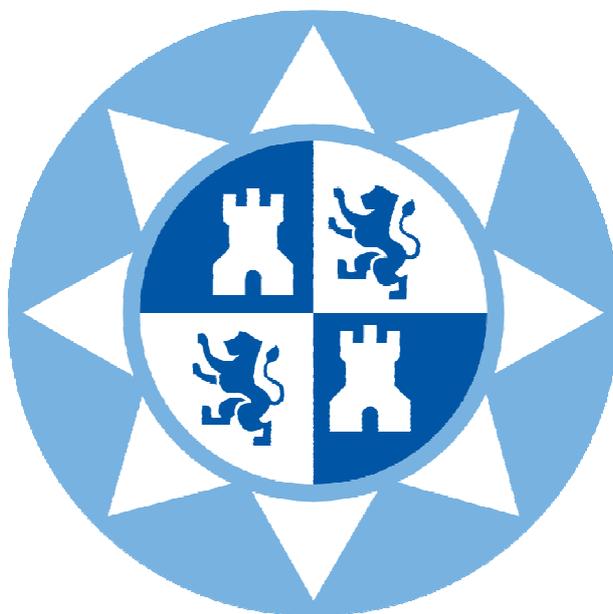


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**



Trabajo Fin de Grado

CONTROL INALÁMBRICO DE MAQUETA LEVITACIÓN



**AUTOR: David Cazorla Martínez
DIRECTOR: Juan Suardiaz Muro
Junio / 2013**

ÍNDICE

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 <i>Objetivos a seguir en el proyecto.....</i>	5
1.2 <i>Fases del proyecto.....</i>	6
2. CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LAS MAQUETAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA.....	9
2.1 <i>Levitación magnética. Historia y aplicaciones.....</i>	9
2.1.1 <i>Historia.....</i>	9
2.1.2 <i>Aplicaciones.....</i>	11
2.1.2.1 <i>Trenes de levitación magnética (maglev).....</i>	12
2.1.2.2 <i>Cojinetes magnéticos.....</i>	14
2.1.2.2.1 <i>Introducción y funcionamiento.....</i>	14
2.1.2.2.2 <i>Características diferenciadoras de los cojinetes magnéticos.....</i>	16
2.1.2.2.3 <i>El auténtico valor de un cojinete magnético.....</i>	17
2.1.2.3 <i>Telefonía móvil.....</i>	17
2.1.2.4 <i>Cohetes espaciales.....</i>	18
2.1.2.5 <i>Magnetismo en medicina.....</i>	19
2.1.2.6 <i>Frenos electromagnéticos.....</i>	19
2.1.2.7 <i>Energía eólica.....</i>	20
2.2 <i>Maquetas de levitación magnética.....</i>	21
2.2.1 <i>Maquetas comerciales.....</i>	21
2.2.2 <i>Otras maquetas.....</i>	24
3. CAPÍTULO 3. REDES DE SENSORES INALÁMBRICA.....	26
3.1 <i>Redes de sensores inalámbricas.....</i>	26
3.1.1 <i>Elementos de una red de sensores inalámbrica.....</i>	27
3.1.2 <i>Características.....</i>	27
3.1.3 <i>Requisitos para una WSN</i>	28
3.1.4 <i>Arquitectura de una WSN</i>	30
3.1.4.1 <i>Arquitectura centralizada</i>	30
3.1.4.2 <i>Arquitectura distribuida</i>	30
3.1.5 <i>Aplicaciones de las redes de sensores</i>	31
3.1.6 <i>Arquitectura de un nodo.....</i>	35
3.1.6.1 <i>Componentes de un nodo sensor wireless.....</i>	35
3.1.7 <i>Clasificación de los sensores.....</i>	38
3.2 <i>Protocolos de una WSN.....</i>	39
3.2.1 <i>WI-FI.....</i>	39
3.2.2 <i>Bluetooth.....</i>	39
3.2.3 <i>Wireless USB.....</i>	41
3.2.4 <i>IEEE 802.15.4.....</i>	42
3.2.5 <i>ZigBee.....</i>	42
3.2.6 <i>Comparativa entre las distintas tecnologías.....</i>	43

4. CAPÍTULO 4. COMPONENTES HARDWARE.....	48
4.1 Elementos principales de una maqueta de levitación magnética.....	48
4.1.1 Sensores.....	48
4.1.1.1 Características de un sensor.....	48
4.1.1.2 Sensor infrarrojo.....	49
4.1.1.3 Detector de ultrasonidos.....	52
4.1.1.4 LVDTs.....	54
4.1.1.4.1 Introducción y principio de funcionamiento.....	54
4.1.1.4.2 Características de diseño.....	56
4.1.1.4.3 Ventajas de su utilización.....	58
4.2 Electroimanes.....	60
4.2.1 Introducción y repaso histórico.....	60
4.2.2 Tipos de electroimanes.....	64
4.3 Otros modos de utilización del electromagnetismo en electroimanes.....	65
4.3.1 Relé.....	65
4.3.1.1 Descripción.....	65
4.3.1.2 Tipos de Relés.....	66
4.3.1.3 Ventajas de su utilización.....	67
4.3.2 Telégrafo.....	67
4.3.2.1 Historia.....	67
4.3.2.2 Funcionamiento.....	67
4.4 Fuente eléctrica.....	68
4.4.1 Clasificación.....	68
4.4.1.1 Fuentes ideales.....	68
4.4.1.2 Fuentes reales.....	69
4.4.2 Asociaciones de fuentes.....	69
4.4.2.1 Ideales.....	70
4.4.2.2 Reales.....	70
4.5 Nuestra fuente de intensidad.....	71
4.5.1 Operacionales.....	71
4.5.1.1 Definición.....	71
4.5.1.2 Notación.....	71
4.5.2 Características Ideales y Reales.....	72
4.5.3 Comportamiento en corriente continua (DC).....	72
4.5.3.1 Lazo abierto.....	72
4.5.3.2 Lazo cerrado o realimentado.....	73
4.5.4 Comportamiento en corriente alterna (AC).....	73
4.5.4.1 Comparador.....	74
4.5.4.2 Seguidor.....	74
4.5.4.3 Inversor.....	75
4.5.4.4 No inversor.....	76
4.5.4.5 Sumador inversor.....	76
4.5.4.6 Restador.....	77
4.5.4.7 Integrador ideal.....	77
4.5.4.8 Derivador ideal.....	78
4.5.4.9 Conversor de corriente a voltaje.....	79
4.5.4.10 Función exponencial y logarítmica.....	79
4.5.4.11 Otros.....	80
4.5.5 Aplicaciones.....	80
4.5.6 Limitaciones.....	80
4.5.7 Características tensión-frecuencia.....	81
4.5.8 Capacidades.....	82
4.5.9 Deriva térmica.....	82

4.6 Diseño de la fuente de intensidad.....	82
4.6.1 El operacional LM675.....	83
4.6.2 Rasgos característicos.....	84
5. CAPÍTULO 5. ARQUITECTURA HARDWARE DE CONTROL.....	86
5.1 Estructura y descripción.....	86
5.2 Sistema de procesamiento.....	87
5.2.1 Controlador y microcontrolador.....	87
5.2.2 Aplicaciones de los microcontroladores.....	88
5.2.3 El mercado de los microcontroladores.....	89
5.2.4 Elección del microcontrolador adecuado.....	90
5.2.5 Recursos comunes a todos los microcontroladores.....	92
5.2.5.1 Arquitectura básica.....	92
5.2.5.2 El procesador en detalle.....	94
5.2.5.2.1 Registros.....	95
5.2.5.2.2 Unidad de control.....	95
5.2.5.2.3 Buses.....	96
5.2.5.2.4 Unidad aritmética y lógica.....	96
5.2.5.2.5 Conjunto de instrucciones.....	97
5.2.5.2.6 Memoria.....	98
5.2.5.2.7 Interrupciones.....	101
5.2.5.2.8 Periféricos.....	102
5.2.6 La familia de los PIC como elección.....	105
5.2.6.1 El fabricante: Microchip Technology.....	106
5.2.6.2 El PIC.....	107
5.2.6.3 Juego de instrucciones y entorno de programación.....	107
5.2.6.4 Arquitectura central.....	108
5.2.6.5 Programación del PIC.....	109
5.2.6.6 Características de la serie PIC.....	111
5.2.6.7 Variaciones del PIC.....	111
5.2.6.7.1 Gama enana: PIC12 (F) XXX de 8 patitas.....	112
5.2.6.7.2 Gama baja o básica: PIC16C5X con instrucciones de 12 bits.....	113
5.2.6.7.3 Gama media: PIC16FXXX. Con instrucciones de 14 bits.....	115
5.2.6.7.4 Gama alta: PIC17CXXX con instrucciones de 16 bits.....	117
5.2.6.7.5 Gama mejorada: PIC18FXXX con instrucciones de 16 bits.....	118
5.2.6.8 PIC16F877 elegido el microcontrolador para el sistema de levitación.....	119
5.2.6.8.1 Características generales del PIC16F877.....	120
5.2.6.8.2 Esquema de la organización interna del PIC16F877.....	122
5.3 Conversor Analógico-Digital.....	123
5.3.1 Introducción.....	123
5.3.2 Tipos de convertidores analógico-digital.....	126
5.3.3 Conceptos de los convertidores analógico-digital.....	128
5.3.4 El conversor analógico-digital LTC 1273BCN.....	131
5.4 Conversor digital-analógico.....	132
5.4.1 Introducción.....	132
5.4.2 Tipos.....	134
5.4.3 Parámetros característicos de un convertidor DAC.....	135
5.4.4 Aplicaciones.....	137
5.4.5 Conversor digital-analógico DAC0808.....	137
5.5 Construcción de un ICSP.....	139
5.5.1 Introducción.....	139
5.5.2 Modo monitor.....	139
5.5.3 Arquitectura.....	140

5.5.3.1 Nivel físico.....	140
5.5.4 Materiales.....	143
5.6 Modulo Xbee-PRO ZNet 2.5 OEM.....	145
5.6.1 Características.....	146
5.7 Montaje del dispositivo de conexionado USB.....	148
5.7.1 Módulo USB FT232RL.....	149
5.7.2 Modulo Arduino Xbee.....	151
5.7.2.1 Configuración.....	152
6. CAPÍTULO 6. ARQUITECTURA SOFTWARE DE CONTROL.....	157
6.1 El lenguaje de programación.....	157
6.2 Pasos para programar un PIC.....	158
6.3 El software del programador PicKit2.....	159
6.4 El programa de control.....	160
6.4.1 PID digital.....	160
6.4.2 Diagrama de flujo.....	164
6.4.3 Implementación.....	165
6.4.3.1 Extremo maqueta.....	165
6.4.3.2 Extremo PC.....	169
6.5 Conexión módulo Xbee a PC.....	170
6.5.1 Software X-CTU.....	170
7. CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO Y PLANIFICACIÓN PARA EL DESARROLLO COMERCIAL.....	172
7.1 Presupuesto.....	172
7.2 Planificación para el desarrollo comercial	175
7.2.1 Tareas.....	175
7.2.2 Uso de recursos.....	179
8. CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	181
8.1 Conclusiones, problemas y éxitos.....	181
8.2 Trabajos futuros.....	182
BIBLIOGRAFÍA.....	183

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo de introducción del proyecto se expondrán en un primer lugar los objetivos del proyecto, se explicará con detalle lo que se pretende desarrollar así como el porqué.

En un segundo lugar se explicará las fases que se seguirán para el desarrollo del proyecto explicando de una manera clara y concisa los distintos aspectos que serán objetivo de estudio en cada capítulo.

1.1 Objetivos a seguir en el proyecto.

El proyecto que se pretende desarrollar no tiene como objetivo la construcción de la maqueta de levitación magnética, pues al principio del proyecto, esta ya estaba finalizada, sino la mejora de la misma con la construcción de un circuito programador ICSP de PICs para dar al sistema mayor flexibilidad al poder ser extendido a cualquier microcontrolador de la familia PIC. El proyecto inicial venia enfocado a la utilización del PIC 16F877 y puesto que al final se optó por utilizar ese mismo PIC , ahora se tiene una mayor variedad de utilización de otro PICS de una forma sencilla, siempre y cuando el PIC utilizado cumpla las mínimas exigencias ,de las que se hablará más adelante, para el buen funcionamiento del sistema.

Otro objetivo es el diseño de una fuente de intensidad para darle independencia al sistema. Con la anterior versión de la maqueta se utilizaba una fuente de intensidad del propio laboratorio por lo que se pensó que ese podría ser un aspecto a mejorar. No se implementará de manera física pero si se tiene la noción y el diseño a utilizar para la construcción de la misma. Este será un aspecto a mejorar en futuras revisiones del proyecto.

Uno de los mayores cambios en esta revisión es la implementación mediante el protocolo Zigbee de una comunicación inalámbrica. Se ha tenido en cuenta las distintas tecnologías presentes en el mercado y se ha hecho un estudio de ventajas y desventajas de las mismas. Al final se ha optado por el protocolo Zigbee puesto que por las necesidades del proyecto encaja a la perfección. Se ha cambiado la arquitectura del proyecto dividiéndolo en dos partes bien diferenciadas. Un extremo maqueta con la maqueta de levitación magnética, la fuente de alimentación, fuente de intensidad y el PIC. Por otro lado se tiene un PC donde con un sencillo programa calcula la función del PID y envía los datos al extremo maqueta utilizando en todo momento los módulo Xbee.

Por todo lo demás el proyecto es idéntico al que se tenía entre manos, se tendrá que volver a construir la placa de control para el PIC, se profundizará aún más en el

conocimiento del mundo de los microcontroladores y del fenómeno del electromagnetismo, así como de operacionales, de fuentes eléctricas y de los convertidores de la señal de digital a analógico, analógico a digital, redes de sensores.

En cuanto a la parte del software se opta en primer lugar por la programación en lenguaje ensamblador por ser el más óptimo, pero por motivos de pesadez y de la necesidad que tener un conocimiento muy profundo de la arquitectura interna del propio PIC, se optará por la utilización de un pseudocódigo en lenguaje de alto nivel como C, el mismo que se utilizó en la anterior versión del proyecto pero haciendo los cambios pertinentes para la implementación de la comunicación inalámbrica de los módulos XBee.

1.2 Fases del proyecto.

La elaboración del presente proyecto se ha previsto que se elabore en las siguientes fases, que se han plasmado en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2. Estado del arte de las maquetas de levitación magnética.**

En este capítulo se realizará un estudio sobre los aspectos más significativos que engloba el universo de la levitación magnética. Se analizará en general la levitación magnética, prestando especial atención a aquellas aplicaciones que la levitación magnética tiene a día de hoy, así como aquellas que se están desarrollando o se pretenden desarrollar a corto o medio plazo. Después se estudiarán las maquetas de levitación magnética, analizándose en profundidad los elementos que forman parte de ellas y particularmente aquellos utilizados en la maqueta que se tiene construida. Como parte última del estudio, se analizarán los distintos tipos de maquetas comerciales ya desarrolladas, así como otros diseños propuestos por otros alumnos e investigadores de otros centros de estudio e investigación.

- **Capítulo 3. Redes de sensores inalámbricas.**

En este capítulo se abordará el estudio de las redes de sensores inalámbricas. En la primera parte se estudiará todos y cada uno de los distintos elementos que conforman una red de sensores, así como las distintas arquitecturas y aplicaciones. Se estudiará en profundidad los componentes de un nodo sensor. En la segunda parte se estudiará los distintos protocolos existentes de una red de sensores tales como el “Wifi”, “Bluetooth”, “Wireless” etc. se hará un estudio comparativo y se verá que por las características del proyecto se optará por la utilización del protocolo “ZigBee”.

- **Capítulo 4. Componentes hardware.**

En este capítulo se hablará de los distintos elementos que componen una maqueta de levitación magnética así como las características de cada uno. En la segunda parte del capítulo se hará un estudio de las fuentes eléctricas detallando los tipos de fuentes y las características principales de cada una de ellas. Por último se hará un estudio de los distintos operacionales y especialmente del operacional LM675 que forma parte del diseño de la fuente de alimentación.

- **Capítulo 5. Arquitectura hardware de control.**

En el presente capítulo se abordará la arquitectura hardware encargada del control de la maqueta y del cálculo de la altura de la bola así como la comunicación entre la maqueta y el PC. Comenzando a describir la estructura de modo general y su funcionamiento así como aquellos elementos que la forman. Posteriormente se irán describiendo en profundidad cada uno de estos elementos, con sus características y utilidades. Se realizará un estudio general sobre cada uno de ellos, para a continuación justificar el uso de cada uno de los modelos concretos elegidos de entre la variedad que el mercado ofrece, se hablará de la construcción de un ICSP para la programación de nuestro PIC, dotando al proyecto de mayor flexibilidad con respecto al original así como el estudio del módulo Xbee en la comunicación inalámbrica.

- **Capítulo 6. Arquitectura software de control.**

Este capítulo se centrará en el programa de control que regirá el comportamiento del microcontrolador para conseguir que el sistema funcione de la forma pensada. En primer lugar, se hablará del lenguaje de programación que se va a utilizar para la implementación del programa de control en el PIC. Se hablará de varios tipos de lenguajes de programación analizando sus ventajas e inconvenientes haciendo que se decante por uno. A continuación, y ya dentro de lo que respecta al programa de control en sí, se obtendrá la expresión en tiempo discreto del PID que será calculado por un PC de manera remota en vez de ser calculado por el propio PIC como en la versión anterior del proyecto. Posteriormente, se elaborará un diagrama de flujo de los extremos maqueta y PC que ayudará a la implementación y finalmente se mostrará el programa de control explicado al detalle en forma de pseudocódigo ya que por causas externas al proyecto no se ha podido implementarlo y hacer las pruebas necesarias.

- **Capítulo 7. Presupuesto y planificación para el desarrollo comercial.**

En este último capítulo se tratará en un primer lugar de dar un presupuesto de los materiales utilizados en la implementación del ICSP, de la fuente de intensidad así como de los módulos Xbee, detallando importes y unidades utilizadas. En la segunda parte del capítulo se presentará mediante la utilización del programa que proporciona Microsoft Office Project una simulación del desarrollo del proyecto con los eventos más importantes y planificados bajo unos tiempos de simulación acordes al desarrollo del proyecto, así como un análisis no muy extenso sobre la carga de tareas sobre el director y el autor del presente proyecto.

- **Capítulo 8. Conclusiones y trabajos futuros.**

En este capítulo se expondrán las conclusiones que el autor del proyecto ha sacado desde los problemas surgidos así como los beneficios y conocimientos adquiridos a lo largo del desarrollo. En la segunda parte del capítulo se hace alusión a las mejoras que se puedan llevar en trabajos futuros y que puedan servir de ayuda para futuros alumnos que quieran adentrarse en el fascinante mundo de la levitación magnética.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE LAS MAQUETAS DE LEVITACION MAGNETICA

En este segundo capítulo se va a tratar el estado del arte de la levitación magnética en nuestros días. Se realizará un estudio más o menos exhaustivo sobre los aspectos más importantes que engloban al mundo de la levitación magnética.

Nuestro estudio se dividirá en tres partes. En una primera, se abordará en general la levitación magnética con especial hincapié en las distintas aplicaciones que tiene en la actualidad así como aquellas que se desarrollan o se pretenden desarrollar, a corto y medio plazo.

En la segunda parte del capítulo, se estudiarán las maquetas de levitación magnética presentes en el mercado, cuya mejora con la construcción de la fuente de alimentación, un ICSP y un control inalámbrico son objeto de este proyecto. Se empezará por hablar un poco de la historia del magnetismo y sus aplicaciones a día de hoy, desde los más conocidos trenes de levitación magnética pasando por la telefonía móvil hasta acabar en futuros proyectos donde el magnetismo plantea una buena oportunidad de futuro. En la segunda parte se analizarán los distintos tipos de maquetas comerciales ya desarrolladas, así como otros diseños propuestos por otros alumnos, investigadores, etc., que se han interesado por este tema.

2.1 Levitación magnética. Historia y aplicaciones.

La levitación magnética constituye un valor en alza, siendo múltiples sus aplicaciones, usos y utilidades en sectores tales como la industria, el comercio, el transporte, la medicina o el entretenimiento. Desde que los griegos descubrieron los imanes hasta la consecución de la levitación de un tren en Japón han pasado siglos en los que investigadores de variadas disciplinas han compartido una curiosidad común: la magia que rodea al magnetismo, esa fuerza invisible que hace que un elemento se suspenda en el aire. A juzgar por los últimos avances en esta materia la sociedad actual se halla frente a la punta del iceberg de lo que puede convertirse en una tecnología que podría llegar a ser más común de lo que se piensa.

2.1.1 Historia.

El ser humano y su afán de explicar los fenómenos de la naturaleza, buscar un porqué a ese hecho hicieron que el magnetismo no pasara desapercibido y llamó poderosamente la atención de los seres humanos desde la Antigüedad, sobre todo tras el descubrimiento de las primeras piedras magnéticas.

Los fenómenos magnéticos fueron conocidos ya desde siglos, los primeros fueron los antiguos griegos. Se dice que por primera vez se observaron en la ciudad de Magnesia del Meandro en Asia Menor, de ahí el término magnetismo.



Figura 2.1: Región de Magnesia de Meandro (Grecia).

Se sabía que ciertas piedras atraían el hierro, y que los trocitos de hierro atraídos atraían a su vez a otros con una fuerza invisible. Estas se denominaron imanes naturales.

Tenemos que citar a Tales de Mileto (625 – 546 a.C.) [1] que fue el primer filósofo griego que realizó estudios en torno a las propiedades del imán.

En China, la primera referencia a este fenómeno se encuentra en un manuscrito del siglo IV a. C. titulado Libro del amo del valle del diablo del que se extrae la siguiente frase:

«La magnetita atrae al hierro hacia sí o es atraída por éste».

La primera mención sobre la atracción de una aguja aparece en un trabajo realizado entre los años 20 y 100 de nuestra era: «La magnetita atrae a la aguja».

También de este fenómeno se hizo eco el filósofo Platón (siglo IV a.C.) [2] que aventuró que su propiedad puede transmitirse al hierro.

Sin duda, la gran aplicación práctica de la piedra magnética fue la imantación de barras metálicas a partir de las cuales se construyeron las brújulas.

En el siglo X, navegantes chinos y europeos emplearon brújulas magnéticas como el científico Shen Kua (1031-1095) que escribió sobre la brújula de aguja magnética y mejoró la precisión en la navegación empleando el concepto astronómico del norte absoluto.

Hacia el siglo XII el imperio chino ya había desarrollado la técnica lo suficiente como para utilizar la brújula para mejorar la navegación. Alexander Neckham fue el primer europeo en conseguir desarrollar esta técnica en 1187.

El primer estudio científico sobre la magnetita lo realizó Pierre Pelerin de Malicourt (siglo XIII) que definió los polos magnéticos y las leyes de la atracción y la repulsión. Posteriormente, William Gilbert en su obra *De magnete* (1600) describió las propiedades de los imanes y fue el primero en considerar que la Tierra era un gigantesco imán. Este punto de vista estableció una base racional para comprender el movimiento de la aguja de la brújula y su atracción hacia los polos Norte y Sur, un aspecto crítico en el avance de la navegación.

En 1750, el británico John Michell inventó una balanza que utilizó para estudiar las fuerzas magnéticas. Que le permitió medir el efecto llamado «fuerza de gravedad» que aplicaría en objetos situados en el laboratorio. Michell creó el concepto «estrella oscura» (versión newtoniana del agujero negro), en una carta que, en el año 1784 dirigió a Henry Cavendish. La idea de Michell devino de la elucubración filo-matemático de la velocidad de escape, que en la Tierra es

aproximadamente de unos 40.000 km/h. En base a ello, imaginó una estrella más y más densa y pesada, de que llegara un momento en que la “velocidad de escape” fuese igual a la velocidad de la luz. Y si la estrella fuese aún más pesada y densa, entonces un objeto no podría escapar ni siquiera moviéndose a la “velocidad de la luz “como ocurriría en teoría en los agujeros negros.

En 1831 el científico británico Michael Faraday (1791-1867) [3] hizo otro descubrimiento trascendental: que el movimiento de un imán en las proximidades de un cable induce en éste una corriente eléctrica; este efecto era inverso al hallado por Oersted. Ambos descubrimientos están relacionados con el motor eléctrico y los generadores de corrientes, de ahí su importancia para la vida moderna. Oersted, por su parte, demostró que una corriente eléctrica crea un campo magnético mientras que Faraday demostró que puede emplearse un campo magnético para crear una corriente eléctrica (principio de inducción de la corriente eléctrica).

El teléfono y el telégrafo, alrededor de 1880, eran aparatos activados por baterías y basados en el descubrimiento de Oersted. Las grandes aplicaciones a la ingeniería de la inducción electromagnética son el motor eléctrico y la dínamo. El mismo Henry, codescubridor de la inducción electromagnética construyó un motor en 1831 y Edison inventó un generador bipolar en 1878, un año antes de inventar el uso de luz eléctrica. Asimismo, aparatos como la radio y la televisión utilizan muchos de los conocimientos relacionados con el electromagnetismo.

En el año 1922 el ingeniero alemán Hermann Kemper contempló la idea de un tren levitado magnéticamente obteniendo la patente 12 años más tarde, pero la tecnología de su época no le permitía cumplir con su sueño. Fue el paso del tiempo y de la tecnología la que hizo que el sueño de Kemper se hiciera realidad en el año 1962 en Japón y 1969 en Alemania, cuando se inició el desarrollo tecnológico de este tipo de sistemas. Ambos países iniciaron una carrera a la hora de investigar, apoyar y contribuir al desarrollo de los MSTS (Magnetically Suspended Transportation System o más simplemente MAGLEV). [4]

A lo largo de la historia de la Humanidad el fenómeno magnético ha tenido una presencia innegable. Desde fenómenos naturales como las tormentas magnéticas, la aurora boreal en los polos o el campo magnético terrestre hasta objetos presentes en la vida cotidiana como la televisión, el teléfono, la grabadora, el timbre o los detectores de metales. De hecho, el campo magnético terrestre condiciona a ciertos animales y plantas como el musgo, que siempre crece orientados hacia el norte, o como es el caso, de las rayas o las palomas mensajeras. Así lo afirma el doctor Frank Brown de la Universidad de Northestern tras más de 20 años de investigaciones. La cirugía también se ha visto beneficiada de esta propiedad de la Naturaleza. Por ejemplo en los hospitales pueden utilizar un electroimán para extraer una esquirla de un ojo.

En resumen, el magnetismo es un fenómeno que constituyó un misterio para los antiguos e intrigó a genios como Albert Einstein y que aún hoy sigue maravillando tanto a los investigadores como al público en general.

2.1.2 Aplicaciones.

A continuación se describirán algunas de las aplicaciones actuales y futuribles de la levitación magnética si bien no todas están pues está presente en nuestros días más de lo que se piensa y cada día más, pues su aplicación tanto en campos en lo que ya efectuado su incursión para el aporte de mejoras y novedades, como en campos en los que todavía no había sido aplicada. Por ello se van a citar y describir brevemente algunas de ellas, teniendo en cuenta factores como su utilidad e importancia para el ser humano.

2.1.2.1 Trenes de levitación magnética (MAGLEV).

Una de las aplicaciones más conocidas y desarrolladas de la levitación magnética es su uso en el sector de los trenes, dando lugar a lo que se conoce como tren de levitación magnética o también denominado “MAGLEV” . Se trata de un tren suspendido en el aire por encima de una vía siendo propulsado hacia adelante por medio de las fuerzas repulsivas y atractivas del magnetismo mediante el uso de una serie de imanes colocados estratégicamente. Este estado de suspensión limita el rozamiento del convoy, permitiendo a este sistema ferroviario alcanzar velocidades casi imposibles de conseguir en un ferrocarril convencional. Tiene un potencial de velocidad como los turbohélice y las aeronave jet (900 km/h).

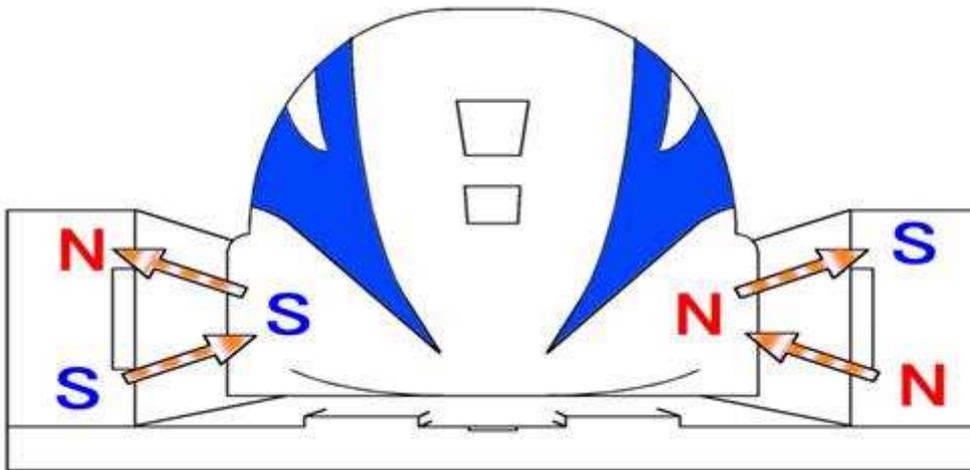


Figura 2.2: Tren MAGLEV dónde se aprecia cómo se genera el campo magnético que impulsa el tren hacia delante.

El record de velocidad lo tiene Japón y es de 581 km/h registrado en el año 2003, pero se han conseguido en prototipos velocidades de hasta 600 km/h. Así por tanto, este método tiene el potencial de ser rápido y tranquilo en comparación con los trenes clásicos de ruedas y en general con los sistemas de transporte masivos de ruedas. Esta tecnología lleva muchos años en desarrollo, pero el alto coste de este tipo de infraestructuras ha limitado su implantación.



Figura 2.3: Tren MAGLEV que une la estación de Longyang Road Pudong en Shanghai hasta el Aeropuerto Internacional de Pudong y tarda 7 minutos y 20 segundos para completar el viaje de 32 kilómetros.

En la actualidad existen 3 tipos de tecnología de levitación magnética:

Suspensión electromagnética (EMS):

Permite altas velocidades y genera campos magnéticos poco peligrosos. Tiene un alto coste de producción y explotación por lo que la hace poco rentable.

Suspensión electrodinámica (EDS):

Permite altas velocidades y altas cargas de peso. Utiliza superconductores de alta temperatura HTS que deben ser refrigerados con nitrógeno. Los campos magnéticos generados son altamente perceptibles dentro y fuera del tren, lo cual imposibilita su uso a personas con marcapasos. Debe dotarse con ruedas para los trayectos en los que se mueve a poca velocidad. El coste por kilómetro es gigantesco.

Suspensión con imanes permanentes (Inductrack):

Se trata de un sistema con menores costes de explotación debido a que no necesita corriente para proveer la levitación. El campo magnético permanente garantiza la suspensión en caso de fallo eléctrico. Los trenes deben dotarse de ruedas para proveer la propulsión.

El primer sistema comercial de trenes MAGLEV existente en el mundo se está desarrollando por la compañía alemana Transrapid International, una joint-venture* de los grupos industriales Siemens y Thyssenkrupp.

***Nota: joint venture** es un tipo de acuerdo comercial de inversión conjunta a largo plazo entre dos o más personas

De momento su producto tan solo ha sido instalado en Shanghai, en la línea que une el centro

financiero de la ciudad con su aeropuerto internacional. Shanghai MAGLEV Train está en funcionamiento desde el 2007, tardando 7 minutos 20 segundos en recorrer los 30 kilómetros a una velocidad máxima de 431 km/h y una media de 250 km/h.

Japón es junto a Alemania el país más activo en cuanto a investigación y desarrollo de esta tecnología. La compañía Japan Railway desarrolla desde hace unos años el proyecto JR-MAGLEV. Este sistema, al igual que Transrapid, utiliza tecnología EMS. Las pruebas de este sistema se lleva a cabo en la línea experimental Yamanashi, donde se ha logrado la mayor velocidad alcanzada por un tren MAGLEV hasta el momento, 581 km/h (diciembre de 2003).

En cuanto a España se refiere, en junio de 2007 los medios de comunicación españoles se hicieron eco de la intención de la Comunidad de Madrid de realizar un par de líneas de levitación magnética, en concreto una para la unión del aeropuerto de Barajas con la zona oeste de la ciudad y otra línea que recorra el corredor de Henares, desde Alcalá a Chamartín en pocos minutos. También en Asturias, un colectivo de ingenieros de caminos ha propuesto un tren de levitación magnética entre el centro de la región y el aeropuerto y otro proyecto en la ciudad manchega de Guadalajara.

2.1.2.2 Cojinetes magnéticos.

2.1.2.2.1 Introducción y funcionamiento.

Lo primero de todo explicar en qué consiste un cojinete magnético, un tipo de rodamiento que utiliza una fuerza magnética para apoyar partes de máquinas, sin tener contacto real con la parte de sí mismo mientras la máquina esté encendida. La fuerza magnética es lo suficientemente fuerte que se levanta la pequeña pieza de la máquina y permite que se mueva mientras se está suspendido en el aire. Esto elimina la fricción entre la pieza y la máquina misma.

Cuando un rodamiento cuenta con un controlador capaz de posicionar un eje que gira a velocidades extremadamente altas (0-100,000 rpm) en micras de movimiento y compensar las vibraciones mecánicas inherentes en los equipos dinámicos. Cuando un cojinete funciona sin lubricante y a pesar de esto no produce partículas de desgaste, eso es limpio. Y cuando el sistema integrado de acondicionamiento del cojinete elimina la necesidad de un mantenimiento rutinario, eso es un buen rendimiento. No es extraño entonces que los cojinetes magnéticos estén atrayendo la atención de ingenieros con problemas mecánicos de una amplia variedad de industrias.

Por supuesto que la idea de levitación magnética, la idea principal en la que se basan los cojinetes magnéticos, no es algo nuevo. Desde 1800 se están realizando experimentos. Pero aparecieron problemas que paralizó cualquier tipo de desarrollo hacia un cojinete magnético que funcionase, el problema principal fue la necesidad de sistemas sensoriales y de control que superaban la tecnología de aquel entonces.

La estructura interna del cojinete de levitación incluye dos bobinas electromagnéticas como las vistas en la figura 2.5 para el posicionamiento radial del eje, un grupo adicional de bobinas es el responsable de producir el campo magnético que mantiene la posición axial del eje. Un esquema de la distribución de los elementos del cojinete de levitación puede verse en la figura 2.4.

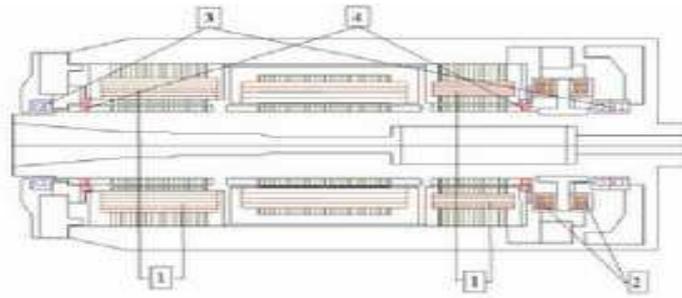


Figura. 2.4: Esquema del cojinete de levitación.

Elementos:

Cojinetes de levitación radial.

Cojinetes de levitación axial.

Cojinetes auxiliares lubricados en seco.

Transductores de posición.

El campo magnético generado por las bobinas de los cojinetes debe actuar solo sobre la superficie del eje en rotación, esta superficie debe poseer características particulares. Esta superficie debe tener una permeabilidad tal que los campos magnéticos generados por las bobinas no atraviesen la sección del eje, solo deben actuar sobre la superficie y de manera local en las adyacencias del campo formado por la bobina y la superficie, su efecto de magnetización debe desaparecer instantáneamente. Los campos magnéticos no deben ser tan grandes que produzcan alteraciones sobre los campos generados en las adyacencias, pero deben tener potencias bastante altas por lo que se presume que el diseño permite una extrema concentración de las líneas de fuerza en un área muy pequeña.

