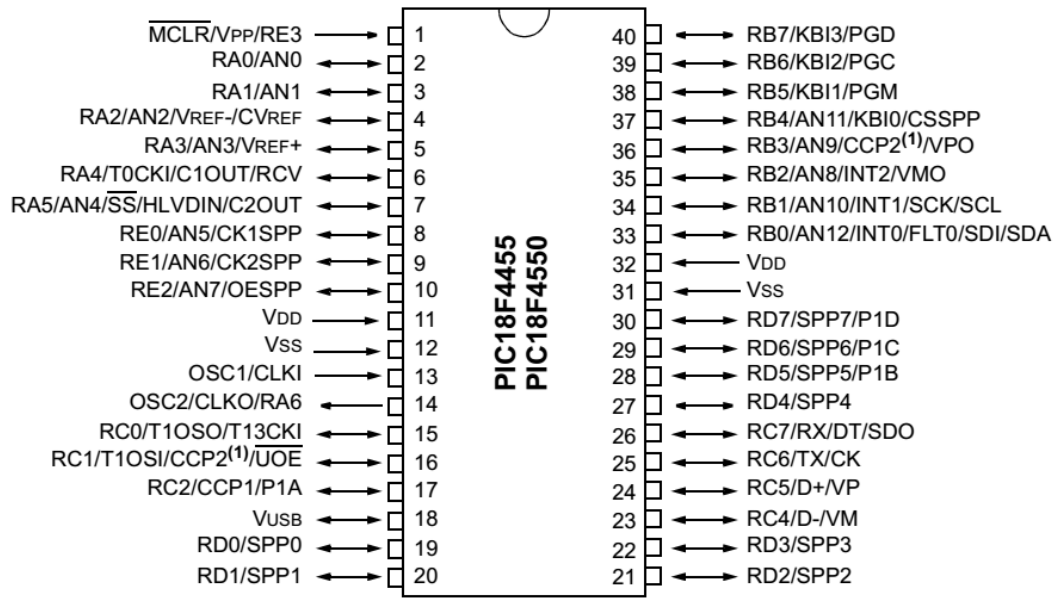


Ilustración Encapsulado PDIP de 40 terminales.

**Anexo III** Características del sensor SHT11.



*Ilustración Módulo SHT11 expendido por la compañía Mikroelektronika.*

| Parameter                     | Conditions             | min | typ  | max  | Units |
|-------------------------------|------------------------|-----|------|------|-------|
| Power supply DC <sup>10</sup> |                        | 2.4 | 3.3  | 5.5  | V     |
| Supply current                | measuring              |     | 0.55 | 1    | mA    |
|                               | average <sup>11</sup>  | 2   | 28   |      | μA    |
|                               | sleep                  |     | 0.3  | 1.5  | μA    |
| Low level output voltage      | I <sub>OL</sub> < 4 mA | 0   |      | 250  | mV    |
| High level output voltage     | R <sub>P</sub> < 25 kΩ | 90% |      | 100% | VDD   |
| Low level input voltage       | Negative going         | 0%  |      | 20%  | VDD   |
| High level input voltage      | Positive going         | 80% |      | 100% | VDD   |
| Input current on pads         |                        |     |      | 1    | μA    |
| Output current                | on                     |     |      | 4    | mA    |
|                               | Tri-stated (off)       |     | 10   | 20   | μA    |

*Ilustración Tabla de características eléctricas proporcionada por el fabricante.*

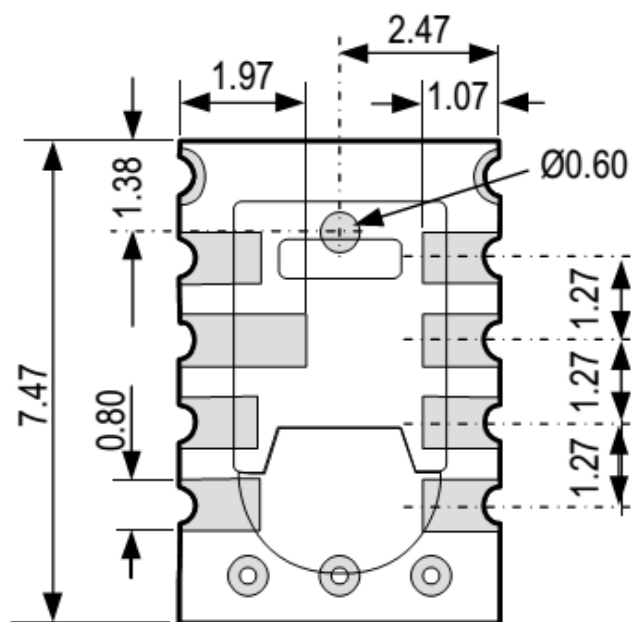


Ilustración Dimensiones físicas del dispositivo.