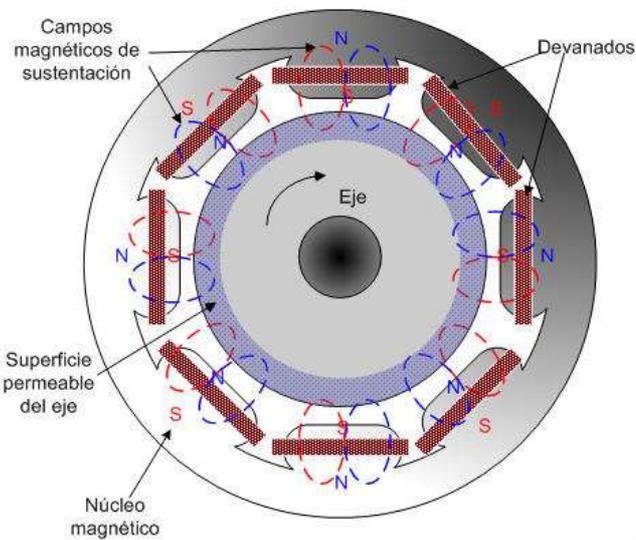


Figura 2.5: Esquema del cojinete de sustentación radial.

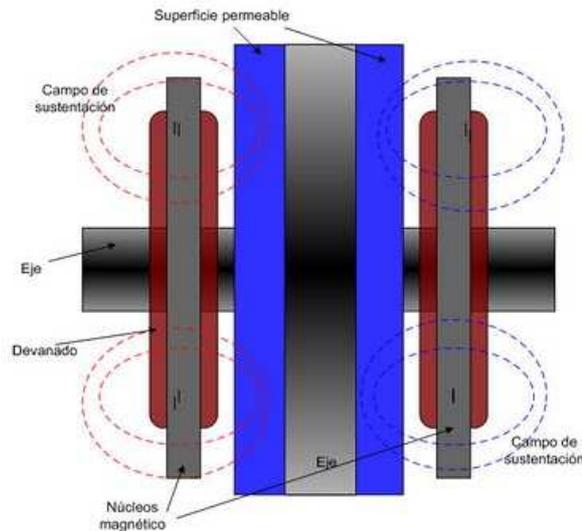


Figura 2.6: Esquema del cojinete de sustentación axial.

Las figuras 2.5 y 2.6 muestran un esquema del fenómeno hipotéticamente descrito para los cojinetes radiales y axiales respectivamente.

Las corrientes de cada bobina del núcleo son manejadas de forma independiente por el sistema de control que está asociado a un sistema de potencia, de esta manera producir campos magnéticos que actúan sobre la superficie del eje, generando las fuerzas correctivas de la posición del mismo en los 360° de los cojinetes, contrarrestando los efectos de la fuerza gravitacional terrestre y los posibles movimientos producidos por la rotación y desbalanceo. Por ejemplo los cojinetes de levitación empleados en las maquinas fresadoras, permiten generar fuerzas dinámicas que minimizan los efectos de las fuerzas laterales producidas por las herramientas de mecanizado.

2.1.2.2 Características diferenciadoras de los cojinetes magnéticos.

Los cojinetes magnéticos al funcionar sin lubricante, los hace especialmente apropiados para máquinas que funcionan en entornos de vacío, con altas o bajas temperaturas, o con agentes corrosivos. De hecho, cualquier máquina o proceso, que no tolere la contaminación de los lubricantes o las partículas de desgaste supone un objetivo para los cojinetes magnéticos. Dos ejemplos típicos son la industria de los equipos para semiconductores y las compañías de alimentación y bebidas. Una operación libre de lubricación significa que ya no se requieren los equipos relacionados con la lubricación, como las bombas y los filtros. Esto supone una reducción considerable de los costes totales de propiedad.

Otra característica de los cojinetes magnéticos es la baja pérdida de rotación del eje. Esto permite reducir la potencia del motor y lograr mayores eficiencias. Una baja pérdida, significa que las temperaturas de funcionamiento son generalmente más bajas que con otros rodamientos, como los de elementos rodantes o los cojinetes hidrodinámicos. Esto reduce la necesidad de utilizar equipos de refrigeración.

Los cojinetes magnéticos funcionan con un intersticio de aire controlado, que incluso puede ser una ventaja. En algunos procesos se requiere que un líquido o material pase por el cojinete. El intersticio de aire hace que esto sea posible. Las aplicaciones biológicas y farmacéuticas relacionadas con el procesamiento de células son sólo dos ejemplos. También es posible obturar herméticamente a los cojinetes magnéticos, lo que los hace atractivos para los procesos que manejen fluidos corrosivos que de lo contrario, atacarían al devanado o las laminaciones. Asimismo, se pueden sumergir bajo presión en los fluidos de los procesos sin la necesidad de obturaciones. Esto los hace

extremadamente útiles en procesos sensibles como los de la industria alimentaria.

En comparación con los rodamientos de elementos rodantes o los cojinetes hidrodinámicos, los cojinetes magnéticos permiten velocidades periféricas mucho más altas. Se pueden lograr velocidades de hasta 250 m/s o alrededor de 4,5 millones “n x d” (velocidad de giro en min-1 y diámetro en mm). Estas altas velocidades permiten muchas aplicaciones nuevas como husillos avanzados para máquina herramienta o un distribuidor de hidrógeno desarrollado y fabricado para los laboratorios nacionales de EE.UU. (US National Laboratories).

2.1.2.2.3 El auténtico valor de un cojinete magnético.

Una forma reveladora de aprovechar al máximo el valor de un cojinete magnético en, por ejemplo, una gran máquina turbo es considerando el coste del ciclo de vida. Los primeros ahorros se logran eliminando el sistema de lubricación con aceite, el sistema de refrigerado, la caja de engranajes (un motor de alta velocidad, variable unido directamente a, por ejemplo, un compresor), el equipo de monitorización de estado y las piezas de repuesto. Al eliminar estos 'accesorios' también se incrementa la fiabilidad de la máquina.

Se pueden lograr dos ahorros adicionales. El primero gracias a una necesidad de mantenimiento regular menor y el segundo ahorrando en energía. Un cojinete magnético consume sólo una fracción de la energía consumida por un cojinete hidrodinámico.

Con tantos beneficios, los cojinetes magnéticos ahora suponen una opción extremadamente atractiva para muchas aplicaciones que no se consideraban anteriormente.

2.1.2.3 Telefonía móvil.

Pantech, tercera marca de móviles en Corea, presentó su apuesta para los nuevos sliders de la marca: la levitación electromagnética.

Lo han conseguido sustituyendo los resortes mecánicos que impulsan la bandeja con el teclado en los móviles “slider” por un sistema basado en levitación magnética, así las dos partes del móvil estarán suspendidas una sobre la otra sin que haya rozamiento alguno pudiéndolo abrir y cerrar sin esfuerzo, Además el uso de esta tecnología provoca que el teléfono haya podido reducir su grosor en apenas 9.9 mm.



Figura 2.7: Móvil de la empresa Pantech.

2.1.2.4 Cohetes espaciales.

Uno de los sueños que el ser humano siempre ha tenido en mente ha sido la colonización del espacio exterior pero por las tecnologías actuales ese sueño nos es prohibitivo y no será durante algún tiempo. Un billete espacial cuesta de hecho en torno de unos 20 millones de dólares si bien hay compañías como Virgin que ya están preparando paquetes especiales para sus clientes por un precio que ronda los 172.000 €.

La ingravidez gana adictos progresivamente. Por esta razón, en todas partes y desde hace años, se busca una reducción de los costes de lanzamiento basándose en el hecho de que el mayor consumo de carburante de los cohetes se produce en los primeros momentos del viaje. Desde hace años ingenieros visionarios habían propuesto utilizar la tecnología de la levitación magnética para hacer sobrepasar la velocidad del sonido casi horizontal a una especie de nave espacial.

El principal problema para la conquista del espacio, como Tsiolkowski demostró matemáticamente, es que un cohete espacial debe llevar consigo el carburante que lo impulsa, de manera que, cuanto más grande es la masa útil que hay que poner en órbita, más rápidamente decrece la relación masa útil / masa de carburante y, por lo tanto, aumentan los costes y las exigencias tecnológicas. Así pues, queda claro que si se desarrolla un método para que un vehículo espacial pudiese realizar una parte de su fase de aceleración sin utilizar su propio carburante, resultaría muy práctico y reduciría los costes de modo que se pudiesen realizar viajes al espacio a gran escala.

Sin embargo, cuanto mayor sea la velocidad y la masa, surgirán problemas de estabilidad más difíciles de resolver, debido a las leyes de la aerodinámica.

China se han lanzado a la carrera de la puesta a punto de una tecnología de lanzamiento asistida por levitación magnética. Un grupo de investigadores de la Universidad de Aeronáutica y Astronáutica de Beijing y de la Academia de Ciencias de China, ha realizado el experimento con imanes superconductores de “alta temperatura, no obstante, según Wenjiang Yang, uno de los investigadores del experimento: “La levitación magnética es una tecnología prometedora para el transporte espacial del futuro”, y añade: “es muy probable que esta tecnología de levitación magnética se utilice dentro de 20 o 30 años.”

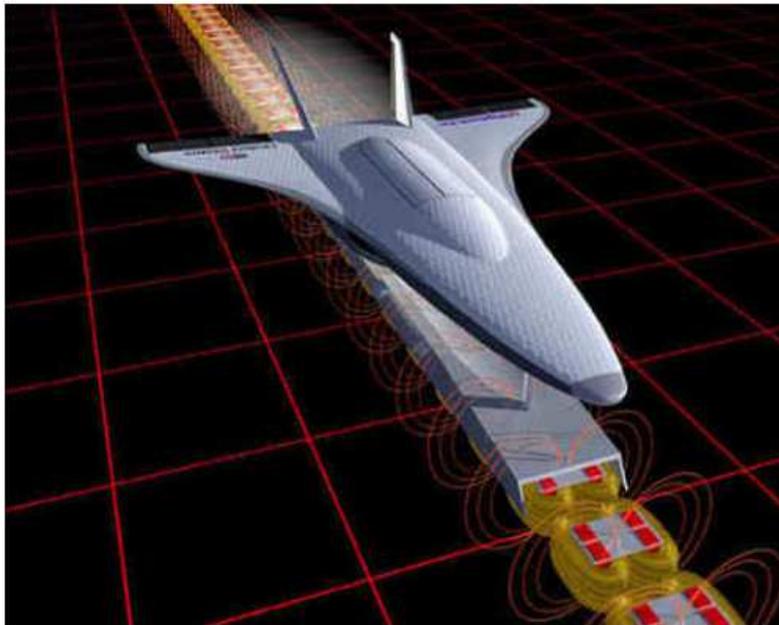


Figura. 2.8 Simulación informática de un cohete espacial por levitación magnética. Fuente: NASA.

Como noticia que nos ha parecido interesante de la que hacemos un resumen en las siguientes líneas:

Los turistas del Galactic Suite, el primer hotel que se abrirá en el espacio en 2012, viajarán en una nave que alcanzará los mil kilómetros por hora en 20 segundos mediante un sistema de levitación magnética). Los vuelos partirán de un aeropuerto que se construirá en una isla del Caribe. Se llamará Spaceport, tendrá 40.000 metros cuadrados de superficie y exigirá una inversión de unos 150 millones de euros.

El despegue se realizará desde una pista de tres kilómetros de longitud denominada "Maglev". La nave espacial levitará por magnetismo y acelerará a través de la pista de forma similar a como lo hace un "tren-bala". Al conseguir una velocidad próxima a la del sonido la nave se desenganchará y ascenderá propulsada por un cohete.

Según Claramunt, este revolucionario sistema de lanzamiento estaría pensado para dar mayor seguridad y minimizar el impacto ambiental. El empresario ha explicado que la parte más cara de cualquier viaje hacia la Órbita Terrestre Baja son los primeros segundos, al dejar el suelo, y que la tecnología Maglev es muy competitiva en su coste respecto a otras formas de transporte espacial.

Además de la terminal de lanzamiento, el Galactic Suite Spaceport tendrá hangares para las naves espaciales, zonas de mantenimiento y taller, oficinas, salas de espera y todas las infraestructuras necesarias para entrenar al futuro turista espacial durante las 16 semanas previas al vuelo y la recuperación posterior.

El primer hotel en el espacio tiene previsto abrir sus puertas en 2012 y viajar hasta él, para pasar tres días a 450 kilómetros de la Tierra, costará unos tres millones de euros.

2.1.2.5 Magnetismo en Medicina

Los resultados más fáciles de observar de la Magnetoterapia son cuando desaparece un dolor muscular o un dolor de cabeza a los pocos minutos de usar un imán. De igual forma, los resultados más sorprendentes se presentan cuando disminuyen o desaparecen los tumores en el cuerpo, cuando rápidamente sueldan las fracturas en mujeres de edad avanzada o cuando se "borran" los moretones producidos por un golpe.

La Magnetoterapia o Terapia con campos magnéticos es, definida en forma sencilla, el tratamiento de enfermedades mediante el uso de campos magnéticos. Estos campos magnéticos pueden ser producidos por imanes permanentes o electroimanes, los cuales pueden tener un campo magnético variable. El término magnetos e imanes se usa de forma indistinta.

2.1.2.6 Frenos electromagnéticos.

Funcionamiento del freno electromagnético.

El freno electromagnético está compuesto por dos solenoides (es una bobina cilíndrica formada por un hilo conductor enrollado en forma de hélice) conectados en serie y son alimentados por medio de un generador de corriente continua de valor controlable, para obtener un campo magnético más o menos intenso. Entre las bobinas gira un disco de inercia.

A causa del movimiento, cada sector del disco es atravesado por un flujo de campo magnético, en variación continua y, en consecuencia, en éste se generan fuerzas electromotrices inducidas, que

causan la circulación de corrientes inducidas.

Estas corrientes tienen un sentido opuesto al movimiento del disco en el interior del campo magnético mismo.

Por consiguiente, se obtiene un efecto de frenado que disminuye el movimiento del disco. La intensidad del efecto aumenta cuanto más grande sea el campo magnético de las bobinas y cuanto más elevada sea la velocidad del disco.

Gracias a este principio de funcionamiento se logra que, cuando el disco está inmóvil, la acción de frenado sea nula. A diferencia de la mayor parte de los frenos mecánicos, que funcionan aprovechando fuerzas de fricción, no hay partes que puedan sufrir desgaste.

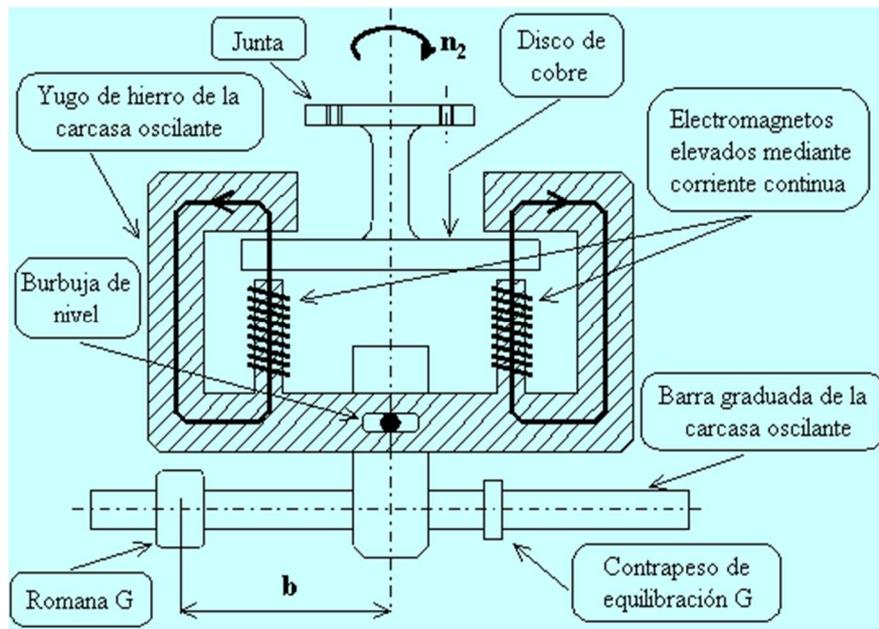


Figura 2.9: Esquema de un freno electromagnético.

2.1.2.7 Energía eólica

Una nueva generación eólica. Un obra colosal, eso es la súper turbina eólica Maglev que se puede ver en la figura 2.10, una obra de tecnología que genera electricidad por medio del viento así como apoyada en propiedades de levitación magnética. Maglev fue presentada en China y empieza apropiarse de la denominación de ser la próxima generación tecnológica en cuanto a energía eólica.



Figura 2.10: La Súper turbina Maglev.

Maglev emplea unos potentes magnetos que no requieren de electricidad, integrando ingeniería de levitación magnética de tal forma que no genera fricción entre la rotación de la gran turbina (lo que ahorra costos de mantenimiento y prolonga su vida útil), tal circunstancia le facilita ser más sensible a las corrientes de viento y con ello se intenta proveerle unas propiedades de una confiabilidad mínima de generación. En el presente, la energía eólica por su intermitencia al suministrar cantidades de electricidad ocasiona altos costos físicos de mantenimiento de un sistema energético además de no ser previsible las cantidades a suministrar y saber con certeza cuanto se puede vender.

Las previsiones de producción de una sola Maglev, llega a generar electricidad suficiente para suministrar a 750,000 hogares y el costo de una sola de estas turbinas es de 37 millones de €. En China están construyendo las primeras turbinas operativas a raíz de la aceptación de los resultados de la Turbina Maglev en su fase de prototipo conceptual. El concepto Maglev está teniendo una aceptada recepción en el mercado estadounidense y se planifica poder introducir las por lo competitividad de sus características, partiendo de que genera muchos ahorros en construcción, mantenimiento y además una electricidad de origen renovable, mucho menos intermitente que las que suministran las turbinas eólicas convencionales de la actualidad.

2.2 Maquetas de levitación magnética.

2.2.1 Maquetas comerciales.

No son muchas las maquetas de levitación magnética que ya totalmente fabricadas, se comercializan para su uso docente o de investigación. Cabe destacar por sus buenas características de diseño y aspecto, sus resultados, así como la información que de ella se le ofrece al usuario, la maqueta de levitación magnética que la empresa Quanser comercializa. Su aspecto se puede observar en la figura 2.23.

Se trata de una maqueta ideal para demostrar el concepto de levitación magnética. Un electroimán provoca la levitación de una bola de acero en el aire, pudiéndose mantener levitando en un rango de espacio de 14 mm. Las medidas de la posición de la bola son obtenidas a través de un fotosensor situado en el interior de la estructura. Al utilizar un sensor de corriente, se permite, opcionalmente, realizar técnicas de control de tipo lazo doble y de control multivariable, así como también el diseño de estrategias de control no lineal.



Figura. 2.11: Maqueta de levitación magnética comercializada y distribuida por Quanser.

Las características principales de esta maqueta son:

Totalmente compatible con MATLAB/Simulink.

Arquitectura de diseño abierta.

Construcción robusta mecanizada en aluminio.

Bola maciza de acero de 1 pulgada.

Fotosensor para detectar la posición de la bola.

Fácil calibración del “offset” del sensor de posición y potenciómetros de ganancia.

Totalmente documentado tanto el modelo del sistema como sus parámetros.

Respecto a las especificaciones más importantes de la maqueta y de sus elementos, quedan recogidas en la tabla de especificaciones del datasheet y que ha modo resumen se presenta a disposición a continuación:

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDAD
Dimensiones de la carcasa	16x16x28	cm
Inductancia de la bobina	412.5	mH
Resistencia de la bobina	10	Ω
Numero de espiras de la bobina	2450	
Radio del núcleo acero bobina	0.008	m
Radio de la bola de acero	1.27E-002	m
Masa de la bola de acero	0.068	Kg
Desplazamiento de la bola acero	0.014	m
Alimentación sensor posición de la bola	+ ₋ 12	V
Rango medida sensor posición de la bola	+ ₋ 5	V
Sensibilidad sensor posición de la bola	2.83E-003	m/V

Figura 2.12: Tabla modo resumen especificaciones.

Por último, en las figuras y se pueden ver una comparación entre los valores teóricos y reales, tanto de la posición de la bola como de la corriente que atraviesa la bobina del electroimán. Para el ejemplo concreto que representan las gráficas, se ha utilizado una referencia en cuanto a posición, de tipo escalón. Como se puede observar en ambas gráficas el comportamiento real (representado en verde) es bastante bueno y próximo al ideal (representado en azul). Se observan por tanto las buenas características que esta maqueta ofrece.

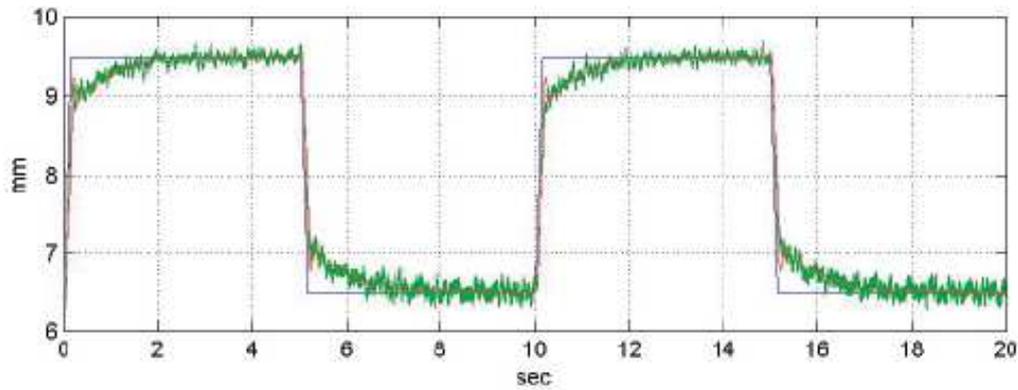


Figura 2.13: Comportamiento teórico (azul) y real (verde) de la posición de la bola cuando se le aplica una referencia de tipo onda cuadrada.

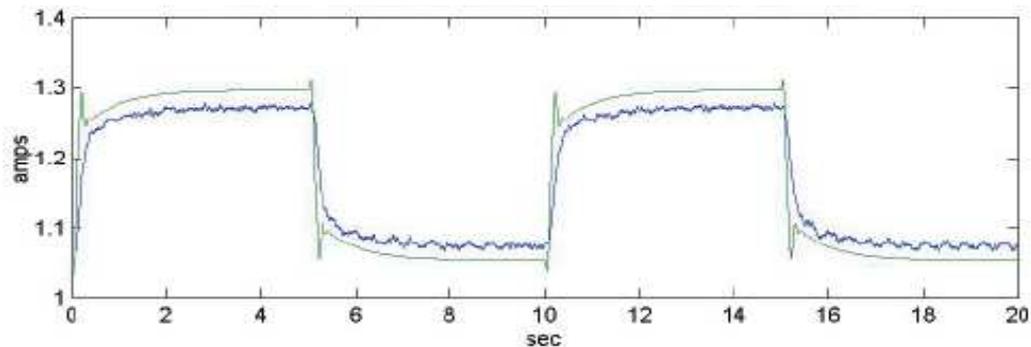


Figura 2.14: Comportamiento teórico (azul) y real (verde) de la intensidad que atraviesa la bobina para el mismo caso anterior (referencia de tipo onda cuadrada).

2.2.2 Otras maquetas.

A continuación se van a mostrar otras maquetas desarrolladas por alumnos e investigadores que se han interesado en el tema.

La primera de ellas corresponde a un levitador magnético con sistema de posicionamiento automático, desarrollado por Aurelio Arenas, Leandro Victoria y Javier Abellán, del Departamento de Física de la Universidad de Murcia.



Figura 2.15: Funcionamiento del levitador magnético diseñado y construido en el Departamento de Física de la Universidad de Murcia.

Por su parte, en la figura 2.16, se puede observar un esquema del sistema. Como se puede observar, una bola de hierro de masa m , se encuentra bajo el núcleo de un electroimán, E , a una distancia x . La corriente que circula por el solenoide induce un campo magnético que junto con la imantación de la bola produce una fuerza sobre la bola hacia el núcleo del electroimán. La resultante de las fuerzas electromagnética (hacia arriba) y gravitacional (hacia abajo) provoca el movimiento ascendente o descendente de la bola. El fotorresistor, F , detecta la variación de posición de la bola por la cantidad de sombra que se proyecta sobre su superficie y genera una señal que realimenta al circuito de control y al amplificador, para regular la intensidad de corriente que fluye por el solenoide. La bola se mantiene en un equilibrio dinámico en torno a su punto de operación.

Otro ejemplo que se expone, es el desarrollado por los alumnos Diego Palmieri y Martín A. Pucci, perteneciente a su proyecto fin de carrera "Construcción y Control de un Sistema de Levitación Magnética", dirigidos por el profesor Ingeniero Anibal Zanini (director del proyecto), del Departamento de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Quilmes.

En la figura 2.17 se puede observar el sistema de levitación magnética construido, en el que un cilindro metálico se suspende o levita mediante un campo magnético generado por un electroimán (bobina) controlado por una fuente de corriente.



Figura 2.16: Sistema de levitación magnética desarrollado.

La fuente de fuerza antigravitacional del sistema es un campo magnético generado por una bobina, utilizada para contrarrestar la fuerza de gravedad ejercida sobre la masa m del cuerpo por el campo gravitatorio terrestre. Para el controlador es necesario, como ya se mencionó, la medición de la posición del cuerpo, utilizando para ello un sensor óptico.

CAPITULO 3

REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

En este capítulo se abordará el estudio de las redes de sensores inalámbricas. En la primera parte se estudiará todos y cada uno de los distintos elementos que conforman una red de sensores, así como las distintas arquitecturas y aplicaciones. Se estudiará en profundidad los componentes de un nodo sensor. En la segunda parte se estudiará los distintos protocolos existentes de una red de sensores tales como el “Wifi”, “Bluetooth”, “Wireless” etc. se hará un estudio comparativo y se verá que por las características del proyecto se optará por la utilización del protocolo “ZigBee”.

Dentro del proyecto se en el que se está trabajando se vio la necesidad de enviar y recibir datos de un lugar a otro y sin cableado de por medio. Se ha estado barajando diversas opciones para esta comunicación inalámbrica y se optó por utilizar módulos RF que estén basados en el protocolo Zigbee, los cuales pueden ser enlazados a nuestros circuitos o un PC mediante comunicación serial y se comunican entre sus nodos de forma inalámbrica.

El principal objetivo de este proyecto es la revisión y mejora de una maqueta de levitación magnética controlada por un microcontrolador de la serie PIC. Esta revisión consistirá en la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica para el envío y recepción de datos. Para tal fin se construirá una red de sensores inalámbrica utilizando módulos “Xbee”.

3.1 Redes de sensores Inalámbricas

Las redes inalámbricas de sensores, denominados motes, se basan en una gran cantidad de pequeños dispositivos, los cuales son capaces de recoger todo tipo de información de su entorno. Su reducido tamaño y la capacidad de transmitir sin cables, permiten un despliegue rápido y flexible de centenares de dispositivos.

En los últimos años el avance de la tecnología se han hecho realidad el desarrollo de unos mecanismos distribuidos, diminutos (con el objetivo principal de que ocupen el menor espacio posible), económicos y de bajo consumo, que, además, son capaces tanto de procesar información localmente como de comunicarse de forma inalámbrica. La disponibilidad de microsensores y comunicaciones inalámbricas permite desarrollar redes de sensores/actuadores para un amplio rango de aplicaciones.

Con todo esto, una red de sensores puede ser descrita como un grupo de motes que se coordinan para llevar a cabo una determinada aplicación. Al contrario que las redes tradicionales, las redes de sensores llevarán con más precisión sus tareas dependiendo de lo denso que sea el despliegue y lo coordinadas que estén.

3.1.1 Elementos de una red de sensores inalámbrica.

Una red de sensores inalámbrica, a partir de este momento la nombraremos por sus siglas en inglés “WSN” (“*Wireless sensor network*”) [1] puede estar constituida por diferentes tipos de sensores según la aplicación que se quiera controlar. A grandes rasgos los elementos que constituyen una WSN son:

Sensores

Están encargados de captar la información del entorno donde se encuentran, y convertirla en señales eléctricas para su posterior procesamiento y análisis. Existen multitud de sensores que miden diferentes variables como humedad, temperatura, viento etc.

Motes

Recogen información obtenida de los sensores y la retransmite a otros motes o a una estación base, además son capaces de actuar según estén programados para ciertas variaciones de los sensores.

Pasarelas o Gateways

Son elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red TCP/IP.

Estaciones base

Es el mote final que se encuentra conectado a un ordenador para la visualización por parte del usuario de los datos recogidos.

Red inalámbrica

Típicamente basada en el estándar 802.15.4 *ZigBee* de la que se hablará posteriormente con más detalle.

3.1.2 Características

Se han creado redes basadas en una serie de nodos que se comunican entre sí, con una destacada mejora con respecto a las redes de sensores tradicionales con el principal objetivo de desarrollar motes de coste mínimo, de pequeño tamaño, con un reducido consumo y que, además se comunican de forma inalámbrica. A pesar de que la red pueda estar formada por nodos con una naturaleza y funciones muy diferentes, todos ellos tienen una serie de características comunes las cuales se exponen a continuación:

Escalabilidad

Una red puede estar continuamente en crecimiento, incluyendo en ella un centenar de nodos llegando hasta miles de nodos. Con el objetivo de controlar y analizar el fenómeno que se desea estudiar, esta red estará compuesta por una gran cantidad de sensores repartidos densamente alrededor de dicho fenómeno.

Topología variable

Los nodos serán colocados de forma arbitraria o estratégica y normalmente desconocida para el resto de los nodos. Esto es debido a que no es necesaria la localización

preestablecida para permitir un despliegue aleatorio en terrenos inaccesibles u operaciones de alivio en desastres.

Cooperación de nodos sensores

Realizan un procesamiento local antes de transmitir los datos.

Recursos limitados

Los sensores disponen de recursos muy limitados debido a su bajo consumo.

Funcionamiento autónomo

Puede darse el caso que el nodo se le agoten las baterías, o funcione de forma inesperada al permanecer desatendido porque no se puede acceder a él físicamente.

Comunicación

Los nodos sensores usan comunicación por difusión, debido a que están densamente desplegados y los nodos vecinos están muy cerca unos de otros. Con la comunicación “*multihop*”, que es la comunicación entre dos nodos finales que se lleva a cabo a través de una serie de nodos intermedios, y cuya función es transmitir información desde un punto a otro, se consigue un menor consumo de potencia que la comunicación “*single-hop*”, que a diferencia de la anterior, no hay nodos intermedios. Además, los niveles de transmisión de potencia se mantienen muy bajos y existen menos problemas de propagación en comunicaciones inalámbricas a largas distancias.

3.1.3 Requisitos para una WSN

Para que una red pueda funcionar de acuerdo con las características descritas en el apartado anterior surgen una serie de requisitos no funcionales que una aplicación debe cumplir:

- **Eficiencia energética**

Este es uno de los puntos más importantes, ya que cuanto menor sea el consumo de un nodo mayor será el tiempo durante el cual pueda estar funcionando y realizando su tarea y, por lo tanto, mayor tiempo seguirá la red operativa. Para ello, las aplicaciones deberán de poseer la capacidad de bajar el consumo de potencia restringiendo el uso de la CPU y la radio FM. Esto se consigue desactivándolos cuando no se utilizan y, sobre todo, disminuyendo el número de mensajes que generan y retransmiten los nodos.

- **Auto organización.**

Los nodos desplegados deben estar organizados de manera que permita establecer comunicaciones por las que mandar los datos que han obtenido. Los nodos necesitan conocer su lugar en esta topología, pero resulta inviable asignarlo manualmente a

cada uno, debido al gran número de nodos. Por ello, es fundamental que sean capaces de formar la topología deseada sin ayuda del exterior de la red. Este proceso no sólo debe ejecutarse cuando la red comienza su funcionamiento, sino que debe permitir que, en cada momento, la red se adapte a los cambios que pueda haber en ella.

- **Escalabilidad.**

Como las aplicaciones siguen en crecimiento durante el tiempo y el despliegue de la red es progresivo, es necesario que la red esté organizada de forma que permita su crecimiento sin que el rendimiento de la misma se vea afectado.

- **Tolerancia a fallos.**

Es importante reducir al máximo los fallos, ya que éstos pueden, bien por un mal funcionamiento de un nodo, ya sea por el estado de las baterías, un error de programación que no se ha tenido en cuenta, por las condiciones ambientales a las que está expuesto el nodo, el estado de la red no sea el adecuado, etc., lo que provoque el mal funcionamiento del conjunto de la red o deje de estar operativa.

- **Tiempo real.**

Unos de los inconvenientes de estos dispositivos es que los datos llegan a su destino con cierto retraso. Pero algunos datos deben entregarse dentro de un intervalo de tiempo conocido. Pasado éste dejan de ser válidos, como puede pasar con datos que impliquen una reacción inmediata del sistema, o se pueden originar problemas serios. En caso de que una aplicación tenga estas restricciones, se deben tomar las medidas que garanticen la llegada a tiempo de los datos.

- **Seguridad.**

Este aspecto es de considerable importancia a tener en cuenta, ya que al establecerse las comunicaciones inalámbricas por un medio fácilmente accesible puedan estar expuestas a personas ajenas a la red de sensores. Esto implica un riesgo potencial para los datos recolectados y para el funcionamiento de la red. Se deben establecer mecanismos que permitan tanto proteger los datos de estos intrusos, como protegerse de los datos que estos puedan inyectar en la red.

Según la aplicación la importancia de los anteriores requisitos puede variar haciéndose más importantes unos que otros pero en mayor medida todos están presentes si bien es necesario encontrar el peso que cada uno de ellos tiene en el diseño de la red, pues normalmente unos requisitos van en detrimento de otros. Por ejemplo, dotar a una red de propiedades de tiempo real tal como una aplicación de video vigilancia podría implicar aumentar la frecuencia con la que se mandan mensajes con datos, lo cual repercutiría en un mayor consumo de potencia y un menor tiempo de vida de los nodos.

3.1.4 Arquitectura de una WSN.

Según como estén distribuidos los nodos sensores, los “gateways” (en español se denominan pasarelas) y las estaciones base se diferencian dos tipos de arquitecturas:

3.1.4.1 Arquitectura centralizada.

Los nodos de la red envían los datos directamente al “gateway” más cercano, dirigiendo el tráfico en forma concreta tal como se muestra en la figura 3.1:

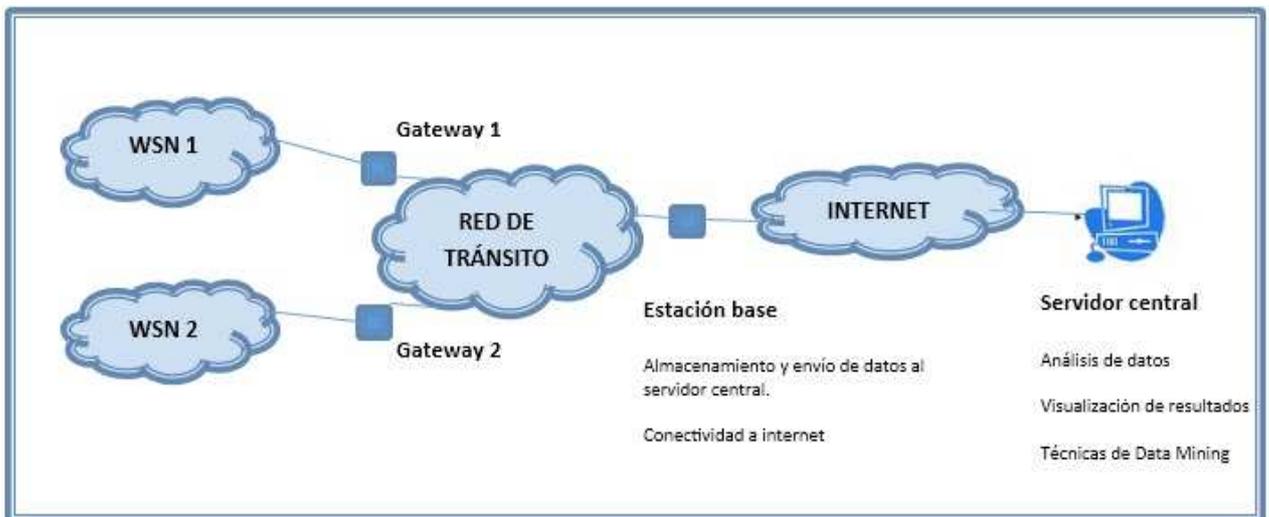


Figura 3.1: Esquema de arquitectura centralizada de una red de sensores.

El ciclo de vida de un nodo consiste en despertarse, medir, transmitir y dormir. No obstante, cada vez que transmita mensajes pasará, por el gateway, creándose dos grandes problemas para la red:

- Cuello de botella en las pasarelas.
- Mayor consumo de energía por las comunicaciones, acortándose de ésta manera el tiempo de vida de la red.

3.1.4.2 Arquitectura distribuida.

La comunicación entre nodos es fundamental, puesto que se basa en la cooperación de los mismos, garantizándose, de esta manera, un tipo de arquitectura con una computación distribuida, donde los sensores se encargan de ejecutar algoritmos distribuidos para obtener una única respuesta global que un nodo “cluster head” se encargará de comunicar a la estación base a través de las gateway pertinentes. Además realiza un cálculo de agregados con un grano más grueso de los datos y unas respuestas más elaboradas.

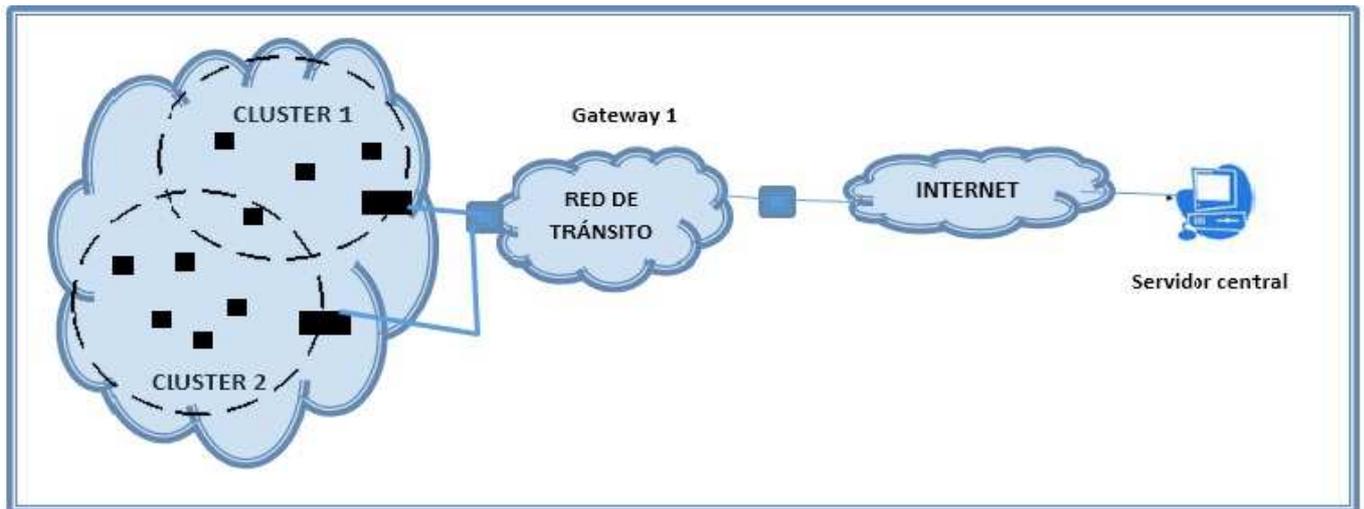


Figura 3.2: Esquema de arquitectura distribuida de una red de sensores.

3.1.5 Aplicaciones de las redes de sensores.

Las redes de sensores tienen una amplia variedad de aplicaciones entre los que se encuentran:

- Monitorización de un hábitat (para determinar la población y comportamiento de animales y plantas).
- Monitorización del medio ambiente, observación del suelo o agua.
- Mantenimiento de ciertas condiciones físicas (temperatura, luz).
- Control de parámetros en la agricultura.
- Detección de incendios, terremotos o inundaciones.
- Sensorización de edificios “inteligentes”.
- Control de tráfico.
- Asistencia militar o civil.
- Control de inventario.
- Control médico.
- Detección acústica.
- Cadenas de montaje, etc.

A continuación, se desarrolla algunas de las aplicaciones de las redes de sensores presentadas anteriormente:

- Aplicaciones de localización.

Otra de las aplicaciones de las WSN, es la localización de personas u objetos dentro de un área cerrada. Por ejemplo monitorizar al personal de la limpieza en aquellos centros de los que se disponga de este servicio, por ejemplo en hoteles, hospitales, universidades, etc.

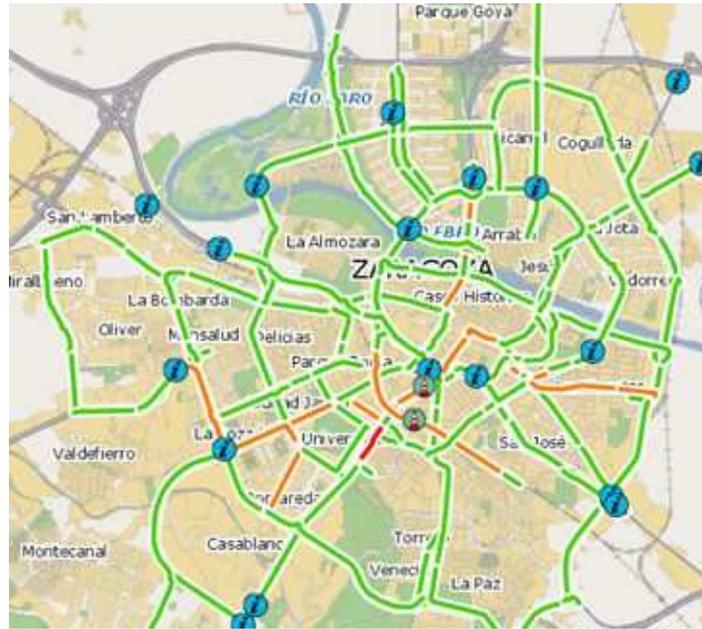


Figura 3.3: Esquema de distribución de sensores en la ciudad de Zaragoza en una aplicación de localización.

- Aplicaciones militares.

Las WSN pueden ser piezas en clave para sistemas militares que llevan a cabo tareas como dar las órdenes y llevar el control de las comunicaciones, el procesamiento de los datos obtenidos, inteligencia, vigilancia, y reconocimientos de objetivos militares. Debido a su rápido y denso despliegue, su autoorganización y tolerancia a fallos las redes de sensores convierten en las respuesta para dar solución a este tipo de aplicaciones, ofreciendo una solución de bajo coste y fiable para éstas, ya que la pérdida de un nodo no pone en riesgo el éxito de las operaciones.

- Aplicaciones medioambientales.

En este ámbito se tienen aplicaciones como el seguimiento de aves, animales e insectos; monitorización de condiciones ambientales que afectan al ganado y las cosechas; detección de incendios; investigación de meteorología o geofísica; detección de inundaciones, control de agricultura, microclimas, etc.

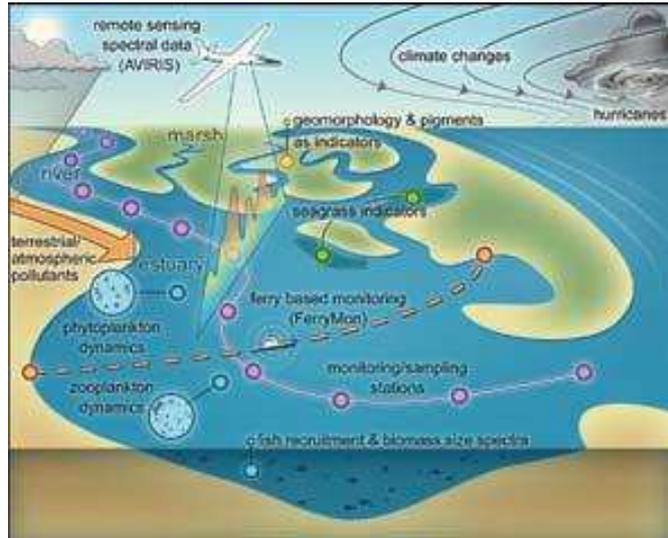


Figura 3.4: Aplicación medioambiental de una red de sensores para la medición de las condiciones climáticas.

- Aplicaciones sanitarias.

A medida que va avanzando la tecnología, los chips van reduciendo su tamaño cada vez más, y creciendo su nivel de complejidad. Hasta ahora confinados en las máquinas, comienzan a adaptarse al cuerpo humano, con lo que es posible crear redes de sensores inalámbricos que permitan un control del estado de salud de las personas y sirvan para prevenir problemas y enfermedades. Con esta ayuda tecnológica, el hombre podría anticiparse a muchas patologías como los ataques al corazón.

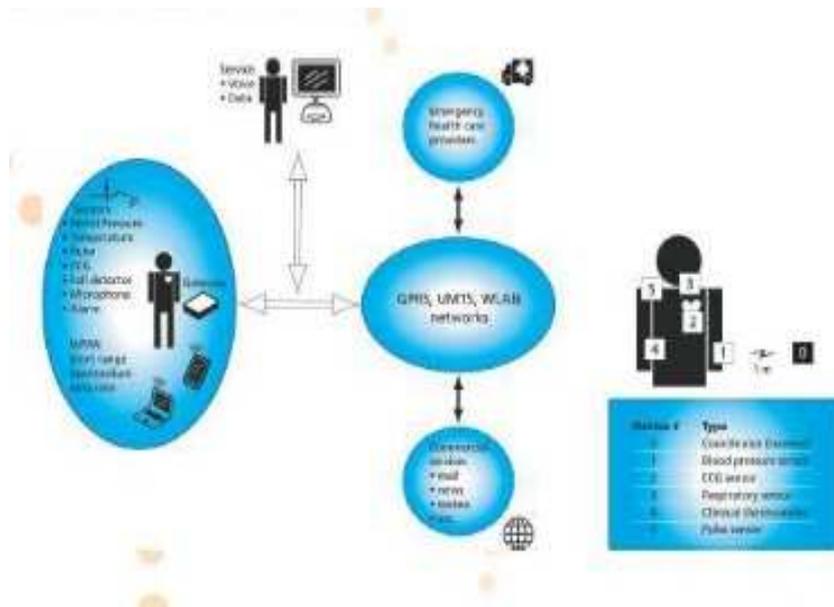


Figura 3.5 Aplicación sanitaria de la red de sensores para ayudar a pacientes con

problemas cardiacos.

- Aplicaciones domóticas.

En este ámbito, los nodos sensores pueden ser introducidos en aparatos domésticos como aspiradoras, microondas, frigoríficos... Esto permite que sean manejados remotamente por los usuarios finales mediante una comunicación que se realizaría vía satélite o Internet.

Los sensores pueden integrarse en muebles y en todo tipo de aparatos del hogar. Éstos se comunican entre ellos y con servidores de la habitación. Todos ellos se integran y organizan con los dispositivos integrados existentes para autoorganizarse, autorregularse y autoadaptarse basándose en modelos de control. De esta forma se puede crear un entorno inteligente.

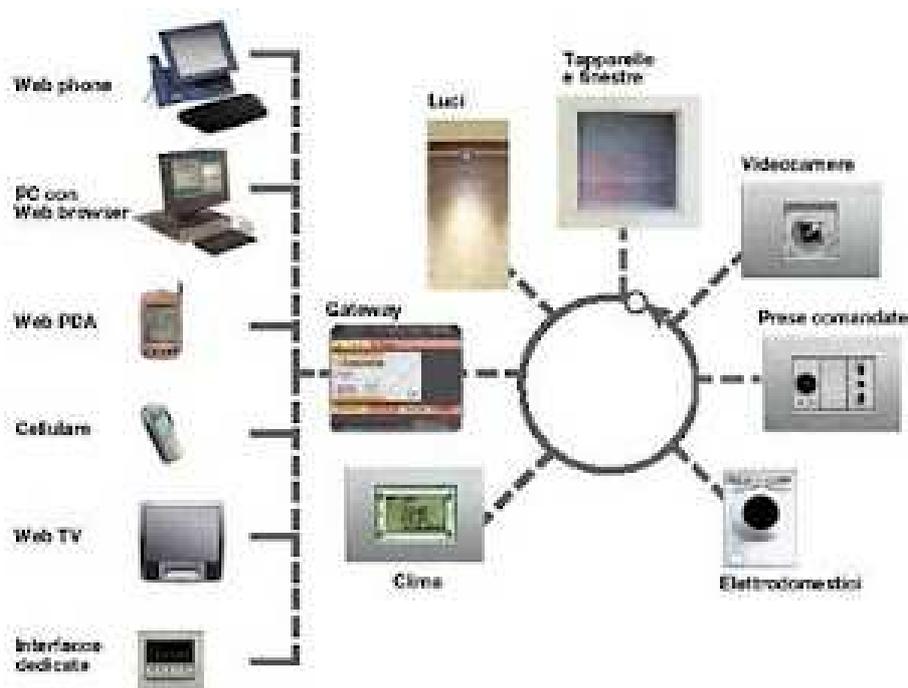


Figura 3.6: Esquema de una aplicación domótica para el control de distintos aparatos de forma inalámbrica.

3.1.6 Arquitectura de un nodo.

El esquema básico de un nodo sensor consta básicamente de cuatro componentes clave: Unidad de detección (o sensores), unidad de proceso, transceptor y módulo de alimentación. Este esquema básico podría ampliarse dependiendo de la necesidad de las aplicaciones o la especialización del hardware, incluyendo módulos como un generador de energía, un sistema de movilidad o un sistema de localización o posicionamiento.

3.1.6.1 Componentes de un nodo sensor wireless.

Los cuatro subsistemas básicos que componen el hardware de un nodo pueden apreciarse con detalle en la siguiente figura 3.7:

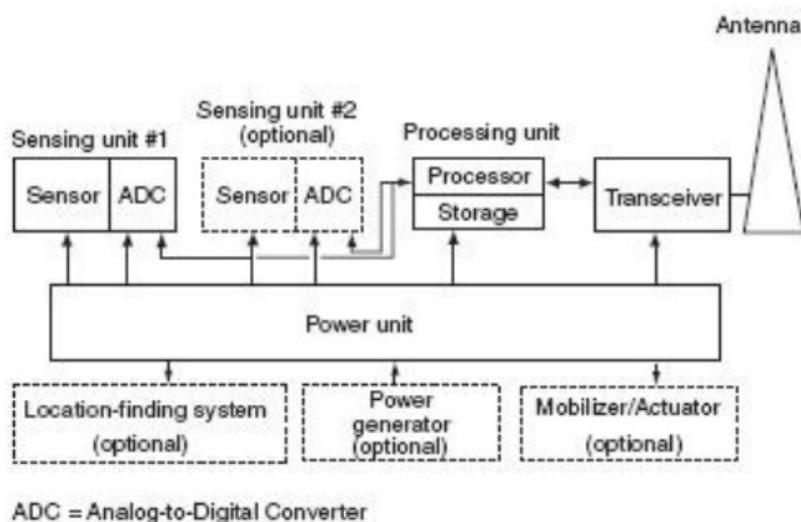


Figura 3.7: Componentes de un nodo sensor wireless.

Fuente de alimentación.

Para que el sensor esté operativo debe tener un suministro de energía apropiado que sea capaz de alimentar al nodo durante horas, meses o años, dependiendo de la aplicación. Como ejemplo de plataforma desatendida, suelen incorporar una alimentación mediante un sistema de alimentación autónomo (generalmente baterías), combinado con alguna fuente de recarga (células solares por ejemplo) o energía auxiliar. Estas estrategias de recarga suelen dar buen resultado en operaciones donde no es posible llevar a cabo un reemplazo de la batería.

Microcontrolador.

Proporciona la lógica computacional y de almacenamiento. Utilizado en tareas de procesamiento y manipulación de datos, almacenamiento transitorio, cifrado, corrección

de errores (FEC), modulación y transmisión digital. Los requisitos de cómputo y almacenamiento en una WSN dependen de la aplicación y pueden ir desde la utilización de un microcontrolador de 8 bits a un microprocesador de 64 bits. Los requerimientos de almacenamiento pueden igualmente oscilar entre 0,01 hasta 100 gigabytes (GB).

Un microcontrolador proporciona la integración necesaria para llevar a cabo las tareas de procesamiento y coordinación sin necesidad de hardware adicional. Además de la memoria proporcionada por el microcontrolador no es extraño encontrar modelos que incluyan memoria externa adicional, por ejemplo en forma de memoria flash

Unidad/es de detección o sensores.

Son el medio de comunicación entre el entorno, la red y el sensor. Un sensor es un dispositivo que mide una cantidad física y la convierte en una señal que sea procesada por el microcontrolador.

Los sensores pueden ser pasivos (sin sensor manipulación activa del medio ambiente) o activa (mediante la manipulación activa o sondeo del medio con un radar, p.e.), direccional u omnidireccional.

La detección de una magnitud física como las descritas, generalmente son resultado la producción de una señal analógica continua, por esta razón, una unidad de detección se compone típicamente de una número de sensores y un conversor analógico digital DAC (“*Digital to analogic converter*”) que digitaliza la señal.

Transceptor.

Esta unidad permite la transmisión y recepción de datos a otros dispositivos, conectando al nodo en la red de sensores. Un nodo sensor wireless típico se comunica utilizado un sistema de RF (radio frecuencia) y algún tipo de tecnología PAN (“*Personal Área Network*”).

Un sensor típico está compuesto de cinco subsistemas principales de software:

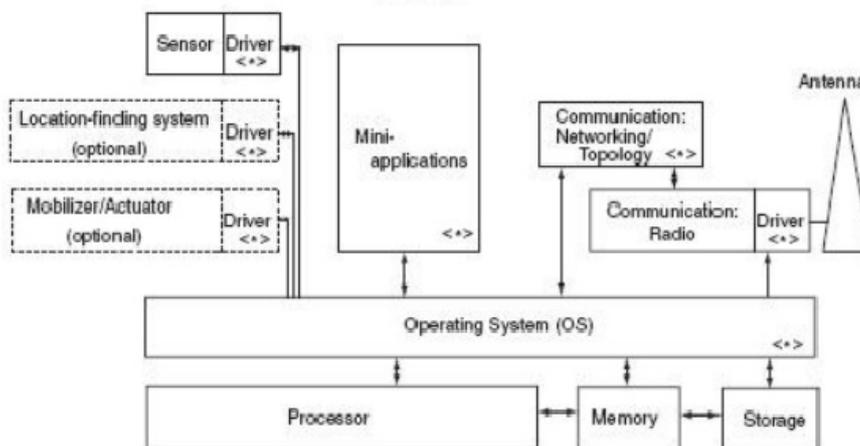


Figura 3.8: Distintos componentes software de un sensor.***Sistema operativo.***

Es el microcódigo utilizado por el todo el software de alto nivel en el nodo, proporcionando apoyo a diversas funciones básicas. Como cualquier otro sistema operativo, el objetivo será proteger y abstraer al software de la funcionalidad/complejidad del microprocesador a nivel puro de hardware. TinyOS es un ejemplo de un sistema operativo de uso general.

Drivers.

Los sensores pueden estar diseñados utilizando un sistema modular o tipo plug-in, dependiendo de su sofisticación. Estos módulos de software específicos gestionan las funciones básicas del transceptor del sensor, gestión de módulos, la configuración adecuada y los ajustes utilizados en el sensor. Estos drivers proporcionan la abstracción necesaria de funcionalidad a nivel de máquina y dan soporte al sistema operativo utilizado.

Procesadores de comunicación.

Este código gestiona las funciones de comunicación, incluyendo el envío, almacenamiento en bufer de paquetes y transmisión, mantenimiento de topología, control de acceso medio (p.e. mecanismos de contención), cifrado, por citar algunos de ellos.

Drivers de comunicación.

Estos módulos de software de encargan de la gestión de aspectos menores de la capa del canal de transmisión de radio, incluyendo aspectos de sincronización, gestión de la frecuencia del reloj (clocking), codificación de la señal, recuperación de bits, niveles de señal y modulación.

Mini aplicaciones de procesamiento de datos.

Para llevar a cabo muchas de las tareas es necesario llevar a cabo numerosas operaciones numéricas, de procesamiento de datos, almacenamiento y manipulación de señales y otras operaciones básicas que sirven de apoyo a otros módulos a nivel de nodo.

3.1.7 Clasificación de los sensores.

Los sensores se pueden clasificar en diferentes tipos atendiendo a diferentes factores. A continuación se presentan los diferentes tipos de sensores existentes en la actualidad:

Atendiendo al fundamento físico.

Este tipo de sensores atienden a una propiedad física cuya variación produce excitación:

- Resistivos: Miden variaciones de resistencia.
- Capacitivos: Miden variaciones de capacidad.
- Inductivos: Miden variaciones de la inductancia electromagnética o magnitud de flujo magnético.
- Generadores de tensión o intensidad: La magnitud física provoca la generación de tensión o intensidad en el dispositivo, sin necesidad de alimentación externa.

Atendiendo a la alimentación.

- Activos: No requieren alimentación externa.
- Pasivos: Requieren alimentación externa.

Atendiendo a la salida.

- Analógicos: La salida es un nivel de tensión o intensidad que varía de forma continua.
- Digitales: La salida está codificada mediante un código binario o en forma de pulsos.
- Discretos: Se consideran un caso particular de los digitales. La salida sólo presenta dos estados: activa o no activa. Es el caso de dispositivos tales como los detectores de presencia.

Atendiendo a la magnitud física a medir.

Si bien existe una larga lista de sensores que miden multitud de magnitudes se presenta a continuación los sensores que miden las magnitudes más comunes:

- Posición.
- Velocidad.
- Aceleración.
- Temperatura.
- Fuerza.
- Presión.

3.2 Protocolos de una WSN.

Se presentan una serie de protocolos utilizados en WSN. Se dará detalles sobre cada uno de ellos así como ventajas y desventajas y el porqué se ha optado a utilizar el protocolo ZigBee en el proyecto.

3.2.1 WI-FI.

El protocolo “*Wi-Fi*” es similar a la red Ethernet tradicional y, por tanto, se necesita una configuración previa para establecer la comunicación. También se le denomina Wi-Fi al “Ethernet sin cables”, para dar una gran idea de las ventajas e inconvenientes que tiene respecto a otras alternativas. La ventaja de una red Wi-Fi es permitir conexiones mucho más rápidas y rangos de distancias mayores, aparte de mejores mecanismos de seguridad, además permiten a los dispositivos una mayor movilidad al no necesitar cables para transferencia de datos.

No obstante, una de sus desventajas es que es muy fácil acceder a estas redes por parte de personas ajenas si la red no está bien configurada o bien protegida, lo que es necesaria la seguridad.

El rango de frecuencia utilizada es la misma que la que usa el Bluetooth, la diferencia es que tiene una potencia de salida mayor que lleva a conexiones más sólidas. Cabe aclarar que esta tecnología no es compatible con otros tipos de conexiones sin cables como Bluetooth, GPRS, UMTS, etc.

Existen varios tipos de dispositivos que se pueden clasificar en dos grupos:

- Dispositivos de distribución o red, entre los que cabe destacar los routers, repetidores o puntos de acceso.
- Dispositivos terminales, suelen ser las tarjetas receptoras empleadas en la comunicación con el ordenador. Pueden ser las tarjetas PCI o bien tratarse de USB externos.

3.2.2 Bluetooth.

El protocolo Bluetooth fue diseñado con el objetivo de reemplazar la tecnología con cables, usando una conexión de radio muy segura y de corto alcance. Permite la conexión entre dispositivos a un bajo costo y a cortas distancias. El Bluetooth tiene un alcance normalmente de 10 metros, ya que establece una conexión utilizando el mínimo consumo posible de energía de las baterías. Sin embargo, es posible establecer un alcance mucho mayor, similar al de las redes Wi-Fi, con el inconveniente de un aumento de consumo de energía mucho mayor. Es recomendable que no exista nada físico entre los elementos que se conectan mediante este protocolo para mejorar la comunicación. La banda de radiofrecuencia utilizada sería la ISM (“*Industrial, Scientific and Medical*”) de los 2,4GHz.

Los diferentes tipos de clases de dispositivos que usan el Bluetooth son:

Bluetooth v1.0 y v1.0b

Las primeras versiones de este protocolo han tenido muchos problemas, y los fabricantes tenían muchas dificultades para hacer sus productos interoperables. Las versiones 1.0 y 1.0b incluyen en hardware de forma obligatoria la dirección del dispositivo Bluetooth (BD_ADDR) en la transmisión (el anonimato se hace imposible a nivel de protocolo), lo que fue un gran revés para algunos servicios previstos para su uso en entornos Bluetooth.

Bluetooth v1.1

- Ratificado como estándar IEEE 802.15.1-2002
- Muchos errores en las especificaciones 1.0b se corrigieron.
- Añadido soporte para canales no encriptados.
- Indicador de señal recibida (RSSI).

Bluetooth v1.2

Esta versión es compatible con USB 1.1 y las principales mejoras son las siguientes:

- Conexión más rápida y “*Discovery*” (detección de otros dispositivos bluetooth).
- Salto de frecuencia adaptable de espectro ampliado (AFH) mejorando la resistencia a las interferencias de radio frecuencia y evitando el uso de las frecuencias de lleno en la secuencia de saltos.
- Mayor velocidad de transmisión en la práctica, de hasta 721 kbit/s, que en v1.1.
- Conexiones Sincrónicas extendidas (ESCO), que mejoran la calidad de la voz de los enlaces de audio al permitir la retransmisión de paquetes corruptos, y, opcionalmente, puede aumentar la latencia de audio para proporcionar un mejor soporte para la transferencia de datos simultánea.
- “*Host Controller Interface*” (HCI) el apoyo a tres hilos UART.
- Ratificado como estándar IEEE 802.15.1-2005
- Introdujo el control de flujo y los modos de retransmisión de L2CAP.

Bluetooth v2.0 + EDR

Esta versión de la especificación principal Bluetooth fue lanzada en 2004 y es compatible con la versión anterior 1.2. La principal diferencia es la introducción de una mayor velocidad de transmisión de datos para acelerar la transferencia de datos (EDR). La tasa nominal de EDR es de 3 Mbit / s, aunque la tasa de transferencia de datos práctica es de 2,1 Mbit / s. EDR utiliza una combinación de GFSK y “*Phase Shift Keying*” modulación (PSK).

La especificación se publica como "Bluetooth v2.0 + EDR", lo que implica que EDR es una característica opcional. Aparte de EDR, hay otras pequeñas mejoras en la especificación 2.0.

Bluetooth v2.1 + EDR

Totalmente compatible con 1.2, y adoptada por el Bluetooth SIG (“*Bluetooth Special Interest Group*”) el 26 de julio de 2007.

Se mejora la experiencia de emparejamiento de dispositivos Bluetooth, mientras que el aumento del uso y la fuerza de seguridad.

Permite otras mejoras, incluida la "respuesta amplia investigación" (EIR), que proporciona más información durante el procedimiento de investigación para permitir un mejor filtrado de los dispositivos antes de la conexión lo que reduce el consumo de energía en modo de bajo consumo.

Bluetooth v3.0 + HS

Aprobada por el Bluetooth SIG el 21 de abril de 2009. Soporta velocidades de transferencia de datos teórica de hasta 24 Mbit / s, aunque no a través del enlace Bluetooth sí mismo. En cambio, la conexión Bluetooth se utiliza para la negociación y el establecimiento y el tráfico de datos de alta velocidad se realiza aprovechando el protocolo 802,11 con la creación de un enlace. Su principal novedad es AMP (“*Alternate MAC / PHY*”), la adición de 802,11 como un transporte de alta velocidad. Dos tecnologías se había previsto para AMP: 802.11, UWB, pero UWB no se encuentra en la especificación.

Bluetooth v4.0

El SIG de Bluetooth ha completado la especificación del núcleo de Bluetooth en su versión 4.0, que incluye Bluetooth clásico, Bluetooth de alta la velocidad y protocolos Bluetooth de bajo consumo. Bluetooth de alta velocidad se basa en Wi-Fi, y Bluetooth clásico. Esta versión ha sido adoptada el 30 de junio de 2010. Bluetooth baja energía (BLE) es un subconjunto de Bluetooth v4.0 con una pila de protocolo completamente nuevo para la rápida acumulación de enlaces sencillos. Como alternativa a los protocolos estándar de Bluetooth que se introdujeron en Bluetooth v1.0 a v4.0 está dirigido a aplicaciones de potencia muy baja.

3.2.3 Wireless USB.

Este protocolo fue lanzado en sus inicios con gran expectación, aunque no se ha extendido demasiado en el mercado, destaca por su gran ancho de banda en distancias muy cortas que combina la sencillez de uso de USB con la versatilidad de las redes inalámbricas, puede lograr tasas de transmisión de hasta 480 Mbps en rangos de tres metros, su uso está enfocado a mandos para juegos, cámaras de video y fotos, discos duros externos, etc.

Obviamente las características de este servicio no se ajustan a una WSN como las enfocadas en el proyecto.

3.2.4 IEEE 802.15.4

Es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes WLAN con tasas bajas de transmisión de datos, desplegando redes con muy bajo consumo. La eficiencia energética de este protocolo reside fundamentalmente en el uso de las tramas “Beacon”, que permiten sincronizar los dispositivos de la red para que puedan permanecer en modo ahorro de energía el mayor tiempo posible, esto supone una gran ventaja para el desarrollo WSN que realicen tanto tareas de monitorización como de control.

Este estándar sirve de base para otras especificaciones como “ZigBee” o “Wireless HART”, mencionado más adelante, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes definiendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre.

3.2.5 ZigBee.

ZigBee [2] es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Fue un proyecto formado por seis promotores (Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola, Philips, y Samsung) y más de 80 participantes.

El primer perfil se declaró a mediados de 2003, se definieron especificaciones globales de aplicaciones inalámbricas fiables, económicas y de baja potencia basadas en la norma IEEE 802.15.4.

El siguiente diagrama muestra la organización básica de este protocolo y dónde se encaja dentro de la capa OSI:



Figura 3.9: Diagrama de organización del protocolo ZigBee y 802.15.4 dentro de la capa OSI.

Las características básicas de ZigBee son:

- Menor potencia y menor coste que otras WPAN.

- Potencia Tx 1mW(hasta 10mW en CE, hasta 100 mW en EEUU).
- Los nodos están gran parte del tiempo “dormidos.
- Rango alcance: 10-100 m, hasta 400 m con 10 mW).
- Bit-rate entre los 20kB/s y 250kB/s.
- Se permiten hasta un total de 65534 nodos/red.
- Tres bandas de comunicación: 868MHz, 915MHz, 2.4GHz.

3.2.6 Comparativa entre las distintas tecnologías

Para la decisión de qué tecnología utilizar en la mejora del proyecto se ofrecen a continuación diferentes tablas y gráficas que ponen de manifiesto que el protocolo 802.15.4 con Zigbee es el idóneo para el proyecto que se quiere desarrollar.

	Wireless USB	WiFi	Bluetooth	802.15.4
Frecuencia (GHz)	3.1 – 10.6	2.5 - 5	2.4	2.4
Ancho de banda	480 Mbps (3m) 110 Mbps (10m)	11 - 108 Mbps	1 – 3 Mbps	20/40/250 Kbps
Cobertura (m)	3 - 10	20 - 250	1- 100	1 - 75

Figura 3.10: Tabla donde se hace una comparativa entre las distintas tecnologías en cuanto a frecuencia, ancho de banda utilizado así como la cobertura.

Se observa como en 802.15.4 se puede utilizar tres bandas de frecuencia, en un principio la banda de 868 MHz está disponible en Europa, 915MHz en USA y 2400 MHz a nivel mundial, con sus correspondientes anchos de banda, de hecho un dispositivo que implementa el 802.15.4 puede transmitir en una de tres posibles bandas de frecuencia, por lo que cada vez existe menor diferenciación.

La tabla presenta un alcance máximo de 75m para 802.15.4, esta medida se pondera en condiciones óptimas las cuales es difícil que se presenten en escenarios reales.

Este diagrama muestra los rangos de funcionamiento de las distintas tecnologías en función de la distancia y la capacidad.

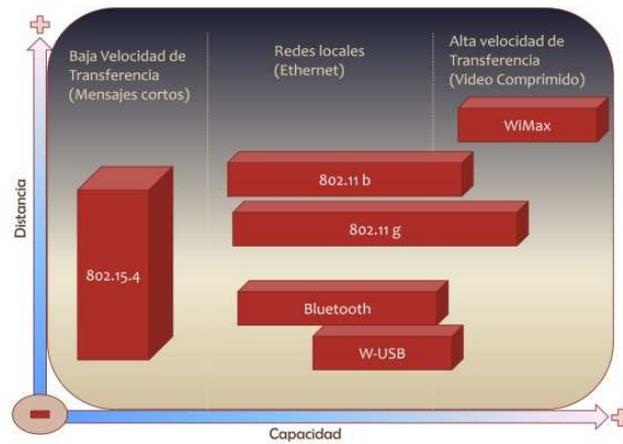


Figura 3.11: Comparativa entre las distintas tecnologías en función de la distancia y la capacidad de envío de datos.

Como se puede observar el protocolo 802.15.4 tiene una tasa de transferencia relativamente baja con respecto a las otras tecnologías pero la WSN del proyecto no requiere un elevado ancho de banda así que como se verá más adelante la utilización de 802.15.4 será la más eficiente.

A continuación se muestran dos graficas dónde se representan el consumo energético de los dispositivos según la tecnología utilizada. Estos valores son orientativos y no deben tomarse como referencias exactas pues dependen mucho tanto del software como del hardware de cada dispositivo.

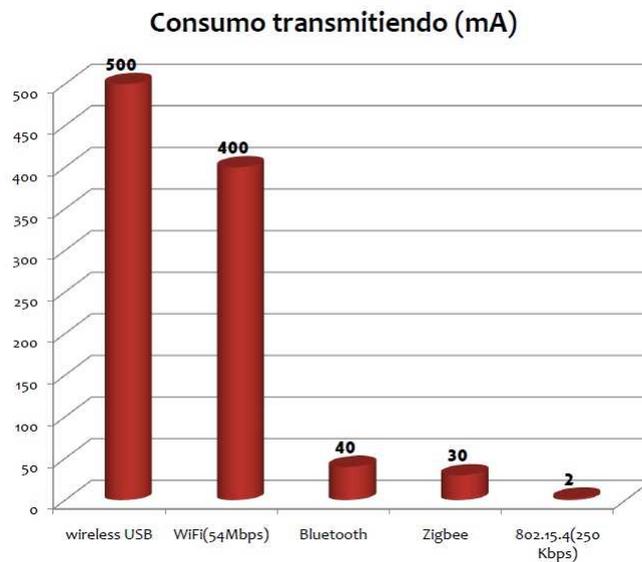


Figura 3.12: Índice de consumo energético de los distintos dispositivos transmitiendo.

El consumo energético en un dispositivo es directamente proporcional al tamaño de los paquetes y la cantidad de datos transmitidos, aun así es evidente la eficiencia de 802.15.4.

ZigBee es una tecnología que complementa 802.15.4 a nivel de red y aplicación, se hablará más adelante acerca de esta tecnología. Es importante para el proyecto mencionar la significativa diferencia entre ZigBee y 802.15.4, esta diferencia se debe a las cabeceras adicionales de ZigBee, y a la mayor complejidad del protocolo que exige un mayor tiempo de procesamiento de los datos.

A continuación se presenta una gráfica comparativa de consumo en reposo.

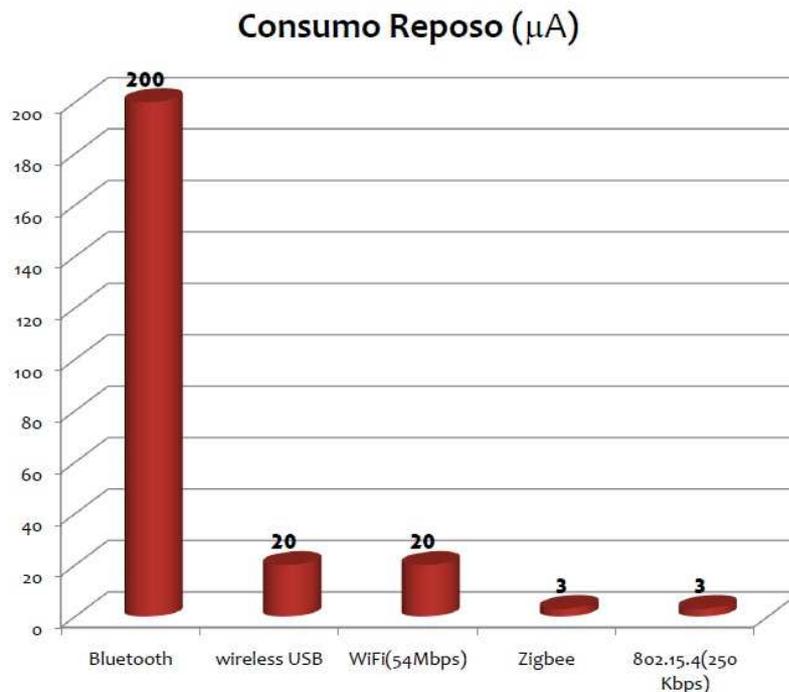


Figura 3.13: Consumo en reposo de las distintas tecnologías.

En esta gráfica hay que mencionar que el alto consumo de Bluetooth en reposo se debe a que esta tecnología nunca está en auténtico reposo, los dispositivos se encuentran vinculados y sincronizados.

Se puede apreciar también los mínimos valores en ZigBee y 802.15.4, por supuesto el consumo es el mismo pues ZigBee trabaja sobre 802.15.4 donde ambos mantienen las mismas rutinas en reposo.

A continuación, se muestran de modo informativo dos gráficas comparativas acerca de ZigBee realizadas por la Universidad de Granada en el que se compara los índices de BER (“*Bit Error Rate*” conocido como el número de bits de un flujo de datos a través de un canal de comunicación que han sido alterados por ruido, interferencias, distorsiones o fallos de sincronización, dividido entre el número de bits totales transmitidos) y SNR (“*Signal-to-noise ratio*” conocido como el cociente de dividir la potencia de la señal entre la potencia del ruido en dB).

La siguiente gráfica muestra la gran robustez frente a otras tecnologías inalámbricas.

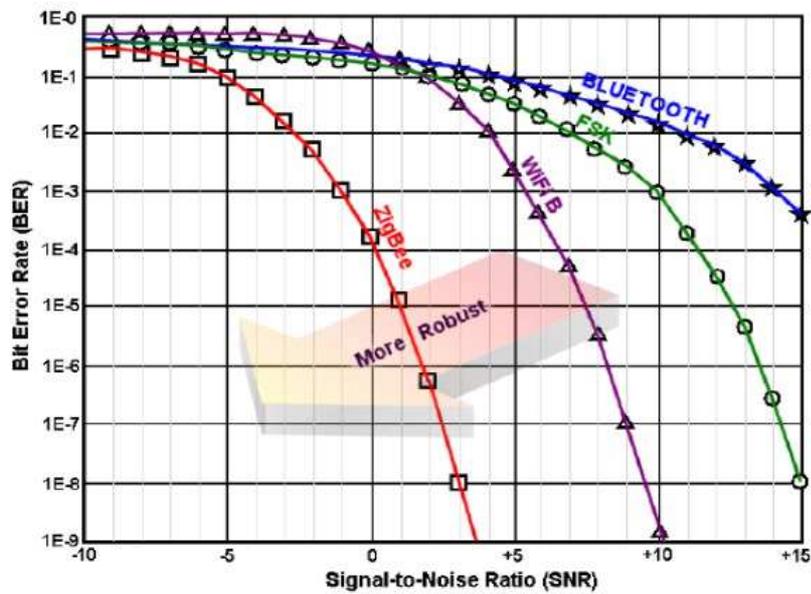


Figura 3.14: Comparación entre los índices de VER y SNR entre as tecnologías Bluetooth, Wifi y ZigBee.

El siguiente diagrama contrasta ZigBee frente a otras tecnologías inalámbricas teniendo en cuenta el alcance de la red, y la tasa de transferencia de datos.

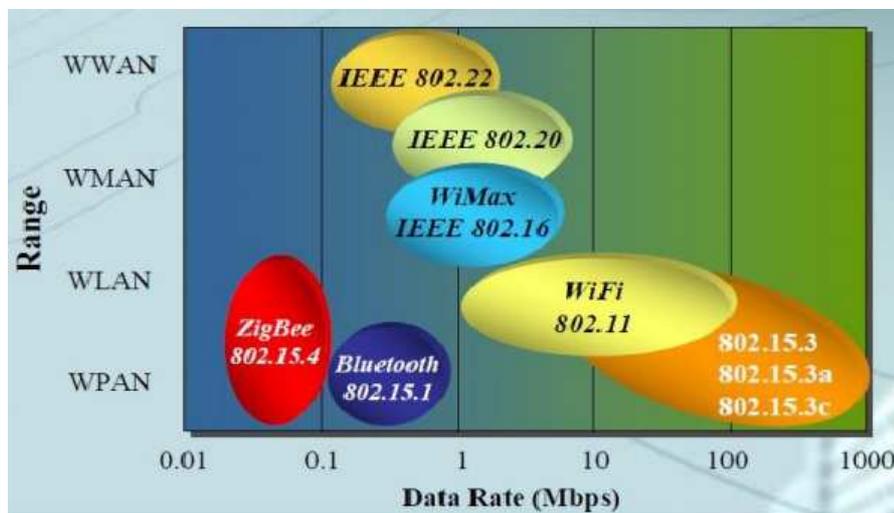


Figura 3.15: Comparación de Zigbee frente a otras tecnologías inalámbricas teniendo en cuenta el alcance de la red así como la tasa de transferencia.

Como conclusión de todo lo dicho anteriormente se ha decidido utilizar la tecnología ZigBee en la comunicación entre la maqueta de levitación magnética y el PC, ya que, por los requerimientos poco exigentes del sistema a controlar se cumple las expectativas deseadas.

CAPÍTULO 4

COMPONENTES HARDWARE

En este capítulo se hablará de los distintos elementos que componen una maqueta de levitación magnética así como las características de cada uno. En la segunda parte del capítulo se hará un estudio de las fuentes eléctricas detallando los tipos de fuentes y las características principales de cada una de ellas. Por último se hará un estudio de los distintos operacionales y especialmente del operacional LM675 que forma parte del diseño de la fuente de alimentación.

4.1 Elementos principales de una maqueta de levitación magnética.

4.1.1 Sensores.

Un sensor es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas.

Las variables de instrumentación dependen del tipo de sensor y pueden ser por ejemplo temperatura, intensidad luminosa, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica obtenida puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como un fototransistor), etc.

Hay sensores que no sólo sirven para medir la variable, sino también para convertirla mediante circuitos electrónicos en una señal estándar (4 a 20 mA, o 1 a 5VDC) para tener una relación lineal con los cambios de la variable censada dentro de un rango (span), para fines de control de dicha variable en un proceso.

4.1.1.1 Características de un sensor.

Entre las características técnicas de un sensor destacan las siguientes:

Rango de medida

Dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.

Precisión

Es el error de medida máximo esperado.

Offset o desviación de cero

Valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el offset.

Sensibilidad de un sensor

Relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada.

Resolución

Mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.

Rapidez de respuesta

Puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.

Derivas

Son otras magnitudes, aparte de la medida como magnitud de entrada, que influyen en la variable de salida. Por ejemplo, pueden ser condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura u otras como el envejecimiento (oxidación, desgaste, etc.) del sensor.

Repetitividad

Error esperado al repetir varias veces la misma medida.

Seguidamente se pasan a analizar tres posibles sensores que, por sus características, podrían ser adecuados para su implantación en maquetas de levitación magnética.

4.1.1.2 Sensor infrarrojo.

El sensor infrarrojo es un dispositivo electrónico capaz de medir la radiación electromagnética infrarroja de los cuerpos en su campo de visión. Todos los cuerpos reflejan una cierta cantidad de radiación, esta resulta invisible para nuestros ojos pero no para estos aparatos electrónicos, ya que se encuentran en el rango del espectro justo por debajo de la luz visible.

Principio de funcionamiento.

Los rayos infrarrojos(IR) entran dentro del fototransistor donde encontramos un material piroeléctrico, natural o artificial, normalmente formando una lámina delgada dentro del nitrato de galio (GaNO₃), nitrato de Cesio (CsNO₃), derivados de la fenilpirazina, y ftalocianina de cobalto. Normalmente están integrados en diversas configuraciones (1, 2,4 pixeles de material piroeléctrico). En el caso de parejas se acostumbra a dar polaridades opuestas para trabajar con un amplificador diferencial, provocando la auto-cancelación de los incrementos de energía de IR y el desacoplamiento del equipo.

En la aplicación práctica de este tipo de sensores es común emplear al menos un emisor de infrarrojos (p.e. un diodo led de ese espectro de emisión), que será gobernado para emitir un grupo de pulsos con una determinada cadencia que, tras ser reflejados en

diferentes objetos cercanos, alcanzarán a uno o más detectores de infrarrojo. Así, la detección de la señal reflejada informará sobre la presencia de un objeto cercano situado en un rango típico que va desde unos pocos centímetros, hasta algunos metros de distancia. Obviamente los detectores deben quedar fuera del alcance de la radiación emitida directamente por el emisor, bien mediante barreras opacas o bien situándose antes del origen de la radiación, ya que de otra forma el detector se activaría siempre, de forma instantánea, en cuanto se iniciara la transmisión de la señal.

La radiación infrarroja está presente de forma apreciable en la radiación luminosa procedente del Sol y, en general, en la radiación térmica emitida por todos los cuerpos que superen en temperatura al ambiente que les rodea. Por este motivo los detectores de infrarrojo incorporan un filtro pasobanda que sólo permite el paso de señales moduladas (en la práctica a una frecuencia cercana a los 40 kHz) para evitar su activación permanente.

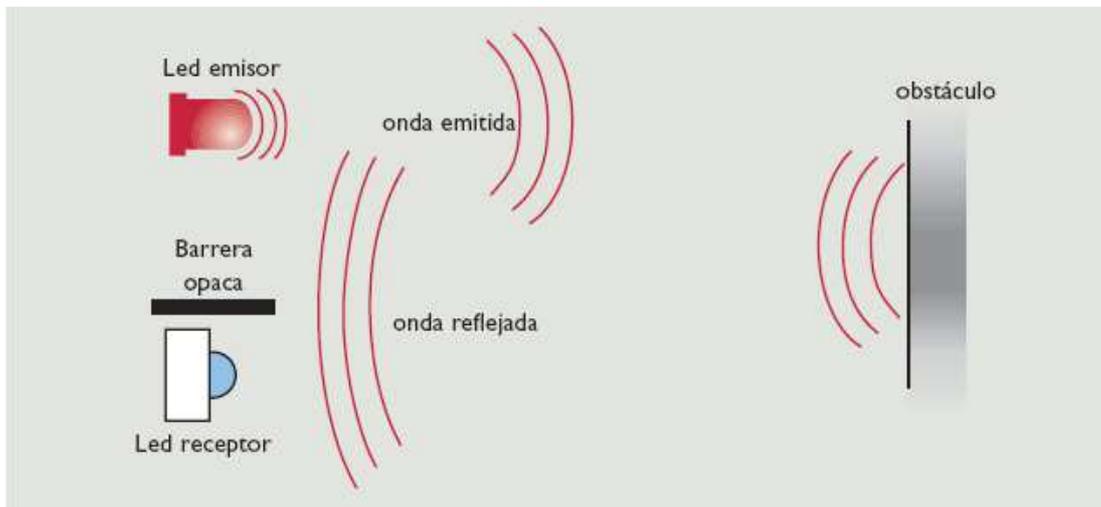


Figura 4.1: Funcionamiento típico de un sensor de infrarrojo.

Como consecuencia de la elevada velocidad de propagación de la señal (velocidad de la luz) y de su corto rango de aplicación en la práctica (disminución cuadrática de la densidad de potencia con la distancia), el cálculo de distancia basado en la medida del tiempo de reflexión es prácticamente inviable. Por otra parte, debido a la amplia dispersión de la señal emitida (mala directividad de la señal, que puede llegar a presentar una gran separación angular entre rayos del haz) y a la distorsión de la señal reflejada (reflexiones en diferentes objetos que se suman con desfase en el detector y pueden distorsionar la frecuencia de la señal moduladora) el cálculo de distancia basado en triangulación requiere el uso de un sistema óptico complejo, bien ajustado y de difícil calibración, cuyo propósito es disminuir la dispersión del haz emitido y enfocar la señal reflejada. Por último, el cálculo de distancia basado en la medida de potencia de la señal reflejada es inviable, no solamente debido a la dispersión de la señal, que impide la determinación de la posición relativa del obstáculo, sino también a que diferentes tipos de superficies y materiales absorben diferente cantidad de la potencia de la onda incidente.

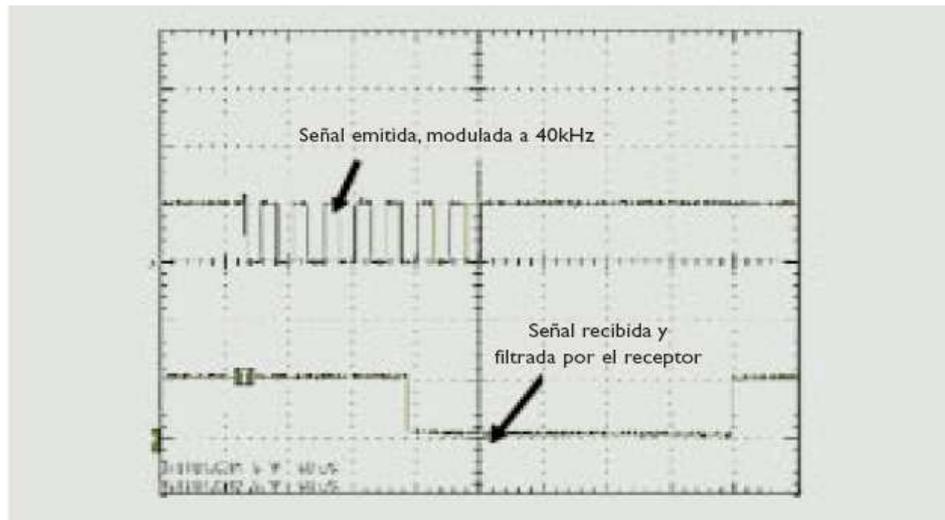


Figura 4.2: Captura en osciloscopio de la señal emitida por el emisor y recibida por el receptor de un sistema de infrarrojo.

No obstante, es posible conocer, con un cierto grado de confianza, la dirección y el tamaño del objeto cercano que ha sido detectado con la señal emitida, si se utiliza una combinación de dos o más detectores convenientemente distribuidos en el dispositivo de detección.

En cualquier caso, debido a la relativa dificultad que entraña la medida de distancia al objeto detectado, en la mayoría de los casos este tipo de sensor se utiliza como detector de colisión sin contacto físico y encuentra un potencial campo de aplicación en el guiado longitudinal de móviles (circulación por túneles, atraque de embarcaciones, aparcamiento...).

En la práctica este tipo de sensores se emplea para detectar la presencia de objetos en un rango que no suele superar varios metros de distancia. Como ya se ha mencionado, en parte esto es debido a la debilitación de la señal reflejada con la distancia al objeto impactado y a la amplia dispersión del haz emitido que impide concentrar la detección a lo largo de una dirección definida. De hecho, la gran dispersión del haz emitido obliga a limitar la potencia de emisión de los diodos utilizados como emisores, para garantizar la extinción de la señal a partir de una distancia prefijada. De no limitar la potencia de los emisores, se provocaría que los detectores estuvieran continuamente excitados, debido a las señales reflejadas por objetos que ni siquiera se encontrarían próximos a la dirección principal de emisión de la señal. En la práctica, aprovechando el filtro paso-banda incorporado en los detectores convencionales (típicamente centrado en 40 kHz), uno de los métodos más prácticos para reducir la potencia de la señal y limitar así el rango de acción del sensor, es la modulación en una frecuencia ligeramente diferente a la frecuencia central del filtro (p.e. 38 kHz).

Como resumen de las virtudes de la aplicación de sensores basados en este tipo de tecnología cabe enumerar la elevada velocidad de propagación de su señal (la de la luz), su bajísimo riesgo para el organismo y su facilidad de implementación, así como los excelentes resultados que ofrece cuando se combina con la tecnología de ultrasonidos como se explicará más adelante. Como curiosidad, cabe citar una virtud anecdótica de los dispositivos basados en este tipo de sensor: como el lector sabrá, este tipo de sensores es habitualmente empleado en los teletandos de los equipos de audio y vídeo domésticos, así como en los teletandos de alarma y de control de apertura de vehículos.

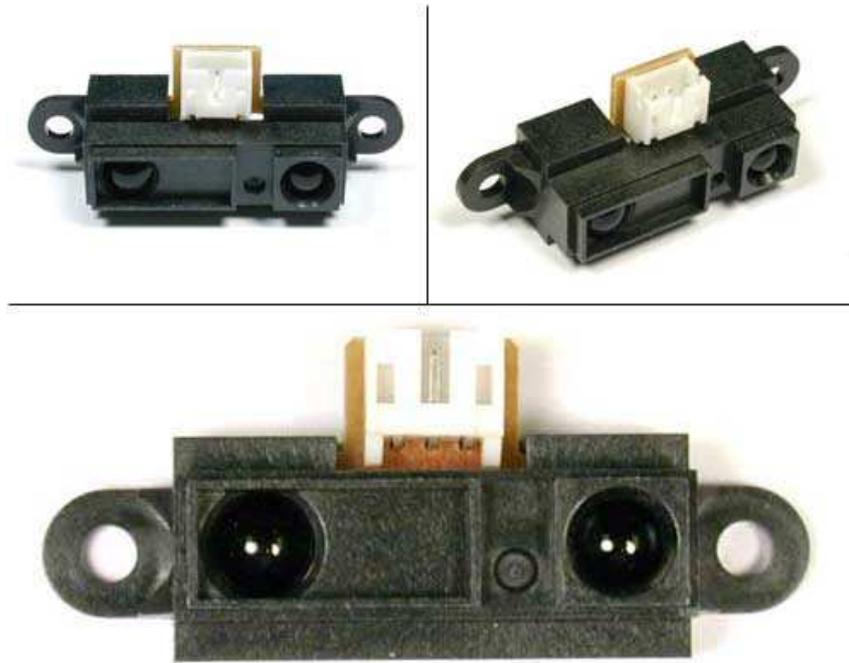


Figura 4.3: Diferentes vistas del sensor de infrarrojo modelo GP2D12 comercializado por Sharp.

De esta forma es posible concebir este tipo de dispositivos para ser utilizados simultáneamente como detectores de proximidad y como emisores/receptores de telemando de infrarrojos.

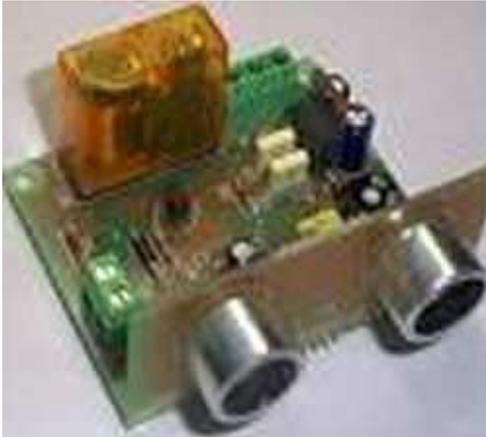
A pesar de sus virtudes esta tecnología presenta diversos inconvenientes que ya han sido citados, a saber, su poca direccionalidad, su limitado alcance en ambientes especialmente cálidos o expuestos a la luz solar (nótese que en condiciones de operación de poca iluminación ambiental, como túneles, desplazamientos nocturnos, etc., el rango de acción de este tipo de sensor se incrementa notablemente) y, por último, la dificultad intrínseca que presenta su aplicación al cálculo de distancia a los objetos detectados.

4.1.1.3 Detector de ultrasonidos.

Se va a hablar sobre los detectores de ultrasonidos. El término ultrasonido denota frecuencias de sonido que están por encima del rango auditivo humano, cuyo límite superior se encuentra en 16 kHz en personas saludables de unos 20 años. Las frecuencias usadas en los detectores de ultrasonidos varían de unos modelos a otros, oscilando entre 23 y 40 kHz. La frecuencia es generada por un oscilador y llevada a uno o más altavoces. Éstos deben ser muy pequeños, más incluso que los altavoces de un equipo hi-fi, ya que las partes móviles tienen que moverse muy rápidamente y su masa debe mantenerse al mínimo. Esta es una de las ventajas de las alarmas basadas en detectores de ultrasonidos.

La misma unidad contiene un micrófono con circuitos amplificadores y de procesamiento.

Los sonidos de frecuencias ultra altas se proyectan en el área protegida del detector de ultrasonidos. Algunas de ellas se reciben directamente por el micrófono del altavoz, mientras que otras llegan procedentes del rebote con los muros de la habitación. Cuando no hay movimiento, tanto los sonidos directos como los rebotados son de la misma frecuencia. Cuando un objeto se mueve, el sonido reflejado por él experimenta un cambio de frecuencia similar al Efecto Doppler. Así, el micrófono del detector de ultrasonidos coge dos frecuencias: la original, recibida directamente del altavoz, y la frecuencia modificada reflejada por el movimiento del objeto.



Si se mezclan dos frecuencias diferentes, el resultado es que aparece una tercera que resulta ser la diferencia entre las otras dos. Cuando las dos frecuencias son próximas, la tercera aparece habitualmente como un pulso. Este pulso lo recibe el detector de ultrasonidos como una vibración que varía en frecuencia a medida que la velocidad cambia.

Los circuitos de procesamiento en los detectores de ultrasonidos detectan la presencia del pulso y generan la salida más aproximada a la real. El detector de ultrasonidos se puede conectar en cadena, pero es preferible para los detectores de espacio conectarlos en zonas separadas a los sensores de perímetro para poder rápidamente la fuente de alarma. Se necesita una fuente de potencia adicional de 25 a 50 mA para la caja de control.



Figura 4.4: Sensor de ultrasonidos comercializado por Parallax INC.

Los detectores de ultrasonidos suelen tener un rango superior de 30ft, pero tienen un control de sensibilidad que puede reducir el rango en 10ft. El patrón de polaridad tiene la forma de un lóbulo estrecho, por lo que el dispositivo proporciona una pequeña protección a los lados. Como el Efecto Doppler, responde mejor a movimientos de avance y retroceso que a movimientos lado a lado. Este es el motivo por el que resulta mejor montar el detector de ultrasonidos de cara al posible punto de entrada.

Los inconvenientes asociados a los sensores de ultrasonidos se pueden resumir en dos: la zona muerta de medida de distancia (que dependerá de la posición relativa de emisor y receptor) y la elevada potencia requerida para emitir los pulsos de ultrasonidos (se

requieren aproximadamente cinco vatios de potencia eléctrica, para generar una señal útil en un alcance de pocas decenas de metros). Por otra parte, la principal ventaja de este método de medida de distancia, consiste en la sencillez de los dispositivos utilizados para su implementación.



Figura 4.5: Aplicación de los sensores de ultrasonidos en la industria automovilística, con el fin de alertar de la distancia de un obstáculo, facilitándole así las maniobras al conductor.

4.1.1.4 LVDT.

4.1.1.4.1 Introducción y principio de funcionamiento.

El Transformador Diferencial Variable Lineal es un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de salida proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de sus arrollamientos. Los LVDTs proveen una salida lineal para pequeños desplazamientos mientras el núcleo permanezca dentro del bobinado primario. La distancia exacta es función de la geometría del LVDT.

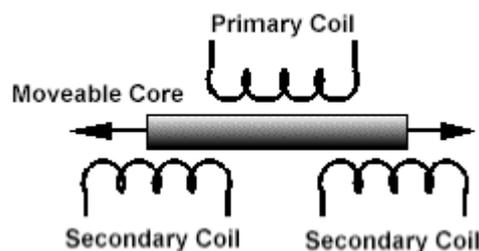


Figura 4.6: Esquema del principio de funcionamiento general de un LVDT.

Un LVDT es muy parecido a cualquier otro transformador, el cual consta de un bobinado primario, bobinado secundario, y un núcleo magnético. Una corriente, conocida como la señal portadora, se aplica en el bobinado primario. Dicha corriente en

el bobinado primario produce un campo magnético variable alrededor del núcleo. Este campo magnético induce un voltaje en el bobinado secundario que está en la proximidad del núcleo. Como en cualquier transformador, el voltaje de la señal inducida en el bobinado secundario es una relación lineal del número de espiras.

La relación básica del transformador es:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{out}}{N_{in}}$$

Donde:

V_{out} : tensión de salida.

V_{in} : tensión de entrada.

N_{out} : número de espiras del bobinado secundario.

N_{in} : número de espiras del bobinado primario.

Como el núcleo se desplaza, el número de espiras expuestas en el bobinado secundario cambia de forma lineal. Por lo tanto la amplitud de la señal inducida cambiará también linealmente con el desplazamiento.

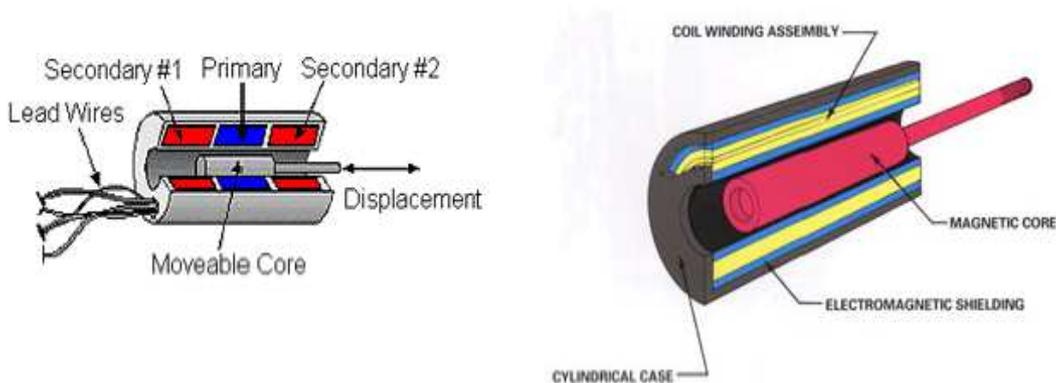


Figura 4.7: Esquema de la estructura básica y principio de funcionamiento específico de un LVDT.

El LVDT indica la dirección de desplazamiento debido a que las salidas de los dos bobinados se encuentran balanceadas mutuamente. Los bobinados secundarios en un LVDT se conectan en sentido opuesto. Así cuando el mismo campo magnético variable se aplica a ambos bobinados secundarios, sus voltajes de salida tienen igual amplitud pero diferente signo. Las salidas de los dos bobinados secundarios se suman, simplemente conectando los bobinados secundarios a un punto común de centro.

A una posición de equilibrio (generalmente cero desplazamiento) se produce una señal de salida igual a cero. La señal inducida de CA es entonces desmodulada para producir un voltaje de CC que sea sensible a la amplitud y a la fase de la señal de CA producida. A continuación se muestra un diagrama de la relación entre la señal de entrada del bobinado primario, el núcleo magnético y la señal de salida.

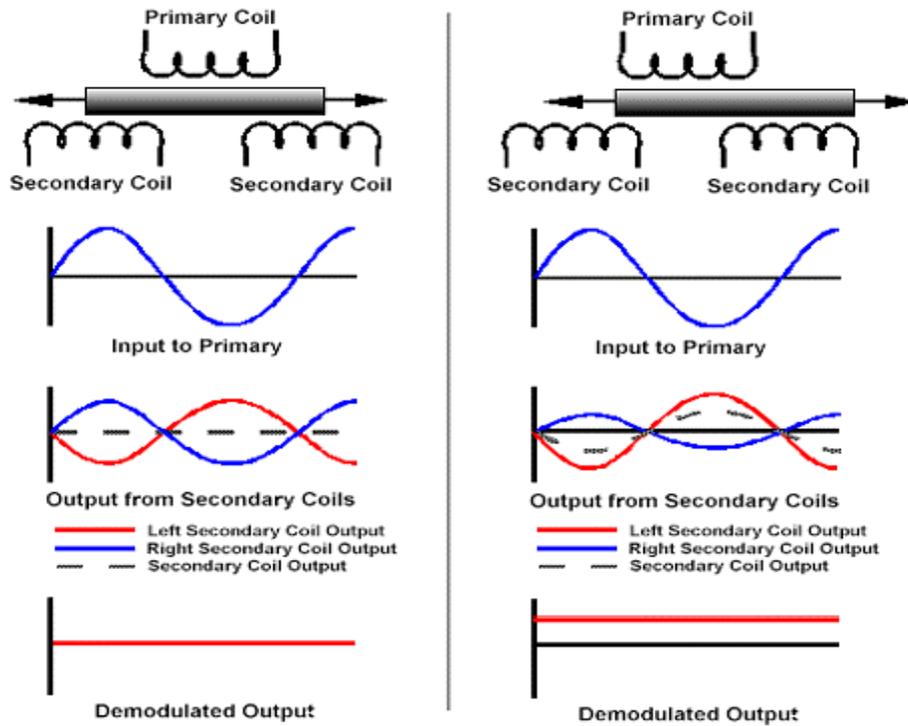


Figura 4.8: Diagrama con la relación entre la señal de entrada del bobinado primario, el núcleo magnético y la señal de salida.

4.1.1.4.2 Características de diseño.

Las letras LVDT son un acrónimo de “*Linear Variable Diferencial Transformer*”, un tipo común de transductor electromagnético que puede convertir el movimiento rectilíneo al cual está acoplado mecánicamente, en una señal eléctrica correspondiente. Los sensores de posición lineal LVDT están fácilmente disponibles para medir movimientos de unas pocas millonésima partes de pulgada hasta varias pulgadas, pero son capaces también de medir posiciones de hasta 20 pulgadas. Seguidamente se muestran los componentes de un LVDT típico. La estructura interna del transformador consiste en un arrollamiento primario centrado entre un par de canaletas destinadas para la ubicación de los bobinados secundarios, simétricamente espaciados respecto del primario.

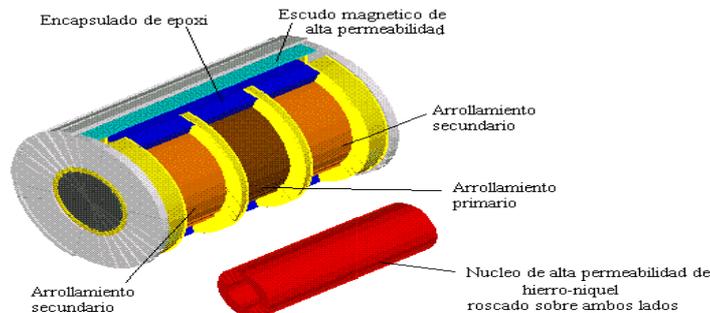


Figura 4.9: Esquema de la estructura de un LVDT.

Los bobinados están devanados sobre una pieza de forma hueca, térmicamente estable por su construcción de polímero reforzado de cristales, y encapsulado contra la humedad; son envueltos en un escudo magnético de elevada permeabilidad, y luego alojados por seguridad en un cilindro de acero inoxidable. Este ensamble del bobinado es comúnmente el elemento fijo del sensor de posición.

El elemento móvil del LVDT es una armadura tubular de un material magnéticamente permeable llamado núcleo, el cual está libre para moverse axialmente dentro del hueco de los bobinados, y está mecánicamente acoplado al objeto cuya posición se desea medir. Este diámetro interior es lo suficientemente grande como para proveer un espaciado radial entre ambos, sin la necesidad de contacto físico.

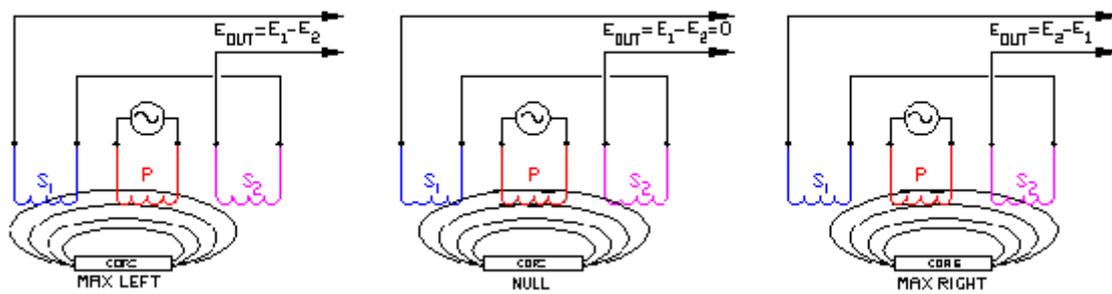


Figura 4.10: Diferentes tensiones de salida obtenidas según la posición del núcleo del LVDT.

El arrollamiento primario p , es energizado por una fuente de corriente alterna de amplitud constante. El flujo magnético desarrollado es acoplado por el núcleo hacia el arrollamiento secundario adyacente, S_1 y S_2 . Si el núcleo está localizado equidistante de S_1 y S_2 , igual flujo es acoplado hacia secundario, siendo los voltajes E_1 y E_2 inducidos iguales.

En esta posición equidistante del núcleo, referida como punto nulo, la salida de tensión diferencial ($E_1 - E_2$) es 0.

Si el núcleo es desplazado más cerca de S_1 que de S_2 , más flujo es acoplado hacia S_1 , así el voltaje inducido E_1 es incrementado mientras E_2 decrece, resultando la tensión diferencial $E_1 - E_2$. Recíprocamente, si el núcleo es desplazado más cerca de S_2 , más flujo es acoplado hacia S_2 y por lo tanto se incrementa E_2 , resultando la tensión diferencial $E_2 - E_1$.

Por último en la figura 4.11 se puede observar que la salida de un LVDT es muy lineal sobre el rango específico de movimiento del núcleo. No obstante, el sensor puede ser usado sobre un rango extendido con alguna reducción en la linealidad de la salida.

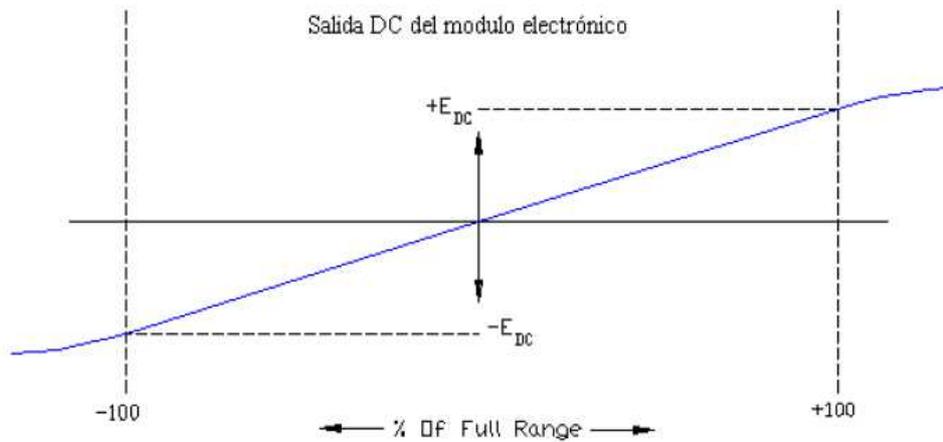


Figura 4.11: Salida de un LVDT sobre la totalidad del rango de trabajo (rango específico de movimiento del núcleo).

4.1.1.4.3 Ventajas de su utilización.

Los LVDTs tienen ciertas características y beneficios significativos. Algunos de los cuales derivan de los principios fundamentales de la física, de la operación o de los materiales y técnicas usadas en su construcción. Entre ellas cabe mencionar:

Operación libre de fricción.

En su uso normal, no hay contacto mecánico entre el núcleo del LVDT y el bobinado, no hay roce, arrastre u otra fuente de fricción. Esta característica es particularmente usada en prueba de materiales, medición de desplazamiento por vibración y sistemas graduador dimensional de alta resolución.

Resolución infinita.

Puesto que los LVDTs operan sobre principios de acoplamiento electromagnético en una estructura libre de fricción, miden cambios infinitamente pequeños en la posición del núcleo. Esta capacidad de resolución infinita es limitada solamente por el acondicionador de señal del LVDT y por el display de salida (si lo hubiera).

Vida mecánica ilimitada.

Este factor es especialmente importante en aplicaciones de alta confiabilidad, tales como aeroplanos, satélites, vehículos espaciales e instalaciones nucleares. Así también, es altamente deseable en determinados controles de procesos industriales y sistemas de automatización de fábrica.

Resistencia al deterioro por sobre excursión.

El agujero interno de la mayoría de los LVDT está abierto a ambos lados. En los casos de sobre excursión no prevista, el núcleo puede pasar a través de la zona de los bobinados sin causar daños.

Sensibilidad de eje simple.

El LVDT responde al movimiento del núcleo a lo largo del eje del bobinado, pero es generalmente insensible al movimiento en el eje transversal del núcleo o su posición radial. Por ello, un LVDT generalmente puede funcionar sin efectos adversos en aplicaciones que implican movimientos no alineados o flotantes, y en casos donde el núcleo no se mueve exactamente en línea recta.

Resistente al medio ambiente no apto.

Las técnicas de construcción y materiales usadas en el armado de un LVDT, hacen de él un sensor durable y resistente en una gran variedad de condiciones ambientales. La unión de los arrollamientos es seguida por un encapsulado epoxy en el casco, resultando más resistente a la humedad, así como también la capacidad para absorber choques, cargas considerables y altos niveles de vibración en todos los ejes.

La alta permeabilidad interna del escudo magnético minimiza los efectos de campos externos de CA.

El casco y el núcleo están hechos de metales resistentes a la corrosión, el casco también actúa como un escudo magnético suplementario. Y para las aplicaciones donde el sensor debe resistir la exposición a vapores y líquidos combustibles o corrosivos, u operando en fluidos comprimidos, el casco y el bloque ensamblado de las bobinas pueden sellarse herméticamente usando una gran variedad de procesos de soldaduras existentes para dicho fin.

Los LVDTs ordinarios pueden operar sobre una gama de temperaturas muy amplia, pero, si se requiere, podrán ser producidos para operar bajo temperaturas criogénicas, o, usando materiales especiales, operando a niveles elevados de radiación y temperaturas encontradas en muchos reactores nucleares.

Estabilidad del punto nulo.

La ubicación del punto nulo en los LVDTs es sumamente estable y constante, parejo sobre una amplia gama de temperatura de funcionamiento. Esto hace que un LVDT se desempeñe bien como un sensor de posición nula en sistemas de control de lazo cerrado y en instrumentos servobalanceados de alto rendimiento.

Rápida respuesta dinámica.

La ausencia de fricción durante la operación normal permite que un LVDT responda muy rápido a los cambios de posición del núcleo. La respuesta dinámica de un sensor LVDT está autolimitada solamente por los efectos inerciales de la masa delgada del

núcleo. Más frecuentemente, la respuesta de un sistema sensado LVDT es determinada por las características del acondicionador de señal.

Salida absoluta.

Un LVDT es un dispositivo de salida absoluta, a diferencia de un dispositivo de salida incremental. Esto significa que en caso de pérdida de alimentación, los datos de posición que son enviados desde el LVDT no se perderán. Cuando el sistema de medición es reiniciado, el valor de salida del LVDT será el mismo que tuvo antes del fallo de alimentación.



Figura 4.12: Aspecto de un sensor LVDT.

4.2 Electroimanes.

4.2.1 Introducción y repaso histórico.

Un electroimán es un tipo de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa dicha corriente. La principal ventaja de un electroimán sobre un imán permanente es que el campo magnético puede ser rápidamente manipulado en un amplio rango controlando la cantidad de corriente eléctrica. Sin embargo, se necesita una fuente continua de energía eléctrica para mantener el campo.

Cuando una corriente pasa por la bobina, pequeñas regiones magnéticas dentro del material, llamados dominios magnéticos, se alinean con el campo aplicado, haciendo que la fuerza del campo magnético aumente. Si la corriente se incrementa, todos los dominios terminarán alineándose, condición que se denomina saturación. Cuando el núcleo se satura, un mayor aumento de la corriente sólo provocará un incremento relativamente pequeño del campo magnético. En algunos materiales, algunos dominios

pueden realinearse por sí mismo. En este caso, parte del campo magnético original persistirá incluso después de que se retire la corriente, haciendo que el núcleo se comporte como un imán permanente. Este fenómeno, llamado remanencia, se debe a la histéresis del material. Aplicar una corriente alterna decreciente a la bobina, retirar el núcleo y golpearlo o calentarlo por encima de su punto de Curie reorientará los dominios, haciendo que el campo residual se debilite o desaparezca.

El primer electroimán fue inventado por el electricista británico William Sturgeon que lo exhibió el 23 de Mayo de 1825 en la Sociedad Británica de Oficios. El primer electroimán era un trozo de hierro con forma de herradura envuelto por una bobina enrollada sobre sí misma. Sturgeon demostró su potencia levantando 4 kg con un trozo de hierro de 200 g envuelto en cables por los que hizo circular la corriente de una batería. Sturgeon podía regular su electroimán, lo que supuso el principio del uso de la energía eléctrica en máquinas útiles y controlables, estableciendo los cimientos para las comunicaciones electrónicas a gran escala. Este dispositivo condujo a la invención del telégrafo, el motor eléctrico, y muchos otros dispositivos de base a la tecnología moderna. Era mucho más potente que los imanes naturales de igual peso y fue un logro admirable para aquellos tiempos.

Joule, discípulo de Sturgeon, haciendo experimentos con el primer imán de su maestro, logró aumentar la fuerza de sustentación hasta 20 Kg. Ese acontecimiento tuvo lugar en el mismo año 1825.

Sin embargo Sturgeon no estaba dispuesto a perder la primacía en la explotación de su invento. En 1830, por su encargo, se fabricó un electroimán ¡capaz de levantar 550 Kg!

Para aquel tiempo apareció en ultramar un adversario muy serio de Sturgeon. En abril de 1831, Henry, profesor de la Universidad de Yale (en cuyo honor se denominó la unidad de inductancia), construyó un electroimán que pesaba 300 Kg. y levantaba 1 Tm, aproximadamente. Todos aquellos imanes, según su diseño, eran barras en forma de herradura con alambre devanado. En noviembre de 1840 Joule creó un imán de construcción propia: un tubo de acero de paredes gruesas cortado a lo largo del eje por debajo del diámetro. La fuerza de sustentación de ese imán resultó muy grande: siendo el propio imán bastante compacto, levantaba 1,3 Tm.

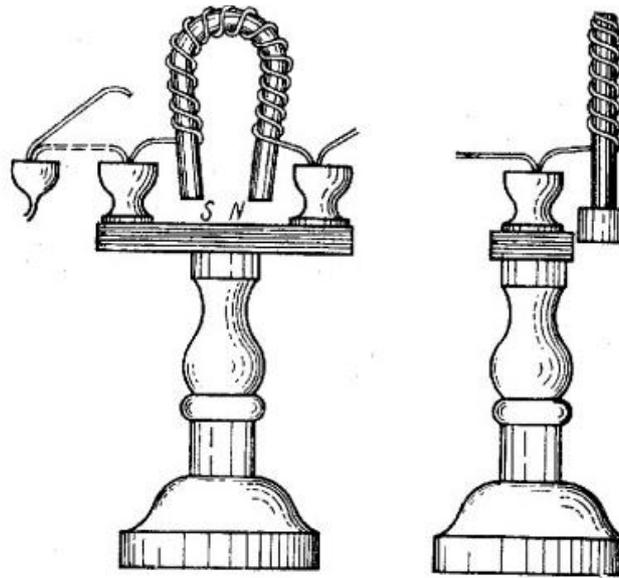


Figura 4.13: Primeros electroimanes construidos por el electricista inglés Sturgeon.

Al mismo tiempo, Joule diseñó un imán de construcción absolutamente nueva: la carga que se atraía estaba sometida a la acción no de dos polos, como siempre, sino de muchos más, lo que permitió aumentar considerablemente la sustentación. Ese imán pesaba 5,5 Kg. y mantenía en suspenso 1,2 Tm.

Los electroimanes aparecieron en gran número en laboratorios físicos, salones aristocráticos y consultorios médicos. Empezaron a utilizarlos incluso en fábricas de confección (en las máquinas) y en Sociedades filarmónicas (como elemento del "órgano magnético").

En 1869 los imanes se utilizaban ya ampliamente para el accionamiento de telares Jacquard y el punzonado de orificios en placas metálicas. Poco después de haberse construido unos cuantos imanes grandes más y todos se hayan convencido de que eran potentes, seguros, compactos y cómodos, se propuso utilizar los electroimanes para levantar piezas de hierro y de acero en fábricas metalúrgicas y de maquinado de metales.

En los años treinta de nuestro siglo se construyó uno de los imanes más grandes para un dispositivo por medio del cual se destruía la fundición defectuosa. En ese dispositivo se utilizaba como peso un martinete de hierro de 20 Tm. En este caso el electroimán tiene grandes ventajas, puesto que al llegar el momento de arrojar el martinete éste se suelta, girando simplemente un interruptor. Al poco tiempo se fabricaron imanes más grandes aún, capaces de levantar hasta 50 Tm. La potencia de los imanes crecía de forma muy acusada.

Sin embargo, hacer un imán, además bueno, potente y con las características necesarias, no es tarea fácil. En primer lugar, porque es necesario calcularlo correctamente y, tampoco esto, vino inmediatamente. Antes de que los electroimanes comenzaran a aplicarse ampliamente en la industria, en el transporte y, en otras muchas ramas, naturalmente fueron experimentados en laboratorios. Los primeros imanes fueron fabricados sin atender mucho a razones de cálculo. Y no cualquier forma daba resultados buenos. Fue una mera casualidad que Sturgeon hallase en su primer imán una

forma muy acertada, la de herradura, que aún siguen fabricándose actualmente. La falta de experiencia y de elementales métodos de cálculo de producción de imanes condujeron a que algunas de sus formas, que se fabricaban en aquel entonces, eran, desde el punto de vista actual, simplemente absurdas. Por ejemplo, un imán de tres barras no podría trabajar eficientemente, puesto que los flujos magnéticos de cada barra se oponen en sumo grado unos a otros: el flujo de una barra debe cerrarse por la segunda, en la cual actuará en sentido inverso al flujo propio de la segunda barra. Al modo de ver actual, resulta también inservible la construcción que antes se utilizaba muy frecuentemente, en la cual un imán se componía de tres imanes más pequeños, devanados por separado. Está claro que en los espacios entre esos imanes pequeños los campos magnéticos de dos barras contiguas se anularán recíprocamente. Los imanes de laboratorio de aquel período se fabricaban, como ya se ha comentado, sin atender a teorías o cálculos, pues no existía teoría alguna que pudiera pronosticar oportunamente las propiedades de los imanes.

El primer aporte a la teoría del imán lo hicieron E. Lenz y B. Yakobi científicos rusos, que señalaron la relación entre la sustentación del electroimán y el producto de la intensidad de la corriente en las bobinas por el número de espiras en éstas. Siguiendo a esos científicos, hicieron una gran aportación a la teoría del cálculo de imanes los hermanos Hopkinson, proponiendo el método de registrar la saturación, fenómeno que los proyectistas de imanes, habían notado desde hace tiempo. Este fenómeno consiste en que en un imán de forma determinada, después de cierto límite, ningún aumento de corriente en las bobinas puede aumentar su fuerza de sustentación.

La teoría moderna relaciona ese fenómeno con que al alcanzar cierto límite de corriente magnetizante, todos los imanes de hierro elementales diminutos, dispuestos antes desordenadamente, quedan orientados en un solo sentido. El aumento ulterior de la corriente magnetizante no eleva el número de pequeños imanes orientados en el mismo sentido. La saturación del acero conducía a que la intensidad del campo magnético de los primeros imanes no superara los 20 mil G.

Sobrevino la nueva era de incremento de la potencia de los imanes, pero no a expensas del aumento de sus dimensiones, sino a costa del perfeccionamiento de su forma y de la lucha contra la saturación. No se puede decir que esa lucha fuese muy exitosa. En cien años de intenso trabajo de los físicos en este tema, la inducción del campo magnético en los imanes aumentó apenas dos veces y media. ¿Qué podían oponer los físicos a la naturaleza? Únicamente registrar con gran exactitud y aprovechar en plena medida las propiedades naturales de los materiales. Y he aquí, aparecen imanes con polos cónicos muy cortos, culatas macizas y enormes bobinas.

Posteriormente los imanes comenzaron a aumentar rápidamente de peso, principalmente, debido al aumento del peso de las bobinas. Si en 1881, el imán de laboratorio más grande del mundo, pesaba cerca de 1 Tm, en 1930, su peso ascendió ya a 120 Tm. No obstante, ni por ese procedimiento se lograría aumentar la inducción de los electroimanes digamos, hasta 1 millón de F. Incluso hoy día, tal campo es una utopía.

4.2.2 Tipos de electroimanes.

Son muy distintos los tipos de electroimanes que se pueden encontrar hoy en día, así como las clasificaciones que en torno a ellos se pueden realizar.

En lo que respecta a grandes electroimanes, utilizados casi exclusivamente en el sector industrial, las formas son muy diversas, aunque cabe destacar las formas circular y rectangular. Pueden alcanzar medidas de hasta varios metros, y dependiendo de las aplicaciones se pueden encontrar, entre otros, electroimanes:

Pesados. Normalmente empleados en siderurgia.

Livianos. Muy utilizados en depósitos de chatarra.

Especiales para materiales calientes con cámara de convección térmica inferior.

Construcción soldada o abulonada.

Su uso principal es el movimiento de distintos elementos como: lingotes, tochos, planchones, bobinas de chapa, chatarra, matrices, bola trituradora, palanquilla, rieles, caños, vigas, etc., de cualquier tamaño y peso.

Sus ventajas son numerosas:

Economía de costos al reducir mano de obra.

Aumento de producción.

Seguridad en la manipulación de las piezas.

Manejo rápido de las cargas.

Accionamiento sencillo.

Gran versatilidad, que los hace adaptables a todo uso y lugar.

Alimentación desde fuentes trifásicas de C.C., motogeneradores o dínamos.

Trabajo continuo hasta jornadas de 24 horas.

Mínimo mantenimiento.

Larga vida útil.



Figura 4.14: Electroimán circular especialmente diseñado para el manejo y manutención de piezas unitarias.

Por su parte, los pequeños electroimanes, a diferencia de los grandes electroimanes alimentados normalmente con c.a. (corriente alterna), suelen alimentarse con c.c. (corriente continua) y presentan un consumo considerablemente menor. Sus aplicaciones son también muy diversas, entre las que cabe destacar:

Uso en laboratorios.
 Aparatos de medición precisos.
 Pequeñas electroválvulas de bajo consumo y poco caudal.
 Relés.
 Cierre de puertas.
 Timbres.
 Telégrafo.

4.3 Otros modos de utilización del electromagnetismo en electroimanes.

A continuación se consideró interesante la explicación de otros modos de utilización del electromagnetismo en electroimanes.

4.3.1 Relé.

4.3.1.1 Descripción.

El relé o relevador es un dispositivo electromecánico. Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Fue inventado por Joseph Henry en 1835. Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, como un amplificador eléctrico. Como tal se emplearon en telegrafía, haciendo la función de repetidores que generaban una nueva señal con corriente procedente de pilas locales a partir de la señal débil recibida por la línea.

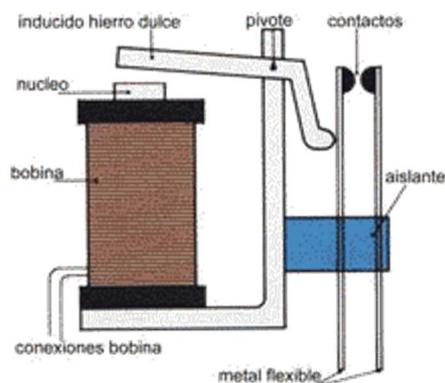


Figura 4.15: Se presenta el esquema básico de un relé

Los elementos de un relé son los siguientes:

El circuito de excitación formado por un electroimán encargado de crear un campo magnético, una armadura fija (soporte) y una armadura móvil.

El circuito de conmutación está formado por varias láminas metálicas que pueden abrir y cerrar distintos circuitos eléctricos.

4.3.1.2 Tipos de Relés.

Existen multitud de tipos distintos de relés, dependiendo del número de contactos, de la intensidad admisible por los mismos, tipo de corriente de accionamiento, tiempo de activación y desactivación, etc. Cuando controlan grandes potencias se les llama contactores en lugar de relés.

Relés de tipo armadura.

Pese a ser los más antiguos siguen siendo los más utilizados en multitud de aplicaciones. Un electroimán provoca la basculación de una armadura al ser excitado, cerrando o abriendo los contactos dependiendo de si es NA o NC.

Relés de núcleo móvil.

A diferencia del anterior modelo estos están formados por un émbolo en lugar de una armadura. Debido su mayor fuerza de atracción, se utiliza un solenoide para cerrar sus contactos. Es muy utilizado cuando hay que controlar altas corrientes.

Relé tipo red o de lengüeta.

Están constituidos por una ampolla de vidrio, con contactos en su interior, montados sobre delgadas láminas de metal. Estos contactos conmutan por la excitación de una bobina, que se encuentra alrededor de la mencionada ampolla.

Relés polarizados o biestables.

Se componen de una pequeña armadura, solidaria a un imán permanente. El extremo inferior gira dentro de los polos de un electroimán, mientras que el otro lleva una cabeza de contacto. Al excitar el electroimán, se mueve la armadura y provoca el cierre de los contactos. Si se polariza al revés, el giro será en sentido contrario, abriendo los contactos o cerrando otro circuito.

Relé de estado sólido.

Se llama relé de estado sólido a un circuito híbrido, normalmente compuesto por un optoacoplador que aísla la entrada, un circuito de disparo, que detecta el paso por cero de la corriente de línea y un triac o dispositivo similar que actúa de interruptor de potencia. Su nombre se debe a la similitud que presenta con un relé electromecánico; este dispositivo es usado generalmente para aplicaciones donde se presenta un uso continuo de los contactos del relé que en comparación con un relé convencional generaría un serio desgaste mecánico, además de poder conmutar altos amperajes que en el caso del relé electromecánico destruirían en poco tiempo los contactos. Estos relés permiten una velocidad de conmutación muy superior a la de los relés electromecánicos.

Relé de corriente alterna.

Cuando se excita la bobina de un relé con corriente alterna, el flujo magnético en el circuito magnético, también es alterno, produciendo una fuerza pulsante, con frecuencia doble, sobre los contactos. Es decir, los contactos de un relé conectado a la red, en

algunos lugares, como varios países de Europa y Latinoamérica oscilarán a 50 Hz y en otros, como en Estados Unidos lo harán a 60 Hz. Este hecho se aprovecha en algunos timbres y zumbadores, como un activador a distancia. En un relé de corriente alterna se modifica la resonancia de los contactos para que no oscilen.

Relé de láminas.

Este tipo de relé se utilizaba para discriminar distintas frecuencias. Consiste en un electroimán excitado con la corriente alterna de entrada que atrae varias varillas sintonizadas para resonar a sendas frecuencias de interés. La varilla que resuena acciona su contacto; las demás, no. El desarrollo de la microelectrónica y los PLL integrados ha relegado estos componentes al olvido.

Los relés de láminas se utilizaron en aeromodelismo y otros sistemas de telecontrol.

4.3.1.3 Ventajas de su utilización.

La gran ventaja de los relés electromagnéticos es la completa separación eléctrica entre la corriente de accionamiento, la que circula por la bobina del electroimán, y los circuitos controlados por los contactos, lo que hace que se puedan manejar altos voltajes o elevadas potencias con pequeñas tensiones de control. También ofrecen la posibilidad de control de un dispositivo a distancia mediante el uso de pequeñas señales de control

4.3.2 Telégrafo.

El telégrafo es un dispositivo de telecomunicación destinado a la transmisión de señales a distancia. El de más amplio uso a lo largo del tiempo ha sido el telégrafo eléctrico, aunque también se han utilizado telégrafos ópticos de diferentes formas y modalidades funcionales.

4.3.2.1 Historia.

El 6 de mayo de 1833, el matemático, astrónomo y físico alemán Johann Carl Friedrich Gauss y su colega, Wilhelm Eduard Weber, instalaron una línea telegráfica de 1000 metros de longitud sobre los tejados de la población alemana de Göttingen donde ambos trabajaban, uniendo la universidad con el observatorio astronómico. Este dispositivo fue inventado por el estadounidense Samuel Morse en 1832. Al principio, el sistema carecía de un código para la comunicación, pero pronto ambos crearon un alfabeto basado en la amplitud de las señales dándole así una verdadera capacidad de comunicación a su invento.

4.3.2.2 Funcionamiento.

Cuando en la estación emisora se cierra el interruptor, comúnmente llamado manipulador, circula una corriente desde la batería eléctrica hasta la línea y el electroimán, lo que hace que sea atraída una pieza metálica terminada en un punzón que presiona una tira de papel, que se desplaza mediante unos rodillos de arrastre, movidos por un mecanismo de relojería, sobre un cilindro impregnado de tinta, de tal forma que, según la duración de la pulsación del interruptor, se traducirá en la impresión de un

punto o una raya en la tira de papel. La combinación de puntos y rayas en el papel se puede traducir en caracteres alfanuméricos mediante el uso de un código convenido, en la práctica el más utilizado durante muchos años ha sido el código Morse.

Posteriores mejoras de los dispositivos emisores y transmisores han permitido la transmisión de mensajes de forma más rápida, sin necesidad de recurrir a un manipulador y a la traducción manual del código, así como el envío simultáneo de más de una transmisión por la misma línea. Uno de estos dispositivos telegráficos avanzados es el teletipo, cuyo modelo inicial era una máquina de escribir especial que transmitía como señales eléctricas las pulsaciones sobre un teclado, mientras imprimía sobre un rollo de papel o hacía perforaciones en una cinta también hecha de papel. Las formas más modernas de esta máquina se fabricaron con un monitor o pantalla en lugar de una impresora. El sistema todavía es utilizado por personas sordas o con serias discapacidades auditivas, a fin de enviar mensajes de texto sobre la red telefónica.

4.4 Fuente eléctrica.

Lo primero de todo es tener claro el concepto de fuente como al elemento activo que es capaz de generar una diferencia de potencial (d. d. p.) entre sus bornes o proporcionar una corriente eléctrica.

4.4.1 Clasificación.

4.4.1.1 Fuentes ideales.

Las fuentes ideales son elementos utilizados en la teoría de circuitos para el análisis y la creación de modelos que permitan analizar el comportamiento de componentes electrónicos o circuitos reales. Pueden ser independientes, si sus magnitudes son siempre constantes, o dependientes en el caso de que dependan de otra magnitud (tensión o corriente).

En este punto se tratarán las fuentes independientes, dejando las dependientes para el final. A continuación se dan sus definiciones:

Fuente de tensión ideal.

Aquella que genera una diferencia de potencial entre sus terminales constante e independiente de la carga que alimente. Si la resistencia de carga es infinita se dirá que la fuente está en circuito abierto, y si fuese cero estaríamos en un caso absurdo, ya que según su definición una fuente de tensión ideal no puede estar en cortocircuito.

Fuente de intensidad ideal.

Aquella que proporciona una intensidad constante e independiente de la carga que alimente. Si la resistencia de carga es cero se dirá que la fuente está en cortocircuito, y si fuese infinita estaríamos en un caso absurdo, ya que según su definición una fuente de intensidad ideal no puede estar en circuito abierto.

4.4.1.2 Fuentes reales.

A diferencia de las fuentes ideales, la diferencia de potencial que producen o la corriente que proporcionan fuentes reales, depende de la carga a la que estén conectadas.

Fuentes de tensión.

Una fuente de tensión real se puede considerar como una fuente de tensión ideal, en serie con una resistencia, a la que se denomina resistencia interna de la fuente.

En la práctica las cargas deberán ser mucho mayores que la resistencia interna de la fuente (al menos diez veces) para conseguir que el valor en sus bornes no difiera mucho del valor en circuito abierto.

La potencia se determina multiplicando su fuerza electromotriz por la corriente que proporciona. Se considera positiva si la corriente sale por el ánodo y negativa en caso contrario.

Como ejemplos de fuentes de tensión real se pueden enumerar los siguientes:

Baterías.

Pilas.

Fuentes de alimentación.

Células fotoeléctrica.

Fuentes de intensidad.

Una fuente de corriente real se puede considerar como una fuente de intensidad ideal, en paralelo con una resistencia, R_s , a la que se denomina resistencia interna de la fuente. En cortocircuito, la corriente que proporciona es igual a I_s , pero si se conecta una carga, R_L , la corriente proporcionada a la misma, I_L , pasa a ser:

En la práctica las cargas deberán ser mucho menores que la resistencia interna de la fuente (al menos diez veces) para conseguir que la corriente suministrada no difiera mucho del valor en cortocircuito.

La potencia se determina multiplicando su intensidad por la diferencia de potencial en sus bornes. Se considera positiva si el punto de mayor potencial está en el terminal de salida de la corriente y negativa en caso contrario.

Al contrario que la fuente de tensión real, la de intensidad no tiene una clara realidad física, utilizándose más como modelo matemático equivalente a determinados componentes o circuitos.

4.4.2 Asociación de fuentes.

Un circuito puede tener una o varias fuentes conectadas en serie, paralelo o de forma mixta. Ahora esa asociación equivale a una sola fuente, para hallar esa equivalencia tenemos diferentes teoremas que nos ayudan a calcularlas.

4.4.2.1 Ideales.

Cuando dos o más fuentes ideales de tensión se conectan en serie, la fem (a partir de ahora, fuerza electromotriz) resultante es igual a la suma algebraica de las fems de cada una de las fuentes. Cuando la conexión se realiza en paralelo, las fems de las fuentes han de ser iguales, ya que en caso contrario se estaría en un caso absurdo.

Cuando dos o más fuentes ideales de intensidad se conectan en paralelo, la corriente resultante es igual a la suma algebraica de las corrientes de cada una de las fuentes. Cuando la conexión se realiza en serie, las corrientes de las fuentes han de ser iguales, ya que en caso contrario se estaría en un caso absurdo.

4.4.2.2 Reales.

Es posible obtener la fuente equivalente de una asociación de varias fuentes reales. A continuación se describen los casos posibles:

Fuentes de tensión.

En serie.

La fuerza electromotriz equivalente se obtiene del mismo modo que en las fuentes ideales y la resistencia equivalente como suma de las resistencias de cada fuente puesto que están en serie.

En paralelo.

Se transforman en fuentes de intensidad y se opera como se indica más abajo.

Fuentes de intensidad.

En serie.

Se transforman en fuentes de tensión y se opera como se ha indicado más arriba.

En paralelo.

La intensidad equivalente se obtiene del mismo modo que en las fuentes ideales y la resistencia equivalente como la inversa de la suma de las inversas de las resistencias de cada fuente puesto que están en paralelo.

Fuente equivalente.

Mediante la transformación de fuentes y la simplificación, es posible obtener en determinados circuitos, la fuente de tensión o intensidad equivalente respecto de dos puntos del mismo. Esto es lo mismo que proporcionan los teoremas de Thevenin y Norton respectivamente.

4.5 Nuestra fuente de intensidad.

Como mejora del proyecto se propuso necesario implementar una fuente de intensidad que alimente a la maqueta.

Se procede a explicar los materiales que se utilizarán para su construcción así como la metodología de trabajo seguida.

Se vio necesario la búsqueda de un amplificador operacional adecuado que diera las especificaciones que se pedían a la maqueta.

Antes de todo, se debería conocer el mundo de los operacionales y conocer un poco de ellos.

4.5.1 Operacionales.

4.5.1.1 Definición.

Un amplificador operacional es un circuito electrónico (normalmente se presenta como circuito integrado) que tiene dos entradas y una salida. La salida es la diferencia de las dos entradas multiplicada por un factor (G) (ganancia)

$$V_{out} = G \cdot (V_+ - V_-)$$

El primer amplificador operacional monolítico, que data de los años 1960, fue el Fairchild $\mu A702$ (1964), diseñado por Bob Widlar. Le siguió el Fairchild $\mu A709$ (1965), también de Widlar, y que constituyó un gran éxito comercial. Más tarde sería sustituido por el popular Fairchild $\mu A741$ (1968), de David Fullagar, y fabricado por numerosas empresas, basado en tecnología bipolar.

Originalmente los amplificadores operacionales se empleaban para operaciones matemáticas (suma, resta, multiplicación, división, integración, derivación, etc.) en calculadoras analógicas. De ahí su nombre.

El amplificador operacional ideal tiene una ganancia infinita, una impedancia de entrada infinita, un ancho de banda también infinito, una impedancia de salida nula, un tiempo de respuesta nulo y ningún ruido. Como la impedancia de entrada es infinita también se dice que las corrientes de entrada son cero.

4.5.1.2 Notación.

El símbolo de un amplificador es el mostrado en la figura 4.16.

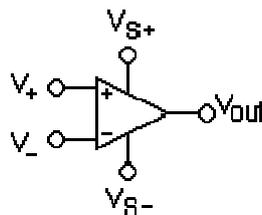


Figura 4.16: Símbolo de un amplificador.

Los terminales son:

V+	Entrada no inversora.
V-	Entrada inversora.
VOUT	Salida.
VS+	Alimentación positiva.
VS-	Alimentación negativa.

Figura 4.17: Tabla de correspondencia entre las distintas patillas y su función.

Los terminales de alimentación pueden recibir diferentes nombres, por ejemplo en los amplificadores operacionales basados en FET V_{DD} y V_{SS} respectivamente. Para los basados en BJT son V_{CC} y V_{EE} .

Normalmente los pines de alimentación son omitidos en los diagramas eléctricos por claridad.

4.5.2 Características Ideales y Reales.

Parámetro	Valor ideal	Valor real
Z_i	∞	1 M Ω
Z_o	Φ	100 Ω
Bw	∞	1 MHz
A_v	∞	100.000
A_c	Φ	

Figura 4.18: Tabla de características ideales y reales. Los valores reales dependen del modelo, estos valores son genéricos y son una referencia. Si van a usarse amplificadores operacionales, es mejor consultar el datasheet o características del fabricante.

4.5.3 Comportamiento en corriente continua (DC).

4.5.3.1 Lazo abierto.

Si no existe realimentación la salida del A. O. será la resta de sus dos entradas multiplicada por un factor. Este factor suele ser del orden de 100.000 (que se considerará infinito en cálculos con el componente ideal). Por lo tanto si la diferencia entre las dos tensiones es de 1V la salida debería ser 100.000V. Debido a la limitación que supone no poder entregar más tensión de la que hay en la alimentación, el A. O. estará saturado si se da este caso. Esto será aprovechado para su uso en comparadores, como se verá más adelante. Si la tensión más alta es la aplicada a la patilla + la salida será la que corresponde a la alimentación V_{S+} , mientras que si la tensión más alta es la del pin - la salida será la alimentación V_{S-} .

4.5.3.2 Lazo cerrado o realimentado.

Se conoce como lazo cerrado a la realimentación en un circuito. Aquí se supondrá realimentación negativa. Para conocer el funcionamiento de esta configuración se parte de las tensiones en las dos entradas exactamente iguales, se supone que la tensión en la pata + sube y, por tanto, la tensión en la salida también se eleva. Como existe la realimentación entre la salida y la pata -, la tensión en esta pata también se eleva, por tanto la diferencia entre las dos entradas se reduce, disminuyéndose también la salida. Este proceso pronto se estabiliza, y se tiene que la salida es la necesaria para mantener las dos entradas, idealmente, con el mismo valor.

Siempre que hay realimentación negativa se aplican estas dos aproximaciones para analizar el circuito:

$$V_+ = V_- \text{ (lo que se conoce como principio del cortocircuito virtual).}$$

$$I_+ = I_- = 0$$

Cuando se realimenta negativamente un amplificador operacional, al igual que con cualquier circuito amplificador, se mejoran algunas características del mismo como una mayor impedancia en la entrada y una menor impedancia en la salida. La mayor impedancia de entrada da lugar a que la corriente de entrada sea muy pequeña y se reducen así los efectos de las perturbaciones en la señal de entrada. La menor impedancia de salida permite que el amplificador se comporte como una fuente eléctrica de mejores características. Además, la señal de salida no depende de las variaciones en la ganancia del amplificador, que suele ser muy variable, sino que depende de la ganancia de la red de realimentación, que puede ser mucho más estable con un menor coste. Asimismo, la frecuencia de corte superior es mayor al realimentar, aumentando el ancho de banda.

Asimismo, cuando se realiza realimentación positiva (conectando la salida a la entrada no inversora a través de un cuadripolo determinado) se buscan efectos muy distintos. El más aplicado es obtener un oscilador para el generar señales oscilantes.

4.5.4 Comportamiento en corriente alterna (AC).

En principio la ganancia calculada para continua puede ser aplicada para alterna, pero a partir de ciertas frecuencias aparecen limitaciones. (Ver sección de limitaciones). Para analizar un circuito en el que haya un operacional puede usarse cualquier método, pero uno habitual es:

Comprobar si tiene realimentación negativa.

Si tiene realimentación negativa se pueden aplicar las reglas del apartado anterior.

Definir las corrientes en cada una de las ramas del circuito.

Aplicar el método de los nodos en todos los nodos del circuito excepto en los de salida de los amplificadores (porque en principio no se puede saber la corriente que sale de ellos).

Aplicando las reglas del apartado 2 resolver las ecuaciones para despejar la tensión en los nodos donde no se conozca..

4.5.4.1 Comparador.

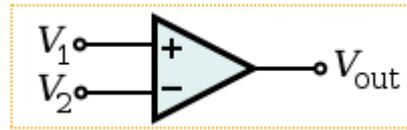


Figura 4.19: Esquema de un amplificador comparador.

Esta es una aplicación sin la retroalimentación. Compara entre las dos entradas y saca una salida en función de qué entrada sea mayor. Se puede usar para adaptar niveles lógicos.

$$V_{out} = \begin{cases} V_{S+} & V_1 > V_2 \\ V_{S-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$

4.5.4.2 Seguidor.

Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada. Se usa como un buffer, para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa) Como la tensión en las dos patillas de entradas es igual:

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{in} \\ Z_{in} &= \infty \end{aligned}$$

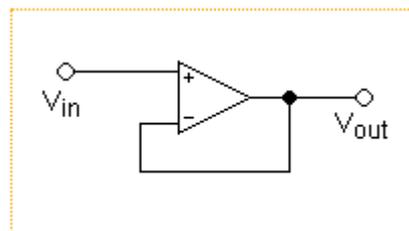


Figura 4.20: Esquema de un seguidor de tensión.

Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevadísima, la de salida prácticamente nula, y puede ser útil, por ejemplo, para poder leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición. De hecho, es un circuito muy recomendado para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor, la corriente pasa tanto por el sensor como por el voltímetro y la tensión a la entrada del voltímetro dependerá de la relación entre la resistencia del voltímetro y la resistencia del resto del conjunto formado por sensor, cableado y conexiones.

Por ejemplo, si la resistencia interna del voltímetro es R_e (entrada del amplificador), la resistencia de la línea de cableado es R_l y la resistencia interna del sensor es R_g , entonces la relación entre la tensión medida por el voltímetro (V_e) y la tensión generada

por el sensor (V_g) será la correspondiente a este divisor de tensión:

$$V_e = \frac{R_e}{R_g + R_l + R_e} \cdot V_g$$

Por ello, si la resistencia de entrada del amplificador es mucho mayor que la del resto del conjunto, la tensión a la entrada del amplificador será prácticamente la misma que la generada por el sensor y se podrá despreciar la caída de tensión en el sensor y el cableado.

Además, cuanto mayor sea la intensidad que circula por el sensor, mayor será el calentamiento del sensor y del resto del circuito por efecto Joule, lo cual puede afectar a la relación entre la tensión generada por el sensor y la magnitud medida.

4.5.4.3 Inversor.

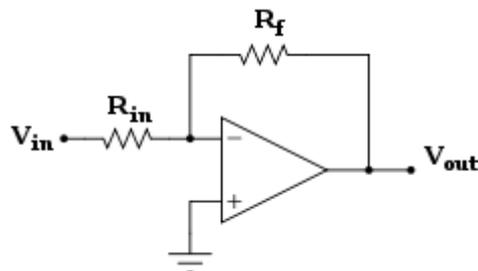


Figura 4.21: Esquema de un Inversor.

Se denomina inversor ya que la señal de salida es igual a la señal de entrada (en forma) pero con la fase invertida 180 grados.

El análisis de este circuito es el siguiente:

$$V_+ = V_- = 0$$

Definiendo corrientes:

$$\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = -\frac{V_{out} - 0}{R_f}$$

Y de aquí se puede despejar:

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}}$$

Para el resto de circuitos el análisis es similar.

$$Z_{in} = R_{in}$$

Por lo cual se puede controlar la impedancia de entrada mediante la elección de R_{in} . Esta configuración es una de las más importantes, porque gracias a esta configuración, se puede elaborar otras configuraciones, como la configuración del derivador, integrador, sumador. En sistemas microelectrónicos se puede utilizar como buffer, poniendo 2 en cascada.

4.5.4.4 No inversor.

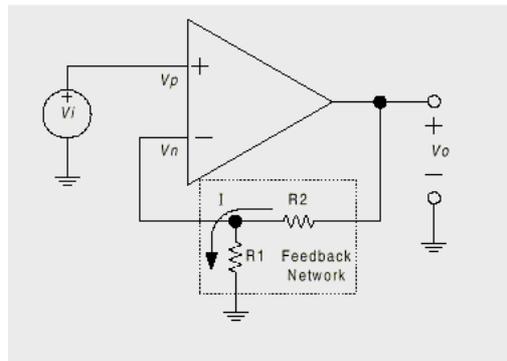


Figura 4.22: Esquema de un circuito no inversor.

Como se puede observar, el voltaje de entrada, ingresa por el pin positivo, pero como se conoce que la ganancia del amplificador operacional es muy grande, el voltaje en el pin positivo es igual al voltaje en el pin negativo, conociendo el voltaje en el pin negativo se puede calcular, la relación que existe entre el voltaje de salida con el voltaje de entrada haciendo uso de un pequeño divisor de tensión.

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$Z_{in} = \infty$, lo cual nos supone una ventaja frente al amplificador inversor.

4.5.4.5 Sumador inversor.

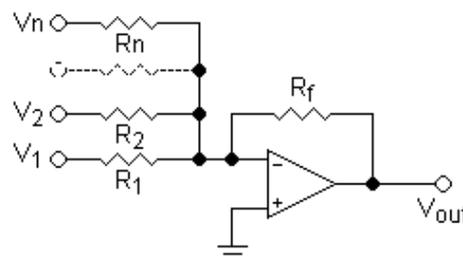


Figura 4.23: Esquema de un Sumador inversor.

Para resistencias independientes R_1, R_2, \dots, R_n

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

La expresión se simplifica bastante si se usan resistencias del mismo valor.
Impedancias de entrada:

$$Z_n = R_n$$

4.5.4.6 Restador.

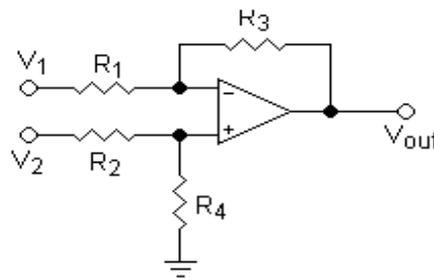


Figura 4.24: Esquema de un restador.

Para resistencias independientes R_1 , R_2 , R_3 , R_4 :

$$V_{out} = V_2 \left(\frac{(R_3 + R_1) R_4}{(R_4 + R_2) R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

Igual que antes esta expresión puede simplificarse con resistencias iguales.

La impedancia diferencial entre dos entradas es

$$Z_{in} = R_1 + R_2$$

Cabe destacar que este tipo de configuración tiene una resistencia de entrada baja en comparación con otro tipo de restadores como por ejemplo el amplificador de instrumentación.

4.5.4.7 Integrador ideal.

Integra e invierte la señal (V_{in} y V_{out} son funciones dependientes del tiempo).

$$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{RC} dt + V_{inicial}$$

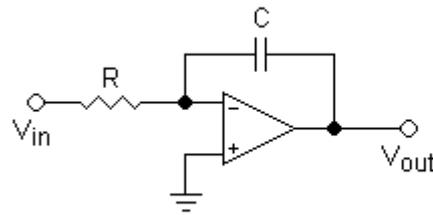


Figura 4.25: Esquema de un circuito Integrador ideal.

$V_{inicial}$ es la tensión de salida en el origen de tiempos.

Nota: El integrador no se usa en la práctica de forma discreta ya que cualquier señal pequeña de DC en la entrada puede ser acumulada en el capacitor hasta saturarlo por completo. Este circuito se usa de forma combinada en sistemas retroalimentados que son modelos basados en variables de estado (valores que definen el estado actual del sistema) donde el integrador conserva una variable de estado en el voltaje de su capacitor.

4.5.4.8 Derivador ideal.

Deriva e invierte la señal respecto al tiempo, este circuito también se usa como filtro.

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

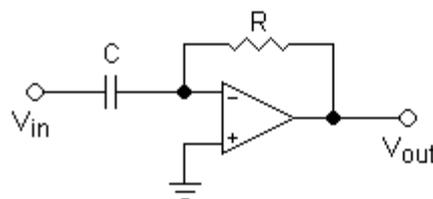


Figura 4.26: Se presenta el esquema básico de un relé

NOTA: Es un circuito que no se utiliza en la práctica porque no es estable. Esto se debe a que al amplificar más las señales de alta frecuencia se termina amplificando mucho el ruido.

4.5.4.9 Conversor de corriente a voltaje.

El conversor de corriente a voltaje, se conoce también como Amplificador de transimpedancia, llegada a este una corriente (I_{in}), la transforma en un voltaje proporcional a esta, con una impedancia de entrada muy baja, ya que esta diseñado para trabajar con una fuente de corriente.

Con el resistor R como factor de proporcionalidad, la relación resultante entre la corriente de entrada y el voltaje de salida es:

$$V_{out} = -R \cdot I_{in}$$

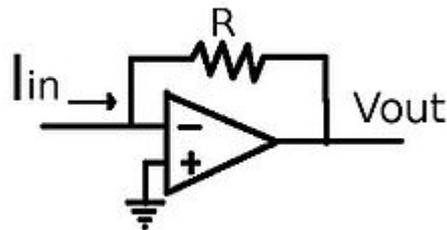


Figura 4.27: Esquema de un conversor de corriente a voltaje.

4.5.4.10 Función exponencial y logarítmica.

El logaritmo y su función inversa, la función exponencial, son ejemplos también de configuraciones no lineales, las cuales aprovechan el funcionamiento exponencial del diodo, logrando una señal de salida proporcional al logaritmo o a la función exponencial a la señal de entrada.

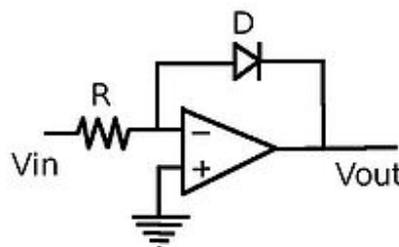


Figura 4.28: Esquema de un circuito exponencial

La señal de entrada, desarrollara una corriente proporcional al logaritmo de su valor en el diodo en aproximación. Ello en conjunto con la resistencia de salida R , la dependencia de la tensión de salida (V_{out}) como producto de la tensión de entrada (V_{in}) es:

$$V_{out} = -m \cdot \ln \left(\frac{V_{in}}{n \cdot R} \right)$$

Los factores n y m , son factores de corrección, que se determinan por la temperatura y de los parámetros de la ecuación del diodo.

Para lograr la potenciación, simplemente se necesita cambiar la posición del diodo y de la resistencia, para dar lugar a una nueva ecuación, esta ecuación también acompañada por los factores de corrección n y m , muestra la siguiente dependencia de la tensión de salida con relación a la de entrada:

$$V_{out} = -n \cdot R \cdot e^{\frac{V_{in}}{m}}$$

4.5.4.11 Otros.

Existe más variedad de amplificadores operacionales pero que no entraremos en detalle, algunos de ellos son:

Osciladores

Convertidores carga-tensión

Filtros activos

Girador permite construir convertidores de inmitancias (simular un inductor empleando un condensador, por ejemplo).

4.5.5 Aplicaciones.

Calculadoras analógicas

Filtros

Preamplificadores y buffers de audio y video

Reguladores

Conversores

Evitar el efecto de carga

Adaptadores de niveles (por ejemplo CMOS y TTL).

4.5.6 Limitaciones.

Saturación

Un Amplificador operacional típico no puede suministrar más de la tensión a la que se alimenta, normalmente el nivel de saturación es del orden del 90% del valor con que se alimenta. Cuando se da este valor se dice que satura, pues ya no está amplificando. La saturación puede ser aprovechada por ejemplo en circuitos comparadores.

Un concepto asociado a éste es el Slew rate.

Tensión de offset

Es la diferencia de tensión que se obtiene entre los dos pines de entrada cuando la tensión de salida es nula, este voltaje es cero en un amplificador ideal lo cual no se obtiene en un amplificador real. Esta tensión puede ajustarse a cero por medio del uso de las entradas de offset (solo en algunos modelos de operacionales) en caso de querer

precisión. El offset puede variar dependiendo de la temperatura (T) del operacional como sigue:

$$V_{OFFSET} = V_{OFFSET}(T_0) + \frac{\Delta V_{OFFSET}}{\Delta T}(T - T_0)$$

Donde T_0 es una temperatura de referencia.

Un parámetro importante, a la hora de calcular las contribuciones a la tensión de offset en la entrada de un operacional es el CMRR (Rechazo al modo común).

Ahora también puede variar dependiendo de la alimentación del operacional, a esto se le llama PSRR (power supply rejection ratio, relación de rechazo a la fuente de alimentación). La PSRR es la variación del voltaje de offset respecto a la variación de los voltajes de alimentación, expresada en dB. Se calcula como sigue:

$$PSRR = -20 \log PSRR = -20 \log \left(\frac{\Delta V_{OFFSET}}{\Delta V_{CC}} \right)$$

Corrientes

Aquí hay dos tipos de corrientes que considerar y que los fabricantes suelen proporcionar:

$$I_{OFFSET} = |I_+ - I_-|$$

$$I_{BIAS} = \frac{I_+ + I_-}{2}$$

Idealmente ambas deberían ser cero.

4.5.7 Característica tensión-frecuencia.

Al Amplificador operacional típico también se le conoce como amplificador realimentado en tensión (VFA). En él hay una importante limitación respecto a la frecuencia: El producto de la ganancia en tensión por el ancho de banda es constante.

Como la ganancia en lazo abierto es del orden de 100.000 un amplificador con esta configuración sólo tendría un ancho de banda de unos pocos Hercios. Al realimentar negativamente se baja la ganancia a valores del orden de 10 a cambio de tener un ancho de banda aceptable. Existen modelos de diferentes A.O. para trabajar en frecuencias superiores, en estos amplificadores prima mantener las características a frecuencias más altas que el resto, sacrificando a cambio un menor valor de ganancia u otro aspecto técnico.

4.5.8 Capacidades.

El Amplificador operacional presenta capacidades (capacitancias) parásitas, las cuales producen una disminución de la ganancia conforme se aumenta la frecuencia.

4.5.9 Deriva térmica.

Debido a que una unión semiconductor varía su comportamiento con la temperatura, los Amplificadores operacionales también cambian sus características, en este caso hay que diferenciar el tipo de transistor en el que está basado, así las corrientes anteriores variarán de forma diferente con la temperatura si son bipolares o JFET.

4.6 Diseño de la fuente de intensidad.

Para la mejora del proyecto existente cabe destacar el diseño de una fuente de intensidad para no depender de una fuente de intensidad del laboratorio.

Esta mejora haría que nuestra maqueta sea portable al no depender de una fuente de intensidad en un laboratorio enchufada a una fuente de corriente alterna.

Se ha estado sopesando cómo se podría construir cumpliendo con las exigencias que nos pide la maqueta y los límites que se tienen de voltaje de entrada que oscila entre los 0V - 5V para dar en la medida de lo posible una intensidad de aproximadamente 1 Amperio que circule por nuestra bobina y que será la que genere el campo magnético necesario para hacer levitar la bola.

En el mercado se encuentran multitud de alternativas para llevar a cabo tal fin pero no todas ni son las más eficientes ni las más económicas.

Las exigencias de nuestra fuente son que con una entrada oscilante de 0 V a 5 V proporcione aproximadamente 1 A de intensidad a la salida que es lo que se necesita.

Fuente de intensidad

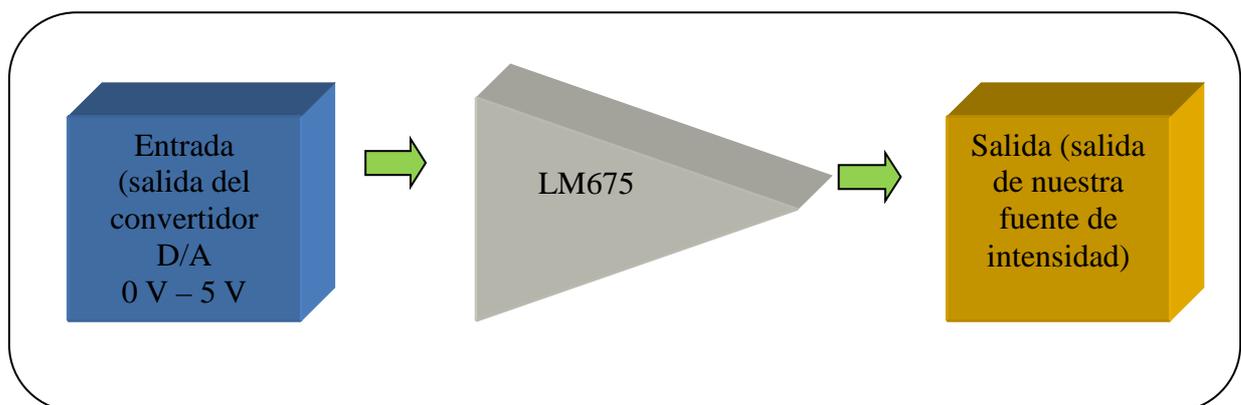


Figura 4.29: Diagrama de nuestra fuente de intensidad, donde se pueden apreciar sus componentes principales.

En la figura 4.29 se puede observar que la entrada del operacional LM675 es la salida del convertidor Digital – Analógico con un rango de respuesta de 0 a 5 V , se configurará el convertidor de modo que su salida y posterior entrada al operacional , este último responda con los valores de intensidad de corriente conformes al buen funcionamiento de la maqueta.

4.6.1 El operacional LM675.

Anteriormente ya se habló de los operacionales y sus características básicas así como los diferentes tipos. Para el proyecto se necesita el operacional LM675 cuyo datasheet se adjunta al final del proyecto.

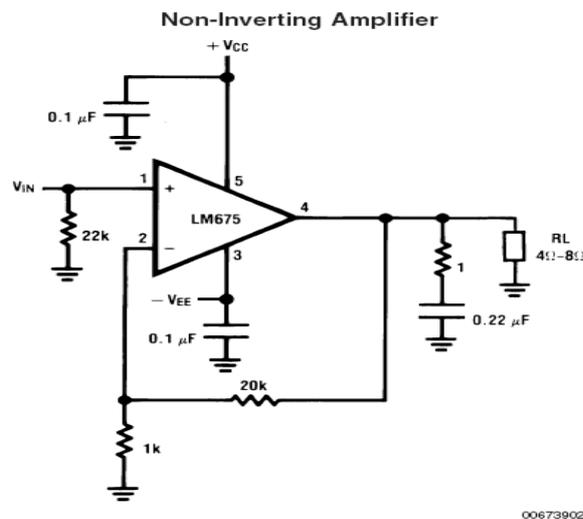


Figura 4.30: Esquema del circuito a implementar con el operacional LM675.

Se puede observar la necesidad de distintos componentes como es el caso de resistencias y condensadores con los valores que se presentan en la figura 4.29 para su correcto funcionamiento. Este es el circuito que habría que implementar junto al operacional, donde los números que aparecen son las respectivas patillas que vienen numeradas del 1 al 5.

El aspecto externo del operacional es el que se presenta en la figura 4.30, donde se pueden apreciar las distintas patillas que habrá que conectar a cada parte del circuito de la figura 4.29.

Connection Diagram

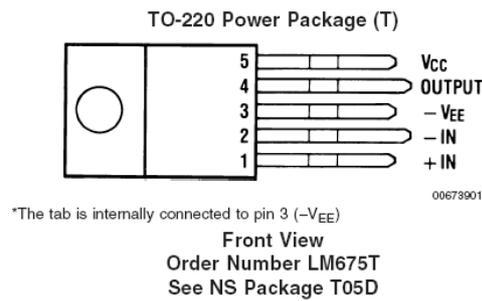


Figura 4.31: Aspecto externo del operacional.

4.6.2 Rasgos característicos.

En este apartado se detalla las características del operacional utilizado, así como una tabla de valores de funcionamiento típicos.

Se presenta una tabla con los valores de funcionamiento a modo de resumen, de todos modos, se puede ver con más detalle en el datasheet.

Parámetros	Valores
Corriente salida máxima	4000 mA
Offset voltaje máximo 25 C	10 mV
Ganancia de ancho de banda	5.5 MHz
Alimentación mínima	10 V
Alimentación máxima	60 V
Alimentación por canal	18 mA
PowerWise Rating 2	3272.7 μ A/MHz
Slew Rate	8 V/ μ s
Tipo de Entrada - salida	Not Rail to Rail
Máxima entrada tendencia corriente	2000 nA
Ruido de voltaje	16 nV/root(Hz)
Shut down	No
Rasgos especiales	$A_{vCl} > 10$
Función	Op Amp
Canales	1 canal
Temperatura mínima	0 deg C
Temperatura máxima	70 deg C

Figura 4.32: Tabla con los valores de funcionamiento típicos.

A_{vo} de 90 dB

5.5 MHz de ganancia de ancho de banda.

8 V/ μ s de slew rate ^[1]

Poder amplitud de Ancho de banda 70 KHz

1 mV voltaje offset

Protección contra cortocircuito

Protección térmica con circuito condicional 100% testado

16 V – 60 V rango de alimentación.

Diodos internos de protección para salida

Cobertura de plástico TO-220

90 dB de rechazamiento de ondulación

1. También se define como la velocidad de cambio del voltaje de salida con respecto a las variaciones en el voltaje de entrada.

CAPÍTULO 5 ARQUITECTURA HARDWARE DE CONTROL

En el presente capítulo se abordará la arquitectura hardware encargada del control de la maqueta y del cálculo de la altura de la bola así como la comunicación entre la maqueta y el PC. Comenzando a describir la estructura de modo general y su funcionamiento así como aquellos elementos que la forman. Posteriormente se irán describiendo en profundidad cada uno de estos elementos, con sus características y utilidades. Se realizará un estudio general sobre cada uno de ellos, para a continuación justificar el uso de cada uno de los modelos concretos elegidos de entre la variedad que el mercado ofrece, se hablará de la construcción de un ICSP para la programación de nuestro PIC, dotando al proyecto de mayor flexibilidad con respecto al original así como el estudio del módulo Xbee en la comunicación inalámbrica.

5.1 Estructura y descripción.

La estructura hardware desarrollada para realizar el control del sistema se puede observar en la figura que a continuación se acompaña y que se irá desarrollando a medida del capítulo.

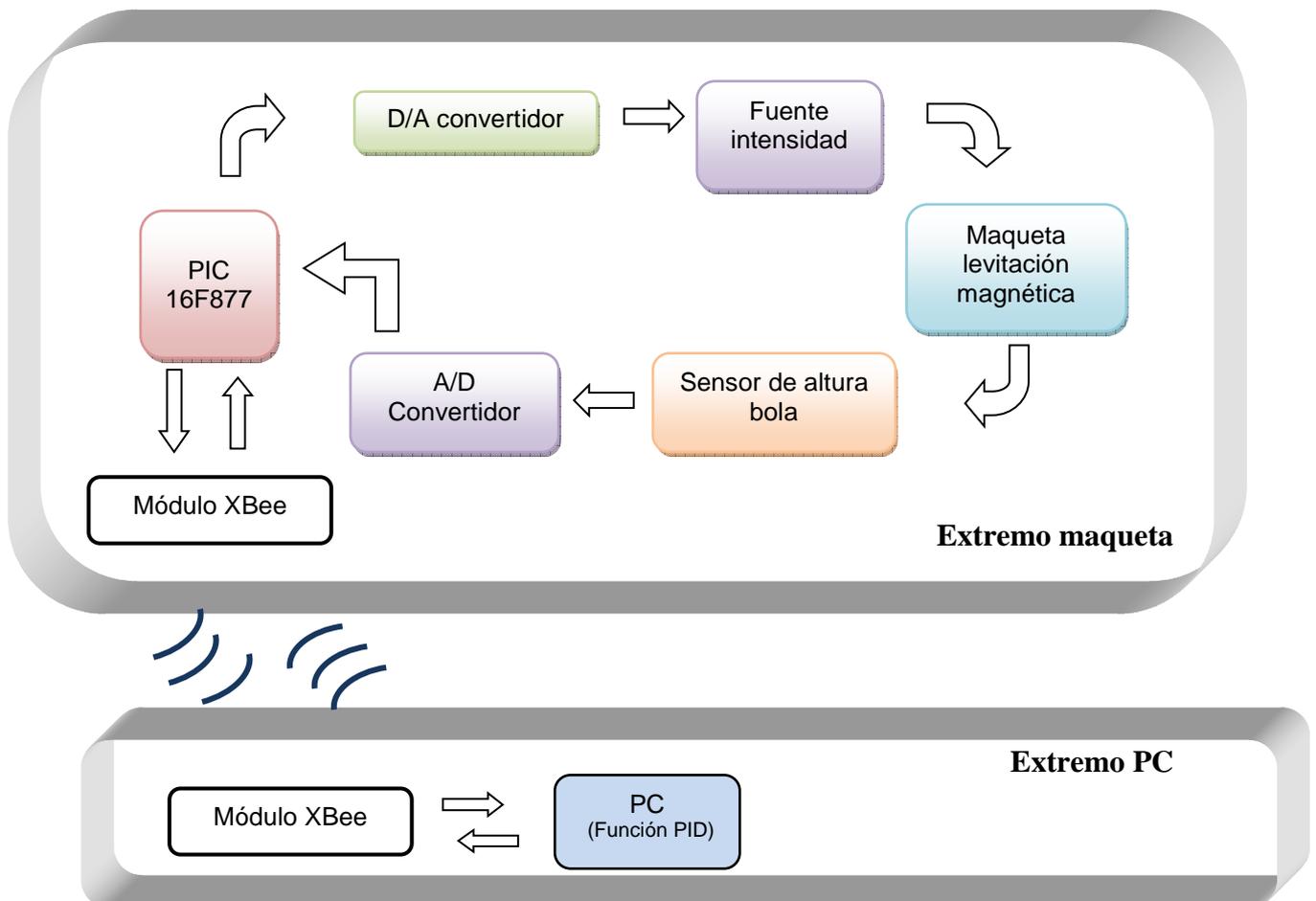


Figura 5.1: Diagrama de bloques del sistema.

De la maqueta de levitación magnética se obtendrá la información en forma de tensión analógica (limitada en el rango 0 a 5V) proveniente del sensor, la cual informará en cada instante, de la posición de la bola. Dicha información deberá ser recogida por el sistema de procesamiento, en este caso un microcontrolador de la familia PIC, en concreto, el 16F877. Debido a que este sistema de procesamiento es digital, surge el problema de que el PIC no interpretará los datos que le llegan en formato analógico de la tensión de salida del sensor por lo que se deberá convertir la señal analógica a digital para adaptarla al PIC y que este reciba una señal digital que es la que entiende, así que la tensión del sensor antes citada deberá ser convertida a digital mediante el correspondiente conversor de Analógico a Digital. Aunque el microcontrolador seleccionado dispone de un conversor interno, sus características no son apropiadas para el sistema que se pretende controlar ya que se necesita un tiempo de respuesta rápido, por lo que se ha hecho uso de un conversor analógico/digital externo (LTC 1273BCN) cuyas características sí cumplen con las necesidades que el sistema por su naturaleza obliga a cumplir.

Una vez la información proveniente de la maqueta haya sido convenientemente convertida será enviada al módulo Xbee para que este la envíe al extremo PC dónde estará implementado un sencillo programa que recoja los datos y calcule la función del PID. Una vez calculada por el PC la altura deseada de la bola será enviada de nuevo al extremo maqueta por el módulo Xbee. Una vez recibida la información se enviará al PIC. La salida del PIC, correspondiente a la tensión de control que es necesario introducir a la fuente de intensidad que suministre a la maqueta una tensión de aproximadamente de 5V y una intensidad de 1A que circule por la bobina, generando el campo magnético necesario para que la esfera se sitúe en la posición fijada, será dada lógicamente como información digital en las correspondientes patillas de E/S digitales del PIC. Será necesaria, por tanto, una nueva conversión, esta vez digital/analógica, para que la tensión de control se corresponda a una señal analógica de 0 a 5V que actúe sobre la fuente intensidad, modificando la intensidad que circula por el electroimán y provocando, por tanto, la variación en la posición de la bola según se desee.

5.2 Sistema de procesamiento.

5.2.1 Controlador y Microcontrolador.

Recibe el nombre de controlador el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de un horno dispone de un sensor que mide constantemente su temperatura interna y, cuando traspasa los límites prefijados, genera las señales adecuadas que accionan los efectores que intentan llevar el valor de la temperatura dentro del rango estipulado.

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace tres décadas, los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta, posteriormente se emplearon los microprocesadores, que se rodeaban con chips de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso. En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón (chip) de un circuito integrado.

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador. Dispone normalmente de los siguientes componentes:

Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).

Memoria RAM para Contener los datos.

Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.

Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.

Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).

Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los productos que para su regulación incorporan un microcontrolador disponen de las siguientes ventajas:

Aumento de prestaciones: un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.

Aumento de la fiabilidad: al reemplazar el microcontrolador por un elevado número de elementos disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.

Reducción del tamaño en el producto acabado: La integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los stocks.

Mayor flexibilidad: las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

5.2.2 Aplicaciones de los microcontroladores.

Cada vez existen más productos que incorporan un microcontrolador con el fin de aumentar sustancialmente sus prestaciones, reducir su tamaño y coste, mejorar su fiabilidad y disminuir el consumo, y es que los microcontroladores están siendo empleados en multitud de sistemas presentes en la vida cotidiana de muchas personas. Todos los objetos electrónicos que nos rodean están gobernados por al menos un microcontrolador, desde un microondas , una nevera de cocina pasando por una lavadora hasta incluso un robot de juguete, como se puede observar la importancia de los microcontroladores es sustancial y está directamente relacionada con el avance tecnológico dado en la sociedad actual.

Algunos fabricantes de microcontroladores superan el millón de unidades de un modelo determinado producidas en una semana. Este dato puede dar una idea de la masiva utilización de estos componentes.

Y en otras aplicaciones no tan cotidianas para la gran mayoría de personas, como, por ejemplo, la instrumentación electrónica, el control de sistemas en una nave espacial, etc. Una aplicación típica podría emplear varios microcontroladores para controlar pequeñas

partes del sistema. Estos pequeños controladores podrían comunicarse entre ellos y con un procesador central, probablemente más potente, para compartir la información y coordinar sus acciones, como, de hecho, ocurre ya habitualmente en cualquier PC.

5.2.3 El mercado de los microcontroladores.

Aunque en el mercado de la microinformática la mayor atención la acaparan los desarrollos de los microprocesadores, lo cierto es que se venden cientos de microcontroladores por cada uno de aquéllos.

Existe una gran diversidad de éstos. Quizá la clasificación más importante sea entre microcontroladores de 4, 8, 16 ó 32 bits. Aunque las prestaciones de los microcontroladores de 16 y 32 bits son superiores a los de 4 y 8 bits, la realidad es que los de 8 bits dominan el mercado y los de 4 bits se resisten a desaparecer. La razón de esta tendencia es que los microcontroladores de 4 y 8 bits son apropiados para la gran mayoría de las aplicaciones, lo que hace absurdo emplear micros más potentes y consecuentemente más caros. Uno de los clientes más importantes del mercado del microcontrolador es el mercado automovilístico. Algunas de las familias de microcontroladores actuales se desarrollaron pensando en este sector, siendo modificadas posteriormente para adaptarse a sistemas más genéricos. El mercado del automóvil es además uno de los más exigentes: los componentes electrónicos deben operar bajo condiciones extremas de vibraciones, choques, ruido, etc. y seguir siendo fiables. El fallo de cualquier componente en un automóvil puede ser el origen de un accidente.

En cuanto a las técnicas de fabricación, cabe decir que prácticamente la totalidad de los microcontroladores actuales se fabrican con tecnología CMOS 4 (“*Complementary Metal Oxide Semiconductor*”).

Esta tecnología supera a las técnicas anteriores por su bajo consumo y alta inmunidad al ruido.

La distribución de las ventas según su aplicación es la siguiente:

Una tercera parte se absorbe en las aplicaciones relacionadas con los computadores y sus periféricos.

La cuarta parte se utiliza en las aplicaciones de consumo (electrodomésticos, juegos, TV, vídeo, etc.)

El 16% de las ventas mundiales se destinó al área de las comunicaciones.

Otro 16% fue empleado en aplicaciones industriales.

El resto de los microcontroladores vendidos en el mundo, aproximadamente un 10% fueron adquiridos por las industrias de automoción.

También los modernos microcontroladores de 32 bits van afianzando sus posiciones en el mercado, siendo las áreas de más interés el procesamiento de imágenes, las comunicaciones, las aplicaciones militares, los procesos industriales y el control de los dispositivos de almacenamiento masivo de datos.

5.2.4 Elección del microcontrolador adecuado.

A la hora de escoger el microcontrolador a emplear en un diseño concreto hay que tener en cuenta multitud de factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles y su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador (tipo de memoria de programa, número de temporizadores, interrupciones, etc.) y si estas son suficientes para el desarrollo de nuestro proyecto.

Se va a ir definiendo algunas de ellas:

Costes

Los fabricantes de microcontroladores compiten duramente para vender sus productos. Sus ventas no son precisamente bajas y es que, aunque quizás no sea muy conocido el dato, se venden 10 veces más microcontroladores que microprocesadores.

A modo de ejemplo, para el fabricante que usa el microcontrolador en su producto una diferencia de precio en el microcontrolador de algunos céntimos de euro es importante (el consumidor deberá pagar además el coste del empaquetado, el de los otros componentes, el diseño del hardware y el desarrollo del software). Si el fabricante desea reducir costes debe tener en cuenta las herramientas de apoyo con que va a contar: emuladores, simuladores, ensambladores, compiladores, etc. Es habitual que muchos de ellos siempre se decanten por microcontroladores pertenecientes a una única familia.

Aplicación que se va a desarrollar

Antes de seleccionar un microcontrolador es imprescindible analizar los requisitos de la aplicación:

- **Procesamiento de datos:**

Puede ser necesario que el microcontrolador realice cálculos críticos en un tiempo limitado. En ese caso se debe asegurar de seleccionar un dispositivo suficientemente rápido para ello. Por otro lado, habrá que tener en cuenta la precisión de los datos a manejar: si no es suficiente con un microcontrolador de 8 bits, puede ser necesario acudir a microcontroladores de 16 ó 32 bits, o incluso a hardware de coma flotante. Una alternativa más barata y quizá suficiente es usar librerías para manejar los datos de alta precisión.

- **Entrada/Salida:**

Para determinar las necesidades de Entrada/Salida del sistema es conveniente dibujar un diagrama de bloques del mismo, este nos va ayudar bastante a la hora de programar de tal forma que sea sencillo identificar la cantidad y tipo de señales a controlar. Una vez realizado este análisis puede ser necesario añadir periféricos hardware externos o cambiar a otro microcontrolador más adecuado a ese sistema.

- **Memoria:**

Para detectar las necesidades de memoria de nuestra aplicación debemos separarla en memoria volátil (RAM), memoria no volátil (ROM, EPROM, etc.) y memoria no volátil modificable (EEPROM). Este último tipo de memoria puede ser útil para incluir

información específica de la aplicación como un número de serie o parámetros de calibración.

El tipo de memoria a emplear vendrá determinado por el volumen de ventas previsto del producto: de menor a mayor volumen será conveniente emplear EPROM, OTP y ROM. En cuanto a la cantidad de memoria necesaria puede ser imprescindible realizar una versión preliminar, aunque sea en pseudo-código, de la aplicación y a partir de ella hacer una estimación de cuánta memoria volátil y no volátil es necesaria y si es conveniente disponer de memoria no volátil modificable.

- **Consumo:**

Algunos productos que incorporan microcontroladores están alimentados con baterías y su funcionamiento puede ser tan vital como activar una alarma antirrobo. Lo más conveniente en un caso como éste puede ser que el microcontrolador esté en estado de bajo consumo pero que despierte ante la activación de una señal (una interrupción) y ejecute el programa adecuado para procesarla.

- **Ancho de palabra:**

El criterio de diseño debe ser seleccionar el microcontrolador de menor ancho de palabra que satisfaga los requerimientos de la aplicación. Usar un microcontrolador de 4 bits supondrá una reducción en los costes importante, mientras que uno de 8 bits puede ser el más adecuado si el ancho de los datos es de un byte. Los microcontroladores de 16 y 32 bits, debido a su elevado coste, deben reservarse para aplicaciones que requieran sus altas prestaciones (Entrada/Salida potente o espacio de direccionamiento muy elevado).

- **Diseño de la placa:**

La selección de un microcontrolador concreto condicionará el diseño de la placa de circuitos. Debe tenerse en cuenta que quizá usar un microcontrolador barato encarezca el resto de componentes del diseño.

Los microcontroladores más populares se encuentran, sin duda, entre las mejores elecciones:

8048 (Intel). Es el padre de los microcontroladores actuales, el primero de todos. Su precio, disponibilidad y herramientas de desarrollo hacen que todavía sea muy popular.

8051 (Intel y otros). Es sin duda el microcontrolador más popular. Fácil de programar, pero potente. Está bien documentado y posee cientos de variantes e incontables herramientas de desarrollo.

80186, 80188 y 80386 EX (Intel). Versiones en microcontrolador de los populares microprocesadores 8086 y 8088. Su principal ventaja es que permiten aprovechar las herramientas de desarrollo para PC.

68HC11 (Motorola y Toshiba). Es un microcontrolador de 8 bits potente y popular con gran cantidad de variantes.

683xx (Motorola). Surgido a partir de la popular familia 68k, a la que se incorporan algunos periféricos. Son microcontroladores de altísimas prestaciones.

PIC (MicroChip). Familia de microcontroladores que gana popularidad día a día. Fueron los primeros microcontroladores RISC.

Es preciso resaltar en este punto que existen innumerables familias de microcontroladores, cada una de las cuales posee un gran número de variantes.

5.2.5 Recursos comunes a todos los microcontroladores.

Al estar todos los microcontroladores integrados en un chip, su estructura fundamental y sus características básicas son muy parecidas. Todos deben disponer de los bloques esenciales: procesador, memoria de datos y de instrucciones, líneas de E/S, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos. Sin embargo, cada fabricante intenta enfatizar los recursos más idóneos para las aplicaciones a las que se destinan preferentemente.

En este apartado se hace un recorrido de todos los recursos que se hallan en todos los microcontroladores, describiendo las diversas alternativas y opciones que pueden encontrarse según el modelo seleccionado.

5.2.5.1 Arquitectura básica.

Básicamente existen dos arquitecturas de computadoras, y por supuesto, están presentes en el mundo de los microcontroladores: Von Neumann y Harvard. Ambas se diferencian en la forma de conexión de la memoria al procesador y en los buses que cada una necesita. La arquitectura Von Neumann es la que se utiliza en las computadoras personales, para ella existe una sola memoria, donde coexisten las instrucciones de programa y los datos, accedidos con un bus de dirección, uno de datos y uno de control.

Debemos comprender que en una PC, cuando se carga un programa en memoria, a éste se le asigna un espacio de direcciones de la memoria que se divide en segmentos, de los cuales típicamente tendremos los siguientes: código (programa), datos y pila. Es por ello que podemos hablar de la memoria como un todo, aunque existan distintos dispositivos físicos en el sistema (HDD, RAM, CD, FLASH).

En el caso de los microcontroladores, existen dos tipos de memoria bien definidas: memoria de datos (típicamente algún tipo de SRAM) y memoria de programas (ROM, PROM, EEPROM, FLASH u de otro tipo no volátil). En este caso la organización es distinta a las de las PC, porque hay circuitos distintos para cada memoria y normalmente no se utilizan los registros de segmentos, sino que la memoria está segregada y el acceso a cada tipo de memoria depende de las instrucciones del procesador.

A pesar de que en los sistemas embebidos con arquitectura Von Neumann la memoria esté segregada, y existan diferencias con respecto a la definición tradicional de esta arquitectura; los buses para acceder a ambos tipos de memoria son los mismos, del procesador solamente salen el bus de datos, el de direcciones, y el de control. Como

conclusión, la arquitectura no ha sido alterada, porque la forma en que se conecta la memoria al procesador sigue el mismo principio definido en la arquitectura básica

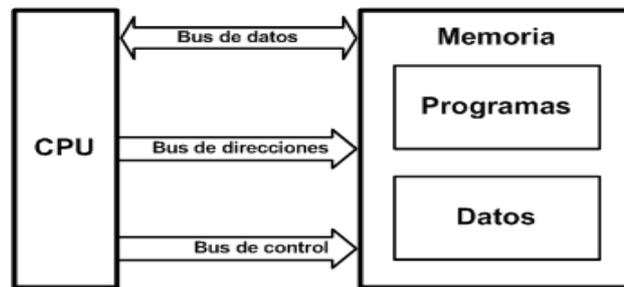


Figura 5.2: Arquitectura Von Neumann.

Esta arquitectura es la variante adecuada para las PC, porque permite ahorrar una buena cantidad de líneas de E/S, que son bastante costosas, sobre todo para aquellos sistemas como las PC, donde el procesador se monta en algún tipo de socket alojado en una placa madre (“*motherboard*”). También esta organización les ahorra a los diseñadores de placas madres una buena cantidad de problemas y reduce el costo de este tipo de sistemas.

Algunas familias de microcontroladores como la INTEL-51 y la Z80 implementan este tipo de arquitectura, fundamentalmente porque era la utilizada cuando aparecieron los primeros microcontroladores.

La otra variante es la arquitectura Harvard, y por excelencia la utilizada en supercomputadoras, en los microcontroladores, y sistemas embebidos en general. En este caso, además de la memoria, el procesador tiene los buses segregados, de modo que cada tipo de memoria tiene un bus de datos, uno de direcciones y uno de control.

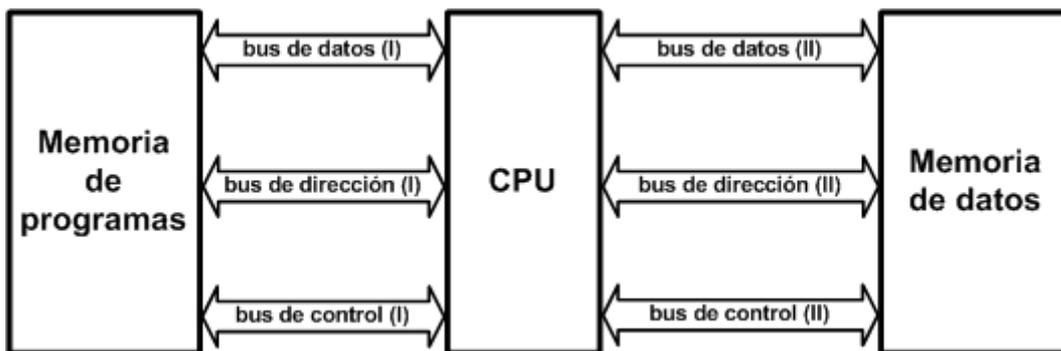


Figura 5.3: Arquitectura Harvard.

La ventaja fundamental de esta arquitectura es que permite adecuar el tamaño de los buses a las características de cada tipo de memoria; además, el procesador puede acceder a cada una de ellas de forma simultánea, lo que se traduce en un aumento significativo de la velocidad de procesamiento, típicamente los sistemas con esta arquitectura pueden ser dos veces más rápidos que sistemas similares con arquitectura Von Neumann.

La desventaja está en que consume muchas líneas de E/S del procesador; por lo que en sistemas donde el procesador está ubicado en su propio encapsulado, solo se utiliza en supercomputadoras. Sin embargo, en los microcontroladores y otros sistemas embebidos, donde usualmente la memoria de datos y programas comparten el mismo encapsulado que el procesador, este inconveniente deja de ser un problema serio y es por ello que encontramos la arquitectura Harvard en la mayoría de los microcontroladores.

5.2.5.2 El Procesador en detalle.

En los años 70 del siglo XX, las computadoras se diseñaban para que realizaran algunas operaciones muy simples, y si se quería que estas máquinas pudiesen hacer cosas diferentes, era necesario realizar cambios bastante significativos al hardware.

A principios de los años 70, una empresa japonesa le encargó a una joven compañía norteamericana que desarrollara un conjunto de circuitos para producir una calculadora de bajo costo. INTEL se dedicó de lleno a la tarea y entre los circuitos encargados desarrolló uno muy especial, algo no creado hasta la fecha: el primer microprocesador integrado.

El 4004 salió al mercado en 1971, es una máquina digital sincrónica compleja, como cualquier otro circuito lógico secuencial sincrónico. Sin embargo, la ventaja de este componente está en que aloja internamente un conjunto de circuitos digitales que pueden hacer operaciones corrientes para el cálculo y procesamiento de datos, pero desde una óptica diferente: sus entradas son una serie de códigos bien definidos, que permiten hacer multitud de operaciones de carácter específico cuyo resultado está determinado por el tipo de operación y los operandos involucrados.

Hoy se está acostumbrado a los sistemas con microprocesadores, pero en el año 1971 ésta era una forma de pensar un poco diferente y hasta escandalosa, a tal punto que Busicom, la empresa que encargó los chips a INTEL, no se mostró interesada en el invento, así que INTEL puso manos a la obra y lo comercializó para otros que mostraron interés.

Es lógico pensar que el invento del microprocesador integrado no fue una revelación divina para sus creadores, sino que se sustentó en los avances, existentes hasta el momento, en el campo de la electrónica digital y las teorías sobre computación. Pero sin lugar a dudas fue la gota que colmó la copa de la revolución científico-técnica, porque permitió desarrollar aplicaciones impensadas o acelerar algunas ya encaminadas. La conclusión es simple, el mundo era uno antes del microprocesador y otro después de su invención, piense en un mundo sin microprocesadores y se encontrará remontado a los años 70 del siglo XX.

Ahora comenzaremos a ver cómo es que está hecho un procesador, no será una explicación demasiado detallada porque desde su invención éste ha tenido importantes revoluciones propias, pero hay aspectos básicos que no han cambiado y que constituyen la base de cualquier microprocesador

5.2.5.2.1 Registros.

Son un espacio de memoria muy reducido pero necesario para cualquier microprocesador, de aquí se toman los datos para varias operaciones que debe realizar el resto de los circuitos del procesador. Los registros sirven para almacenar los resultados de la ejecución de instrucciones, cargar datos desde la memoria externa o almacenarlos en ella.

Aunque la importancia de los registros parezca trivial, no lo es en absoluto. De hecho una parte de los registros, la destinada a los datos, es la que determina uno de los parámetros más importantes de cualquier microprocesador. Cuando se escucha que un procesador es de 4, 8, 16, 32 ó 64 bits, se refiere a procesadores que realizan sus operaciones con registros de datos de ese tamaño, y por supuesto, esto determina muchas de las potencialidades de estas máquinas.

Mientras mayor sea el número de bits de los registros de datos del procesador, mayores serán sus prestaciones, en cuanto a poder de cómputo y velocidad de ejecución, ya que este parámetro determina la potencia que se puede incorporar al resto de los componentes del sistema, por ejemplo, no tiene sentido tener una ALU de 16 bits en un procesador de 8 bits.

Por otro lado un procesador de 16 bits, puede que haga una suma de 16 bits en un solo ciclo de máquina, mientras que uno de 8 bits deberá ejecutar varias instrucciones antes de tener el resultado, aún cuando ambos procesadores tengan la misma velocidad de ejecución para sus instrucciones. El procesador de 16 bits será más rápido porque puede hacer el mismo tipo de tareas que uno de 8 bits, en menos tiempo.

5.2.5.2.2 Unidad de control.

Esta unidad es de las más importantes en el procesador, en ella recae la lógica necesaria para la decodificación y ejecución de las instrucciones, el control de los registros, la ALU, los buses y cuanto cosa más se quiera meter dentro del procesador. No hay nada dentro de un procesador que escape a las garras de la unidad de control. La unidad de control es Dios en el procesador, es omnipotente y omnipresente, todos tienen que rendirle y nadie escapa a su voluntad.

La unidad de control es uno de los elementos fundamentales que determinan las prestaciones del procesador, ya que su tipo y estructura, determina parámetros tales como el tipo de conjunto de instrucciones, velocidad de ejecución, tiempo del ciclo de máquina, tipo de buses que puede tener el sistema, manejo de interrupciones y un buen número de cosas más que en cualquier procesador van a parar a este bloque.

Por supuesto, las unidades de control, son el elemento más complejo de un procesador y normalmente están divididas en unidades más pequeñas trabajando en conjunto. La unidad de control agrupa componentes tales como la unidad de decodificación, unidad de ejecución, controladores de memoria cache, controladores de buses, controladores de interrupción, pipelines, entre otros elementos, dependiendo siempre del tipo de procesador.

5.2.5.2.3 Buses.

Son el medio de comunicación que utilizan los diferentes componentes del procesador para intercambiar información entre sí, eventualmente los buses o una parte de ellos estarán reflejados en los pines del encapsulado del procesador.

En el caso de los microcontroladores, no es común que los buses estén reflejados en el encapsulado del circuito, ya que estos se destinan básicamente a las E/S de propósito general y periféricos del sistema.

Existen tres tipos de buses:

Bus de dirección:

Se utiliza para seleccionar al dispositivo con el cual se quiere trabajar o en el caso de las memorias, seleccionar el dato que se desea leer o escribir.

Bus de datos:

Se utiliza para el transporte de la información.

Control:

Se utiliza para gestionar los distintos procesos de escritura lectura y controlar la operación de los dispositivos del sistema.

5.2.5.2.4 Unidad aritmética y lógica

Como los procesadores son circuitos que hacen básicamente operaciones lógicas y matemáticas, se le dedica a este proceso una unidad completa, con cierta independencia. Aquí es donde se realizan las sumas, restas, y operaciones lógicas típicas del álgebra de Boole.

Actualmente este tipo de unidades ha evolucionado mucho y los procesadores más modernos tienen varias ALU, especializadas en la realización de operaciones complejas como las operaciones en coma flotante. De hecho en muchos casos le han cambiado su nombre por el de “coprocesador matemático”, aunque este es un término que surgió para dar nombre a un tipo especial de procesador que se conecta directamente al procesador más tradicional.

Su impacto en las prestaciones del procesador es también importante porque, dependiendo de su potencia, tareas más o menos complejas, pueden hacerse en tiempos muy cortos, como por ejemplo, los cálculos en coma flotante.

5.2.5.2.5 Conjunto de instrucciones.

Define las operaciones básicas que puede realizar el procesador, que conjugadas y organizadas forman lo que conocemos como software. El conjunto de instrucciones vienen siendo como las letras del alfabeto, el elemento básico del lenguaje, que organizadas adecuadamente permiten escribir programas.

Existen dos tipos básicos de repertorios de instrucciones, que determinan la arquitectura del procesador:

CISC:

Proviene del inglés “*Complex Instruction Set Computer*”, Computadora de Conjunto de Instrucciones Complejo. Los microprocesadores CISC tienen un conjunto de instrucciones que se caracteriza por ser muy amplio y que permiten realizar operaciones complejas entre operandos situados en la memoria o en los registros internos. Este tipo de repertorio dificulta el paralelismo entre instrucciones, por lo que en la actualidad, la mayoría de los sistemas CISC de alto rendimiento, convierten las instrucciones complejas en varias instrucciones simples del tipo RISC, llamadas generalmente microinstrucciones.

Dentro de los microcontroladores CISC podemos encontrar a la popular familia INTEL-51 y la Z80, aunque actualmente existen versiones CISC-RISC de estos microcontroladores, que pretenden aprovechar las ventajas de los procesadores RISC a la vez que se mantiene la compatibilidad hacia atrás con las instrucciones de tipo CISC.

RISC:

Proviene del inglés “*Reduced Instruction Set Computer*”, Computadora con Conjunto de Instrucciones Reducido.

Se centra en la obtención de procesadores con las siguientes características fundamentales:

Instrucciones de tamaño fijo.

Pocas instrucciones.

Sólo las instrucciones de carga y almacenamiento acceden a la memoria de datos.

Número relativamente elevado de registros de propósito general.

Paralelismo en la ejecución, y reducido tiempo de acceso a memoria. Es por eso que los procesadores más modernos, tradicionalmente basados en arquitecturas CISC implementan mecanismos de traducción de instrucciones CISC a RISC, para aprovechar las ventajas de este tipo de procesadores.

5.2.5.2.6 Memoria.

Anteriormente se ha visto que la memoria en los microcontroladores debe estar ubicada dentro del mismo encapsulado, esto es así la mayoría de las veces, porque la idea fundamental es mantener el grueso de los circuitos del sistema dentro de un sólo integrado.

En los microcontroladores la memoria no es abundante, aquí no encontrará Gigabytes de memoria como en las computadoras personales. Típicamente la memoria de programas no excederá de 16 K-localizaciones de memoria no volátil para instrucciones y la memoria RAM ni siquiera llegará a exceder los 5 Kilobytes.

La memoria RAM está destinada al almacenamiento de información temporal que será utilizada por el procesador para realizar cálculos u otro tipo de operaciones lógicas. En el espacio de direcciones de memoria RAM se ubican además los registros de trabajo del procesador y los de configuración y trabajo de los distintos periféricos del microcontrolador. Es por ello que en la mayoría de los casos, aunque se tenga un espacio de direcciones de un tamaño determinado, la cantidad de memoria RAM de que dispone el programador para almacenar sus datos es menor que la que puede direccionar el procesador.

El tipo de memoria utilizada en las memorias RAM de los microcontroladores es SRAM, lo que evita tener que implementar sistemas de refrescamiento como en el caso de las computadoras personales, que utilizan gran cantidad de memoria, típicamente alguna tecnología DRAM. A pesar de que la memoria SRAM es más costosa que la DRAM, es el tipo adecuado para los microcontroladores porque éstos poseen pequeñas cantidades de memoria RAM.

En el caso de la memoria de programas se utilizan diferentes tecnologías, y el uso de una u otra depende de las características de la aplicación a desarrollar.

A continuación se describen las cinco tecnologías existentes, que mayor utilización tienen o han tenido, hasta el momento.

ROM con máscara:

En este caso no se “graba” el programa en memoria sino que el microcontrolador se fabrica con el programa, es un proceso similar al de producción de los CD comerciales mediante masterización. El coste inicial de producir un circuito de este tipo es alto, porque el diseño y producción de la máscara es un proceso costoso, sin embargo, cuando se necesitan varios miles o incluso cientos de miles de microcontroladores para una aplicación determinada, como por ejemplo, algún electrodoméstico, el coste inicial de producción de la máscara y el de fabricación del circuito se distribuye entre todos los circuitos de la serie y, el coste final de ésta, es bastante menor que el de sus semejantes con otro tipo de memoria.

OTP:

Este tipo de memoria, también es conocida como PROM o simplemente ROM. Los microcontroladores con memoria OTP se pueden programar una sola vez, con algún tipo de programador. Se utilizan en sistemas donde el programa no requiera futuras actualizaciones y para series relativamente pequeñas, donde la variante de máscara sea muy costosa, también para sistemas que requieren serialización de datos, almacenados como constantes en la memoria de programas.

EPROM (“*Erasable Programmable Read Only Memory*”):

Los microcontroladores con este tipo de memoria son muy fáciles de identificar porque su encapsulado es de cerámica y llevan encima una ventanita de vidrio desde la cual puede verse la oblea de silicio del microcontrolador.

Se fabrican así porque la memoria EPROM es reprogramable, pero antes debe borrarse, y para ello hay que exponerla a una fuente de luz ultravioleta, el proceso de grabación es similar al empleado para las memorias OTP. Al aparecer tecnologías menos costosas y más flexibles, como las memorias EEPROM y FLASH, este tipo de memoria han caído en desuso, se utilizaban en sistemas que requieren actualizaciones del programa y para los procesos de desarrollo y puesta a punto.

EEPROM (“*Electrical Erasable Programmable Read Only Memory*”):

Fueron el sustituto natural de las memorias EPROM, la diferencia fundamental es que pueden ser borradas eléctricamente, por lo que la ventanilla de cristal de cuarzo y los encapsulados cerámicos no son necesarios.

Al disminuir los costos de los encapsulados, los microcontroladores con este tipo de memoria se hicieron más baratos y cómodos para trabajar que sus equivalentes con memoria EPROM. Otra característica destacable de este tipo de microcontrolador es que fue en ellos donde comenzaron a utilizarse los sistemas de programación en circuito o ICSP (In Circuit Serial Programming) que evitan tener que sacar el microcontrolador de la tarjeta que lo aloja para hacer actualizaciones al programa.

FLASH:

En el campo de las memorias reprogramables para microcontroladores, son el último avance tecnológico en uso a gran escala, y han sustituido a los microcontroladores con memoria EEPROM.

A las ventajas de las memorias FLASH se le adicionan su gran densidad respecto a sus predecesoras lo que permite incrementar la cantidad de memoria de programas a un costo muy bajo. Pueden además ser programadas con las mismas tensiones de alimentación del microcontrolador, el acceso en lectura y la velocidad de programación es superior, disminución de los costos de producción, entre otras. Lo más habitual es encontrar que la memoria de programas y datos está ubicada toda dentro del microcontrolador, de hecho, actualmente son pocos los microcontroladores que

permiten conectar memoria de programas en el exterior del encapsulado. Las razones para estas “limitaciones” están dadas porque el objetivo fundamental es obtener la mayor integración posible y conectar memorias externas consume líneas de E/S que son uno de los recursos más preciados de los microcontroladores. A pesar de lo anterior existen familias como la INTEL 51 cuyos microcontroladores tienen la capacidad de ser expandidos en una variada gama de configuraciones para el uso de memoria de programas externa. En el caso de los PIC, estas posibilidades están limitadas sólo a algunos microcontroladores de la gama alta, a continuación, se presentan tres tipos de configuraciones de las memorias en los PICs.

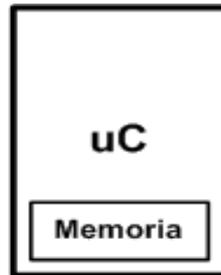


Figura 5.4: Esta configuración es la típica y podemos encontrarla casi en el 100% de los microcontroladores.

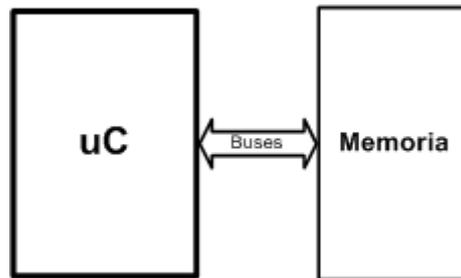


Figura 5.5: Esta configuración es poco frecuente y generalmente se logra configurando al microcontrolador para sacrificar la memoria de programas interna, sin embargo el 8031 de INTEL es un microcontrolador sin memoria de programas interna.

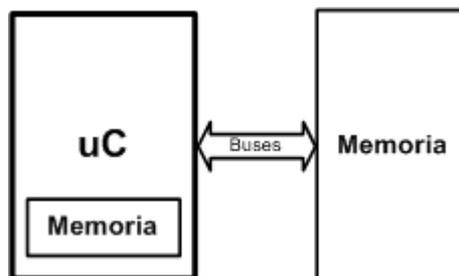


Figura 5.6: La configuración (c) es la que se encuentra habitualmente en los microcontroladores que tienen posibilidades de expandir su memoria de programas como algunos PIC de gama alta.

Cuando se requiere aumentar la cantidad de memoria de datos, lo más frecuente es colocar dispositivos de memoria externa en forma de periféricos, de esta forma se pueden utilizar memorias RAM, FLASH o incluso discos duros como los de las PC, mientras que para los cálculos y demás operaciones que requieran almacenamiento temporal de datos se utiliza la memoria RAM interna del microcontrolador. Esta forma de expandir la memoria de datos está determinada, en la mayoría de los casos, por el tipo de repertorio de instrucciones del procesador y porque permite un elevado número de configuraciones distintas, además del consiguiente ahorro de líneas de E/S que se logra con el uso de memorias con buses de comunicación serie.

5.2.5.2.7 Interrupciones.

Los procesos de atención a interrupciones tienen la ventaja de que se implementan por hardware ubicado en el procesador, así que es un método rápido de hacer que el procesador se dedique a ejecutar un programa especial para atender eventos que no pueden esperar por mecanismos lentos como el de encuesta.

En términos generales, un proceso de interrupción y su atención por parte del procesador, tiene la siguiente secuencia de acciones.

En el mundo real se produce el evento para el cual se quiere que el procesador ejecute un programa especial, este proceso tiene la característica de que no puede esperar mucho tiempo antes de ser atendido o no sabe en qué momento debe ser atendido.

El circuito encargado de detectar la ocurrencia del evento se activa, y como consecuencia, activa la entrada de interrupción del procesador.

La unidad de control detecta que se ha producido una interrupción y “levanta” una bandera para registrar esta situación; de esta forma si las condiciones que provocaron el evento desaparecen y el circuito encargado de detectarlo desactiva la entrada de interrupción del procesador, ésta se producirá de cualquier modo, porque ha sido registrada.

La unidad de ejecución termina con la instrucción en curso y justo antes de comenzar a ejecutar la siguiente comprueba que se ha registrado una interrupción

Se desencadena un proceso que permite guardar el estado actual del programa en ejecución y saltar a una dirección especial de memoria de programas, donde está la primera instrucción de la subrutina de atención a interrupción.

Se ejecuta el código de atención a interrupción, esta es la parte “consciente” de todo el proceso porque es donde se realizan las acciones propias de la atención a la interrupción y el programador juega su papel.

Cuando en la subrutina de atención a interrupción se ejecuta la instrucción de retorno, se desencadena el proceso de restauración del procesador al estado en que estaba antes de la atención a la interrupción.

Como se puede observar, el mecanismo de interrupción es bastante complicado, sin embargo tiene dos ventajas que obligan a su implementación: la velocidad y su capacidad de ser asíncrono. Ambas de conjunto permiten que se aprovechen al máximo las capacidades de trabajo del procesador.

Los mecanismos de interrupción no solo se utilizan para atender eventos ligados a procesos que requieren atención inmediata sino que se utilizan además para atender eventos de procesos asincrónicos.

Las interrupciones son tan eficaces que permiten que el procesador actúe como si estuviese haciendo varias cosas a la vez cuando en realidad se dedica a la misma rutina de siempre, ejecutar instrucciones una detrás de la otra.

5.2.5.2.8 Periféricos.

Cuando se vio la organización básica de un microcontrolador, señalamos que dentro de este se ubican un conjunto de periféricos, cuyas salidas están reflejadas en los pines del microcontrolador.

A continuación se describirán algunos de los periféricos que con mayor frecuencia se encuentran en los microcontroladores.

Entradas salidas de propósito general:

También conocidos como puertos de E/S, generalmente agrupadas en puertos de 8 bits de longitud, permiten leer datos del exterior o escribir en ellos desde el interior del microcontrolador, el destino habitual es el trabajo con dispositivos simples como relés, LED, o cualquier otra cosa que se le ocurra al programador.

Algunos puertos de E/S tienen características especiales que le permiten manejar salidas con determinados requerimientos de corriente, o incorporan mecanismos especiales de interrupción para el procesador.

Típicamente cualquier pin de E/S puede ser considerada E/S de propósito general, pero como los microcontroladores no pueden tener infinitos pines, ni siquiera todos los pines que se deseen, las E/S de propósito general comparten los pines con otros periféricos. Para usar un pin con cualquiera de las características a él asignadas debemos configurarlo mediante los registros destinados a ello.

Temporizadores y contadores:

Son circuitos sincrónicos para el conteo de los pulsos que llegan a su entrada de reloj. Si la fuente de conteo es el oscilador interno del microcontrolador es común que no tengan un pin asociado, y en este caso trabajan como temporizadores. Por otra parte, cuando la fuente de conteo es externa, entonces tienen asociado un pin configurado como entrada, este es el modo contador.

Los temporizadores son uno de los periféricos más habituales en los microcontroladores y se utilizan para muchas tareas, como por ejemplo, la medición de frecuencia, implementación de relojes, para el trabajo de conjunto con otros periféricos que requieren una base estable de tiempo entre otras funcionalidades. Es frecuente que un microcontrolador típico incorpore más de un temporizador/contador e incluso algunos

tienen arreglos de contadores. Como veremos más adelante este periférico es un elemento casi imprescindible y es habitual que tengan asociada alguna interrupción. Los tamaños típicos de los registros de conteo son 8 y 16 bits, pudiendo encontrar dispositivos que sólo tienen temporizadores de un tamaño o con más frecuencia con ambos tipos de registro de conteo.

Convertor A/D:

Como es muy frecuente el trabajo con señales analógicas, éstas deben ser convertidas a digital y por ello muchos microcontroladores incorporan un convertor A/D, el cual se utiliza para tomar datos de varias entradas diferentes que se seleccionan mediante un multiplexor.

Las resoluciones más frecuentes son 8 y 10bits, aunque hay microcontroladores con convertidores de 11 y 12 bits, para resoluciones mayores es preciso utilizar convertidores A/D externos. Los convertidores A/D son uno de los periféricos más codiciados en el mundo de los microcontroladores y es por ello que muchísimos PIC los incorporan, siendo esta una de las características más destacables de los dispositivos que fabrica Microchip.

Puerto serie:

Este periférico está presente en casi cualquier microcontrolador, normalmente en forma de UART (“*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*”) o USART (“*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*”) dependiendo de si permiten o no el modo sincrónico de comunicación.

El destino común de este periférico es la comunicación con otro microcontrolador o con un PC y en la mayoría de los casos hay que agregar circuitos externos para completar la interfaz de comunicación. La forma más común de completar el puerto serie es para comunicarlo con una PC mediante la interfaz EIA-232 (más conocida como RS-232), es por ello que muchas personas se refieren a la UART o USART como puerto serie RS-232, pero esto constituye un error, puesto que este periférico se puede utilizar para interconectar dispositivos mediante otros estándares de comunicación.

Puerto serie sincrónico:

Este tipo de periférico se utiliza para comunicar al microcontrolador con otros microcontroladores o con periféricos externos conectados a él, mediante las interfaces SPI (“*Serial Peripheral Interface*”) o I2C (“*Inter-Integrated Circuit*”).

A pesar de que es también un tipo de puerto serie, se suele tratar de forma diferenciada respecto a la UART/USART porque las interfaces SPI e I2C aparecieron mucho después que la UART/USART, su carácter es únicamente sincrónico y no están diseñadas para interconectar al sistema con otros dispositivos independientes como una PC, sino para conectar al microcontrolador dispositivos tales como memorias, pantallas LCD, convertidores A/D o D/A.

Otros puertos de comunicación:

En los últimos años han aparecido muchas interfaces de comunicación y los microcontroladores no se han quedado atrás para incorporarlas, es por ello que podemos encontrar algunos modelos con puertos USB (“*Universal Serial Bus*”), CAN (“*Controller Area Network*”), Ethernet, puerto paralelo entre otros.

Comparadores:

Son circuitos analógicos basados en amplificadores operacionales que tienen la característica de comparar dos señales analógicas y dar como salida los niveles lógicos ‘0’ o ‘1’ en dependencia del resultado de la comparación. Es un periférico muy útil para detectar cambios en señales de entrada de las que solamente nos interesa conocer cuando está en un rango determinado de valores.

Modulador de ancho de pulsos:

Los PWM (“*Pulse Width Modulator*”) son periféricos muy útiles sobre todo para el control de motores, sin embargo hay un grupo de aplicaciones que pueden realizarse con este periférico, dentro de las cuales podemos citar: la conversión digital analógica D/A, el control regulado de luz (dimming) entre otras.

Memoria de datos no volátil:

Muchos microcontroladores han incorporado este tipo de memoria como un periférico más, para el almacenamiento de datos de configuración o de los procesos que se controlan. Esta memoria es independiente de la memoria de datos tipo RAM o la memoria de programas, en la que se almacena el código del programa a ejecutar por el procesador del microcontrolador.

Muchos de los microcontroladores PIC, incluyen este tipo de memoria, típicamente en forma de memoria EEPROM, incluso algunos de ellos permiten utilizar parte de la memoria de programas como memoria de datos no volátil, por lo que el procesador tiene la capacidad de escribir en la memoria de programas como si ésta fuese un periférico más.

5.2.6 La familia de los PIC como elección.

Los PIC son los microcontroladores más conocidos. Cualquier persona que desee iniciarse en el mundo de los microcontroladores verá rápidamente como aparecen citados. Se ha buscado en multitud de bibliografía el por qué de esta relevancia de estos microcontroladores. No se ha podido extraer una respuesta concreta, pero de todo lo leído e investigado se puede extraer como conclusión que este tipo de microcontroladores engloban una serie de características que se detallan a continuación:

Sencillez de manejo: Tienen un juego de instrucciones reducido; 35 en la gama media.

Buena información, fácil de conseguir y económica.

Su coste es comparativamente inferior al de sus competidores.

Poseen una elevada velocidad de funcionamiento. Buen promedio de parámetros: velocidad, consumo, tamaño, alimentación, código compacto, etc.

Herramientas de desarrollo fáciles y baratas. Muchas herramientas software se pueden recoger libremente a través de Internet desde Microchip.

Existe una gran variedad de herramientas hardware que permiten grabar, depurar, borrar y comprobar el comportamiento de los PIC.

Diseño rápido.

La gran variedad de modelos de PIC permite elegir el que mejor responde a los requerimientos de la aplicación.

Una de las razones del éxito de los PIC se basa en su utilización. Cuando se aprende a manejar uno de ellos, conociendo su arquitectura y su repertorio de instrucciones, es muy fácil emplear otro modelo.

Se quiere constatar que para las aplicaciones más habituales (casi un 90%) la elección de una versión adecuada de PIC es la mejor solución; sin embargo, dado su carácter general, otras familias de microcontroladores son más eficaces en aplicaciones específicas, especialmente si en ellas predomina una característica concreta, que puede estar muy desarrollada en otra familia.

Una de las razones del éxito de los PIC se basa en su utilización. Cuando se aprende a manejar uno de ellos, conociendo su arquitectura y su repertorio de instrucciones, es muy fácil emplear otro modelo.

5.2.6.1 El fabricante: Microchip Technology Inc.

Microchip Technology Inc. es una empresa fabricante de microcontroladores, memorias y semiconductores analógicos, situada en Chandler, Arizona, EE. UU.

Inicialmente la empresa **GI** (“*General Instruments*”) creó una subdivisión para fabricar dispositivos microelectrónicos. Más tarde esta subdivisión fue vendida a Venture Capital Investors que decidió crear una nueva empresa llamada Arizona Microchip Technology.

En 1965, la empresa GI creó una división de microelectrónica, GI Microelectronics Division, que comenzó su andadura fabricando memorias EPROM y EEPROM, que conformaban las familias AY3-XXXX y AY5-XXXX. A principios de los años 70 diseñó el microprocesador de 16 bits CP1600, razonablemente bueno pero que no manejaba eficazmente las Entradas y Salidas. Para solventar este problema, en 1975 diseñó un chip destinado a controlar E/S: el PIC (“*Peripheral Interface Controller*”). Se trataba de un controlador rápido pero limitado y con pocas instrucciones, pues iba a trabajar en combinación con el CP16000.

La arquitectura del PIC, que se comercializó en 1975, era sustancialmente la misma que la de los actuales modelos PIC16C5X. En aquel momento se fabricaba con tecnología NMOS y el producto sólo se ofrecía con memoria ROM y con un pequeño pero robusto microcódigo.

La década de los 80 no fue buena para GI, que tuvo que reestructurar sus negocios, concentrando sus actividades en los semiconductores de potencia. La GI Microelectronics División se convirtió en una empresa subsidiaria, llamada GI Microelectronics Inc. Finalmente, en 1985, la empresa fue vendida a un grupo de inversores de capital de riesgo, los cuales, tras analizar la situación, rebautizaron la empresa con el nombre de Arizona Microchip Technology y orientaron su negocio a los PIC, las memorias EPROM paralelo y las EEPROM serie. Se comenzó rediseñando los PIC, que pasaron a fabricarse con tecnología CMOS, surgiendo la familia de gama baja PIC16C5X, considerada como la “clásica”.

Microchip cuenta con su factoría principal en Chandler, Arizona, en donde se fabrican y prueban los chips con los más avanzados recursos técnicos. En 1993 construyó otra factoría de similares características en Temple, Arizona. También cuenta con centros de ensamblaje y ensayos en Taiwán y Tailandia. Para tener una idea de su alta producción, hay que tener en cuenta que ha superado el millón de unidades por semana en productos CMOS de la familia PIC16C5X.

En el siglo XXI, este fabricante ha obtenido un éxito comercial significativo con el reforzamiento de la memoria FLASH en todas las gamas del PIC. Además, la moderna familia PIC18CXXX y los dsPIC son recursos muy interesantes para un futuro inmediato, que permiten ocupar a Microchip el segundo puesto del ranking mundial.

5.2.6.2 El PIC.

Los PIC son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc. y derivados del PIC1650, originalmente desarrollado por la división de microelectrónica de General Instrument.

El nombre actual no es un acrónimo. En realidad, el nombre completo es **PICmicro**, aunque generalmente se utiliza como "*Peripheral Interface Controller*" (controlador de interfaz periférico).

El PIC original se diseñó para ser usado con la nueva CPU de 16 bits CP16000. Siendo en general una buena CPU, ésta tenía malas prestaciones de E/S, y el PIC de 8 bits se desarrolló en 1975 para mejorar el rendimiento del sistema quitando peso de E/S a la CPU. El PIC utilizaba microcódigo simple almacenado en ROM para realizar estas tareas; y aunque el término no se usaba por aquel entonces, se trata de un diseño RISC que ejecuta una instrucción cada 4 ciclos del oscilador.

En 1985 la división de microelectrónica de General Instrument se separa como compañía independiente que es incorporada como filial (el 14 de diciembre de 1987 cambia el nombre a Microchip Technology y en 1989 es adquirida por un grupo de inversores) y el nuevo propietario canceló casi todos los desarrollos, que para esas fechas la mayoría estaban obsoletos. El PIC, sin embargo, se mejoró con EPROM para conseguir un controlador de canal programable. Hoy en día multitud de PICs vienen con varios periféricos incluidos (módulos de comunicación serie, UARTs, núcleos de control de motores, etc.) y con memoria de programa desde 512 a 32.000 palabras (una *palabra* corresponde a una instrucción en lenguaje ensamblador, y puede ser 12, 14 o 16 bits, dependiendo de la familia específica de PICmicro).

5.2.6.3 Juego de instrucciones y entorno de programación.

El PIC usa un juego de instrucciones tipo RISC, cuyo número puede variar desde 35 para PICs de gama baja a 70 para los de gama alta. Las instrucciones se clasifican entre las que realizan operaciones entre el acumulador y una constante, entre el acumulador y una posición de memoria, instrucciones de condicionamiento y de salto/retorno, implementación de interrupciones y una para pasar a modo de bajo consumo llamada "*sleep*".

Microchip proporciona un entorno de desarrollo freeware llamado MPLAB que incluye un simulador software y un ensamblador. Otras empresas desarrollan compiladores C y BASIC. Microchip también vende compiladores para los PICs de gama alta ("C18" para la serie F18 y "C30" para los dsPICs) y se puede descargar una edición para estudiantes del C18 que inhabilita algunas opciones después de un tiempo de evaluación.

Para el lenguaje de programación Pascal existe un compilador de código abierto, JAL, lo mismo que PicForth para el lenguaje Forth. GPUTILS es una colección de herramientas distribuidas bajo licencia GPL que incluye ensamblador y enlazador, y funciona en Linux, MacOS y Microsoft Windows. GPSIM es otra herramienta libre que permite simular diversos dispositivos hardware conectados al PIC.

Uno de los más modernos y completos compiladores para lenguaje C es mikroC, que es un ambiente de desarrollo con editor de texto, bibliotecas con múltiples funciones para todos los módulos y herramientas incorporadas para facilitar enormemente el proceso de programación.

5.2.6.4 Arquitectura central.

La arquitectura del PIC es sumamente minimalista. Esta caracterizada por las siguientes prestaciones:

- Arquitectura Harvard.
- Reducido número de instrucciones de largo fijo.
- La mayoría de las instrucciones se ejecutan en un solo ciclo de ejecución (4 ciclos de reloj), con ciclos de único retraso en las bifurcaciones y saltos.
- Un solo acumulador "W", cuyo uso (como operador de origen) es implícito (no está especificado en la instrucción).
- Todas las posiciones de la RAM funcionan como registros de origen y/o de destino de operaciones matemáticas y otras funciones.
- Una pila de hardware para almacenar instrucciones de regreso de funciones.
- Una relativamente pequeña cantidad de espacio de datos direccionable (típicamente, 256 bytes), extensible a través de manipulación de bancos de memoria.
- El espacio de datos está relacionado con el CPU, puertos, y los registros de los periféricos.
- El contador de programa está también relacionado dentro del espacio de datos, y es posible escribir en él (permitiendo saltos indirectos).
- No hay distinción entre los espacios de memoria y los espacios de registros, ya que la RAM cumple ambas funciones, y esta es normalmente referida como "archivo de registros" o simplemente, registros.

Espacio de datos (RAM)

Los microcontroladores PIC tienen una serie de registros que funcionan como una RAM de propósito general. Los registros de propósito específico para los recursos de hardware disponibles dentro del propio chip también están direccionados en la RAM. La direccionabilidad de la memoria varía dependiendo la línea de dispositivos, y todos los dispositivos PIC tienen algún tipo de mecanismo de manipulación de bancos de memoria que pueden ser usados para acceder memoria adicional. Las series más recientes de dispositivos disponen de funciones que pueden cubrir todo el espacio direccionable, independientemente del banco de memoria seleccionado. En los dispositivos anteriores, esto debía lograrse mediante el uso del acumulador.

Para implementar direccionamiento indirecto, un registro de "selección de registro de archivo" (FSR) y de "registro indirecto" (INDF) son usados: Un número de registro es escrito en el FSR, haciendo que las lecturas o escrituras al INDF serán realmente hacia o del registro apuntado por el FSR. Los dispositivos más recientes extienden este concepto con pos- y preincrementos y/o decrementos para mayor eficiencia en acceder secuencialmente a la información almacenada. Esto permite que se pueda tratar al FSR como un puntero de pila.

La memoria de datos externa no es directamente direccionable excepto en algunos microcontroladores PIC 18 de gran cantidad de pines.

Tamaño de palabra.

El tamaño de palabra de los microcontroladores PIC es fuente de muchas confusiones. Todos los PICs (excepto los dsPIC) manejan datos en trozos de 8 bits, con lo que se deberían llamar microcontroladores de 8 bits. Pero a diferencia de la mayoría de CPUs, el PIC usa arquitectura Harvard, por lo que el tamaño de las instrucciones puede ser distinto del de la palabra de datos. De hecho, las diferentes familias de PICs usan tamaños de instrucción distintos, lo que hace difícil comparar el tamaño del código del PIC con el de otros microcontroladores. Por ejemplo, un microcontrolador tiene 6144 bytes de memoria de programa: para un PIC de 12 bits esto significa 4096 palabras y para uno de 16 bits, 3072 palabras.

5.2.6.5 Programación del PIC.

Para transferir el código de un ordenador al PIC normalmente se usa un dispositivo llamado programador. La mayoría de PICs que Microchip distribuye hoy en día incorporan ICSP (*In Circuit Serial Programming*, programación serie incorporada) o LVP (*Low Voltage Programming*, programación a bajo voltaje), lo que permite programar el PIC directamente en el circuito destino. Para la ICSP se usan los pines RB6 y RB7 (En algunos modelos pueden usarse otros pines como el GP0 y GP1 o el RA0 y RA1) como reloj y datos y el MCLR para activar el modo programación aplicando un voltaje de 13 voltios. Existen muchos programadores de PICs, desde los más simples que dejan al software los detalles de comunicaciones, a los más complejos, que pueden verificar el dispositivo a diversas tensiones de alimentación e implementan en hardware casi todas las funcionalidades. Muchos de estos programadores complejos incluyen ellos mismos PICs preprogramados como interfaz para enviar las órdenes al PIC que se desea programar. Uno de los programadores más simples es el TE20, que utiliza la línea TX del puerto RS232 como alimentación y las líneas DTR y CTS para mandar o recibir datos cuando el microcontrolador está en modo programación. El software de programación puede ser el ICprog, muy común entre la gente que utiliza este tipo de microcontroladores. Entornos de programación basados en intérpretes BASIC ponen al alcance de cualquier proyecto que parecieran ser ambiciosos.

Programadores:

PICStart Plus (puerto serie y USB)

Promate II (puerto serie)

MPLAB PM3 (puerto serie y USB)

ICD2 (puerto serie y USB)

ICD3 (USB)

PICKit 1 (USB)

IC-Prog 1.06B

PICAT 1.25 (puerto USB2.0 para PICs y Atmel)

WinPic 800 (puerto paralelo, serie y USB)

PICKit 2 (USB)

PICKit 3 (USB)

Terusb1.0

Eclipse (PICs y AVR. USB.)

Master Prog (USB)

Además es posible hacer un programador de manera casera, en <http://microspics.blogspot.com> hay una lista con los más utilizados.

Depuradores integrados

ICD (Serie)

ICD2 (Serie ó full speed USB - 2M bits/s)

ICD3 (High speed USB - 480M bits/s)

Emuladores:

Proteus - ISIS

ICE2000 (puerto paralelo, convertidor a USB disponible)

ICE4000 (USB)

PIC EMU

PIC CDlite

5.2.6.6 Características de la serie PIC.

Los PICs actuales vienen con una amplia gama de mejoras hardware incorporadas:

- Núcleos de CPU de 8/16 bits con Arquitectura Harvard modificada.
- Memoria Flash y ROM disponible desde 256 bytes a 256 kilobytes.
- Puertos de E/S (típicamente 0 a 5,5 voltios).
- Temporizadores de 8/16 bits.
- Tecnología Nanowatt para modos de control de energía.
- Periféricos serie síncronos y asíncronos: USART, AUSART, EUSART.
- Conversores analógico/digital de 8-10-12 bits.
- Comparadores de tensión.
- Módulos de captura y comparación PWM.
- Controladores LCD.
- Periférico MSSP para comunicaciones I²C, SPI, y I²S.
- Memoria EEPROM interna con duración de hasta un millón de ciclos de lectura/escritura.
- Periféricos de control de motores.
- Soporte de interfaz USB.
- Soporte de controlador Ethernet.
- Soporte de controlador CAN.
- Soporte de controlador LIN.
- Soporte de controlador Irda.

5.2.6.7 Variaciones del PIC.

Una de las labores más importantes del ingeniero de diseño es la elección del microcontrolador que mejor satisfaga las necesidades del proyecto con el mínimo presupuesto.

Para resolver aplicaciones sencillas se precisan pocos recursos, en cambio, las aplicaciones grandes requieren numerosos y potentes. Siguiendo esta filosofía Microchip construye diversos modelos de microcontroladores orientados a cubrir, de

forma óptima, las necesidades de cada proyecto. Así, hay disponibles microcontroladores sencillos y baratos para atender las aplicaciones simples y otros complejos y más costosos para las de mucha envergadura.

Microchip dispone de cuatro familias de microcontroladores de 8 bits para adaptarse a las necesidades de la mayoría de los clientes potenciales.

En la mayor parte de las bibliografías encontrareis tan sólo tres familias de microcontroladores, con lo que habrán despreciado la llamada gama enana, que es en realidad una subfamilia formada por componentes pertenecientes a las otras gamas.

5.2.6.7.1 Gama enana: PIC12C (F) XXX de 8 patillas.

Se trata de un grupo de PIC de reciente aparición que ha acaparado la atención del mercado. Su principal característica es su reducido tamaño, al disponer todos sus componentes de 8 patillas. Se alimentan con un voltaje de corriente continua comprendido entre 2,5 V y 5,5 V, y consumen menos de 2 mA cuando trabajan a 5 V y 4 MHz. El formato de sus instrucciones puede ser de 12 o de 14 bits y su repertorio es de 33 o 35 instrucciones, respectivamente. En la figura que se adjunta a continuación, se muestra el diagrama de conexionado de uno de estos PIC.

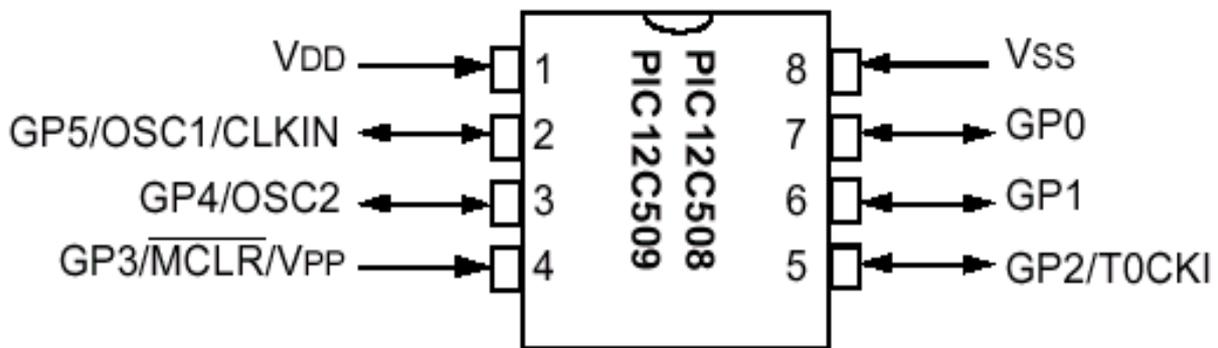


Figura 5.7: Diagrama de conexiones de los PIC12Cxxx de la gama enana.

Aunque los PIC de la gama enana, sólo tienen 8 patillas, pueden destinar hasta 6 como líneas de E/S para los periféricos porque disponen de un oscilador interno R-C.

En la Tabla 2.1 se presentan las principales características de los modelos de esta subfamilia, que el fabricante tiene la intención de potenciar en un futuro próximo. Los modelos 12C5xx pertenecen a la gama baja, siendo el tamaño de las instrucciones de 12 bits; mientras que los 12C6xx son de la gama media y sus instrucciones tienen 14 bits. Los modelos 12F6xx poseen memoria Flash para el programa y EEPROM para los datos.

MODELO	MEMORIA PROGRAMA	MEMORIA DE DATOS	FREC. MÁX.	LÍNEAS E/S	ADC 8 BITS	TEMPORIZADORES	PATITAS
PIC 12C508	512x12	25x8	4 MHZ	6		TMRO + WDT	8
PIC 12C509	1024x12	41x8	4 MHZ	6		TMRO + WDT	8
PIC 12C670	512x14	80x8	4 MHZ	6		TMRO + WDT	8
PIC 12C671	1024x14	128x8	4 MHZ	6	2	TMRO + WDT	8
PIC 12C672	2048x14	128x8	4 MHZ	6	4	TMRO + WDT	8
PIC 12C680	512x12 FLASH	80x8 16x8 EEPROM	4 MHZ	6	4	TMRO + WDT	8
PIC 12C681	1024x14 FLASH	80x8 16x8 EEPROM	4 MHZ	6		TMRO + WDT	8

Figura 5.8: Características de los modelos PIC12C (F) XXX de la gama enana.

5.2.6.7.2 Gama baja o básica: PIC16C5X con instrucciones de 12 bits.

Se trata de una serie de PIC de recursos limitados, pero con una de las mejores relaciones coste/prestaciones. Sus versiones están encapsuladas con 18 y 28 patillas y pueden alimentarse a partir de una tensión de 2,5 V, lo que les hace ideales en las aplicaciones que funcionan con pilas teniendo en cuenta su bajo consumo (menos de 2 mA a 5 V y 4 MHz). Tienen un repertorio de 33 instrucciones cuyo formato consta de 12 bits. No admiten ningún tipo de interrupción y la Pila sólo dispone de dos niveles.

Al igual que todos los miembros de la familia PIC16/17, los componentes de la gama baja se caracterizan por poseer los siguientes recursos:

Sistema POR (“Power On Reset”):

Todos los PIC tienen la facultad de generar una autoreinicialización o autoreset al conectarles la alimentación.

Perro guardián (“Watchdog” o WDT):

Existe un temporizador que produce un reset automáticamente si no es recargado antes que pase un tiempo prefijado. Así se evita que el sistema quede “colgado” dado en esa situación el programa no recarga dicho temporizador y se genera un reset.

Código de protección:

Cuando se procede a realizar la grabación del programa, puede protegerse para evitar su lectura. También disponen los PIC de posiciones reservadas para registrar números de serie, códigos de identificación, prueba, etc.

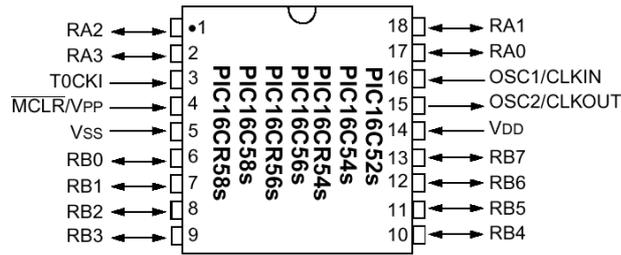


Figura 5.9: Diagrama de patitas de los PIC de la gama baja que responden a la nomenclatura PIC16C54/56.

Líneas de E/S de alta corriente:

Las líneas de E/S de los PIC pueden proporcionar o absorber una corriente de salida comprendida entre 20 y 25 mA, capaz de excitar directamente ciertos periféricos.

Modo de reposo (Bajo consumo o “sleep”):

Ejecutando una instrucción (SLEEP), la CPU y el oscilador principal se detienen y se reduce notablemente el consumo.

Modelo	Memoria Programa EPROM ROM	Memoria Datos	Frecuencia Máxima	Líneas E/S	Temporizadores	Patitas
PIC 16C52	384	25	4 MHz	4	TMR0 + WDT	18
PIC 16C54	512	25	20 MHz	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16C54A	512	25	20 MHz	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16CR54A	512	25	20 MHz	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16C55	512	24	20 MHz	20	TMR0 + WDT	28
PIC 16C56	1K	25	20 MHz	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16C57	2K	72	20 MHz	20	TMR0 + WDT	28
PIC 16CR57B	2K	72	20 MHz	20	TMR0 + WDT	28
PIC 16C58A	2K	73	20 MHz	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16CR58A	2K	73	20 MHz	12	TMR0 + WDT	18

Figura 5.10: Características de los modelos PIC16C(R)5X de la gama baja.

Para terminar el comentario introductorio sobre los componentes de la gama baja conviene nombrar dos restricciones importantes:

La pila o “stack” sólo dispone de dos niveles lo que supone no poder encadenar más de dos subrutinas.

Los microcontroladores de la gama baja no admiten interrupciones.

5.2.6.7.3 Gama media: PIC16FXXX con instrucciones de 14 bits.

Es la gama más variada y completa de los PIC. Abarca modelos con encapsulado desde 18 patitas hasta 68, cubriendo varias opciones que integran abundantes periféricos. Dentro de esta gama se halla el «fabuloso PIC16X84» y sus variantes.

En esta gama sus componentes añaden nuevas prestaciones a las que poseían de la gama baja, haciéndoles más adecuados en las aplicaciones complejas. Admiten interrupciones, poseen comparadores de magnitudes analógicas, convertidores A/D, puertos serie y diversos temporizadores.

El repertorio de instrucciones es de 35, de 14 bits cada una y compatible con el de la gama baja. Sus distintos modelos contienen todos los recursos que se precisan en las aplicaciones de los microcontroladores de 8 bits. También dispone de interrupciones y una Pila de 8 niveles que permite el anidamiento de subrutinas. En la figura 5.8 se presentan las principales características de los modelos de esta familia.

Encuadrado en la gama media también se halla la versión PIC14C000, que soporta el diseño de controladores inteligentes para cargadores de baterías, pilas pequeñas, fuentes de alimentación ininterrumpibles y cualquier sistema de adquisición y procesamiento de señales que requiera gestión de la energía de alimentación. Los PIC 14C000 admiten cualquier tecnología de las baterías como Li-Ion, NiMH, NiCd, Ph y Zinc.

El temporizador TMR1 que hay en esta gama tiene un circuito oscilador que puede trabajar asíncronamente y que puede incrementarse aunque el microcontrolador se halle en el modo de reposo (“sleep”), posibilitando la implementación de un reloj en tiempo real.

Las líneas de E/S presentan una carga “pull-up” activada por software.

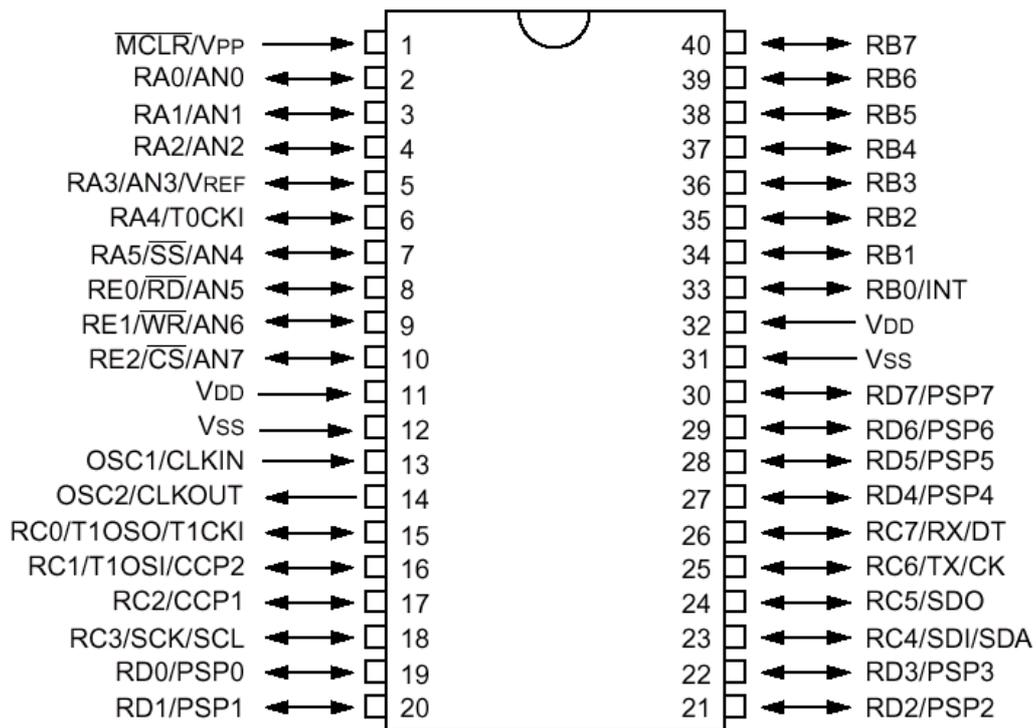


Figura 5.11: Diagrama de patitas del PIC16C74, uno de los modelos más representativos de la gama media.

Modelo	Memoria Programa	Memoria Datos		Registros específicos	Líneas E/S	Temporizadores	Patitas
		RAM	EEPROM				
PIC 16C84	1Kx14 EEPROM	36	64	11	4	TMR0 + WDT	18
PIC 16F84	1Kx14 FLASH	68	64	11	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16F83	512x14 FLASH	36	64	11	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16CR84	1Kx14 ROM	68	64	11	12	TMR0 + WDT	18
PIC 16C83	512x14 ROM	36	64	11	20	TMR0 + WDT	18

Figura 5.12: Características relevantes de los modelos PIC16X8X de la gama media.

5.2.6.7.4 Gama alta: PIC17CXXX con instrucciones de 16 bits.

Se alcanzan las 58 instrucciones de 16 bits en el repertorio y sus modelos disponen de un sistema de gestión de interrupciones vectorizadas muy potente. También incluyen variados controladores de periféricos, puertas de comunicación serie y paralelo con elementos externos, un multiplicador hardware de gran velocidad y mayores capacidades de memoria, que alcanza los 8 k palabras en la memoria de instrucciones y 454 bytes en la memoria de datos.

Quizás la característica más destacable de los componentes de esta gama es su arquitectura abierta, que consiste en la posibilidad de ampliación del microcontrolador con elementos externos. Para este fin, las patitas sacan al exterior las líneas de los buses de datos, direcciones y control, a las que se conectan memorias o controladores de periféricos. Esta facultad obliga a estos componentes a tener un elevado número de patillas comprendido entre

40 y 44. Esta filosofía de construcción del sistema es la que se empleaba en los microprocesadores y no suele ser una práctica habitual cuando se emplean microcontroladores. En la tabla de la figura 4.12 se muestran las características más relevantes de los modelos de esta gama, que sólo se utilizan en aplicaciones muy especiales con grandes requerimientos.

Modelo	Memoria Programa	Memoria Datos RAM	Registros específicos	Temporizadores	PWM	Líneas E/S	Patillas
PIC 17C42A	2Kx16	232	11	4 + WDT	2	33	40/44
PIC 17C43	4Kx16	454	11	4 + WDT	2	33	40/44
PIC 17C44	8Kx16	454	11	4 + WDT	2	33	40/44
PIC 17C752	8Kx16	454	11	4 + WDT	3	50	64/68
PIC 17C756	16Kx16	902	11	4 + WDT	3	50	64/68

Figura 5.13: Características más destacadas de los modelos PIC17CXXX de la gama alta.

5.2.6.7.5 Gama mejorada: PIC18FXXX con instrucciones de 16 bits.

A principios del milenio, microchip presentó la gama mejorada de los PIC's, diseñados para soportar aplicaciones avanzadas de automatización. Estos se destacaron por una gran velocidad (40 MHz) y su gran rendimiento. Los PIC18 son considerados de alto desempeño y tienen entre sus miembros a PICs con módulos de comunicación y protocolos avanzados (USB, Ethernet, Zigbee por ejemplo).

Algunos miembros de la familia PIC18F de alta densidad y alto número de pines, ofrecen una memoria Flash de alta duración, autorreprogramable de 96 y 128 Kbytes, con un rendimiento de hasta 10 MIPS sobre un amplio rango de voltaje de alimentación de 2 a 5,5V. Estas características combinadas con el manejo de energía por tecnología nanoWatt y un rico conjunto de periféricos analógicos y digitales, permiten a estas series de microcontroladores competir con dispositivos de 16 bits en aplicaciones integradas de gama alta manteniendo la facilidad de uso y las inversiones en software y herramientas de desarrollo de 8 bits.

Los ingenieros tienen una necesidad creciente de microcontroladores con un suministro computacional y un tamaño de memoria de programa mayor, debido a la transición de metodologías de desarrollo de códigos de ensamblador a lenguaje C, y ellos prefieren no desechar sus códigos de 8 bits y sus herramientas de desarrollo. Las series de microcontroladores de 8 bits PIC18F8722, sacadas al mercado recientemente, dirigen este rendimiento y estas necesidades de memoria proporcionando acceso lineal a un espacio de memoria de hasta 2 Mbytes, mientras que ofrece una compatibilidad total de códigos y herramientas con microcontroladores de Microchip más pequeños. Además los nuevos microcontroladores PIC18F incluyen la tecnología nanoWatt™ para reducir el consumo de energía y prolongar la vida de las baterías, junto con dos puertos serie síncronos (capaces de SPI™ o I2C™) y dos puertos serie asíncronos (USARTs con capacidad LIN) para expandir su conectividad. Las aplicaciones de gama alta que se pueden beneficiar del gran espacio de acceso de memoria lineal de las series PIC18F8722 incluyen: industrial (interfaz TCP/IP, alarmas de hogar, servidor de suministro de energía y controlador de temperatura,...); consumo (dispositivos que permiten internet inalámbrica,...); automoción (alarma de coches); médico (medida de parámetros biológicos).

Así por tanto, la gama mejorada de los PIC ha supuesto un salto cualitativo de grandes dimensiones, con toda seguridad el mayor en las sucesivas evoluciones de las gamas de los PIC, y no hace sino refrendar que el mundo de los PIC y de los microcontroladores en general, no encuentra de momentos límites, y pueden estar presentes en multitud de aplicaciones, desde las más sencillas con los modelos más sencillos y pequeños, como los PIC12 o el clásico 16F84, hasta aplicaciones verdaderamente compleja utilizando los PICs de la gama mejorada recientemente vistos.

5.2.6.8 PIC16F877 elegido el microcontrolador para el sistema de levitación.

Ante la gran variedad de microcontroladores presentes en el mercado, en primer lugar se ha elegido el fabricante cuyo seleccionado ha sido Microchip. Se han citado anteriormente las ventajas y características que este fabricante ofrece. Es sin duda uno de los más conocidos, se dispone de experiencia en la utilización de los microcontroladores de este fabricante.

Una vez elegido el fabricante tenemos disponibles infinidad de familias y gamas. En primer lugar es imprescindible que el dispositivo posea conversor analógico-digital, pues es necesario en el sistema total su uso y si las características propias del conversor lo permitieran que mejor que utilizar el propio conversor que va incluido en el PIC. Por lo demás sería bueno que contara con un número suficiente de entradas/salidas, pues hay que recordar que su conexión a un convertidor digital-analógico como el DAC0808 ya va a utilizar un gran número de éstas y más todavía si finalmente el conversor analógico-digital fuera externo, que contara con memoria de tipo flash, que permita la programación y borrado del dispositivo un número elevado de veces y una frecuencia de trabajo relativamente alta, de en torno a los 20 MHz. Todas estas características son cumplidas por los PIC de la gama media y en particular por los modelos 16F87x. Dentro de éstos, los que están más desarrollados son los modelos 16F876 y 16F877, que además son dos de los más utilizados en la actualidad y que tienen precios absolutamente competitivos. El elegir uno u otro de los dos modelos citados dependerá exclusivamente de las necesidades de puertos de E/S que sean necesarias. Por lo demás, ambos PICs poseen los recursos que se necesitan para la aplicación que se pretende desarrollar y son los PICs más adecuados para esta aplicación, porque si bien es verdad que existen otros cuyas características son más que válidas, sin embargo poseen otros muchos recursos totalmente innecesarios en este caso, que elevan como es lógico su coste y por tanto hacen que sea una elección no adecuada, puesto que el objetivo es el escoger aquel dispositivo que cumpliendo los requerimientos requeridos sea el más económico.

Seguidamente se muestra el diagrama del patillaje del PIC16F877.

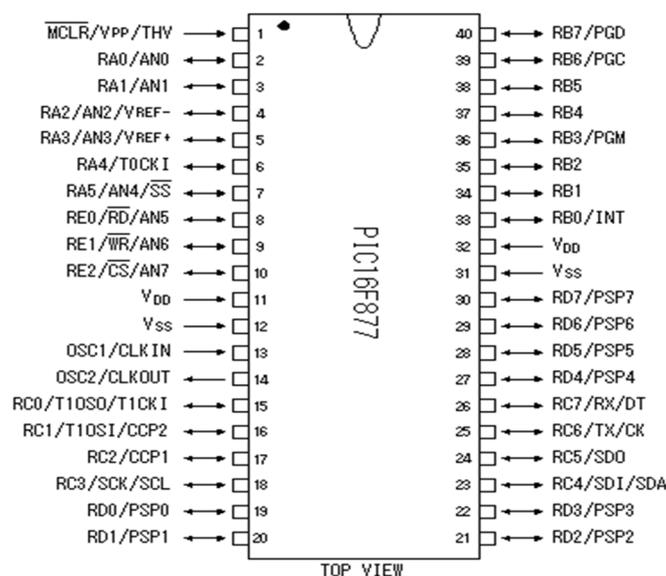


Figura 5.14: Diagrama de patillaje del PIC16F877.

5.2.6.8.1 Características generales del PIC16F877.

Las características generales del PIC16F877 más destacables son:

En cuanto a la **CPU**:

- Tecnología RISC.
- Repertorio de 35 instrucciones.
- Todas las instrucciones se ejecutan en un ciclo de reloj, excepto los saltos que requieren dos.
- Frecuencia de operación de 0 a 20 MHz (200 nseg de ciclo de instrucción).
- Opciones de selección del oscilador.

En cuanto a la **Memoria** empleada:

- Hasta 8k x 14 bits de memoria Flash de programa.
- Hasta 368 bytes de memoria de datos (RAM).
- Hasta 256 bytes de memoria de datos EEPROM.
- Lectura/escritura de la CPU a la memoria flash de programa.
- Protección programable de código.
- Stack de hardware de 8 niveles.

Como PIC de la gama media dispone de Reset y de vector de interrupciones:

- Hasta 14 fuentes de interrupción.
- Reset de encendido (POR).
- Timer de encendido (PWRT).
- Timer de arranque del oscilador (OST).
- Sistema de vigilancia Watchdog timer.

Otros:

- Modo SLEEP de bajo consumo de energía.
- Programación y depuración serie “In-Circuit” (ICSP) a través de dos patillas.
- Rango de voltaje de operación de 2.0 a 5.5 volts.
- Alta disipación de corriente de la fuente: 25mA.
- Rangos de temperatura: Comercial, Industrial y Extendido.
- Menos de 0.6mA a 3V, 4 MHz.
- Menos de 1µA corriente de standby (modo SLEEP).

A continuación se presenta una tabla de características presentes en los periféricos del PIC utilizado:

Periférico	Denominación	Características
3 a 5 puertos paralelos	Port A,B,C,D,E	Con líneas digitales programables individualmente
3 Timers	Timer 0	Contador /Temporizador de 8 bits con pre-escalador de 8 bits
	Timer 1	Contador /Temporizador de 16 bits con pre-escalador
	Timer2	Contador /Temporizador de 8 bits con pre-escalador y post-escalador de 8 bits y registro de periodo
2 módulos CCP	Captura	16 bits, 1.5 nanosegundos de resolución máxima
	Comparación	16 bits, 200 nanosegundos de resolución máxima
	PWM	10 bits
1 convertidor A/D	AN0...AN7	De 10 bits, hasta 8 canales
Puertos serie	SSP	Puerto serie Síncrono
	USART/SCI	Puerto serie Universal
	ICSP	Puerto serie para programación y depuración “in circuit”
Puerto Paralelo Esclavo	PSP	Puerto de 8 bits con líneas de protocolo

Figura 5.15: Características de los periféricos presentes en el PIC16F877.

5.3 Conversor analógico-digital.

5.3.1 Introducción.

La conversión analógica-digital (CAD) consiste en la transcripción de señales analógicas en señales digitales, con el propósito de facilitar su procesamiento (codificación, compresión, etc.) y hacer la señal resultante (la digital) más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas.

El desarrollo de los circuitos digitales, especialmente con la aparición de los microprocesadores, ha impulsado la sustitución de muchas técnicas analógicas por otras digitales. Sin embargo, las magnitudes que se obtienen del mundo en que vivimos son parámetros físicos como la temperatura, la presión, etc., que vienen determinados por señales analógicas, mientras que en nuestros circuitos están procesadas por señales digitales. De ahí la necesidad de tener unos circuitos que nos permitan esta transformación de señales.

Los conceptos de analógico y digital se conocen desde hace tiempo. Como ya se ha mencionado, la mayoría de la información existente es de tipo analógico, lo que significa que sufre una variación continua en amplitud a lo largo del tiempo.

No ocurre lo mismo con la información digital, ya que es bastante difícil encontrarla en la naturaleza y, posiblemente los pocos pasos que se encuentren pueden llevar a confusión. Sin embargo, se pueden poner como ejemplos “lleno y vacío”, “seco y húmedo”, que son valores perfectamente diferenciados y sólo admiten un número finito de estados en un intervalo finito de tiempo. Siguiendo con los ejemplos de diferenciación entre lo analógico y lo digital, se pueden mencionar los relojes que, como bien se sabe, pueden pertenecer a una u otra familia. Así, los analógicos se caracterizan por su capacidad de reflejar los infinitos valores de la variable tiempo en su recorrido. De manera que para un intervalo finito de tiempo el número de valores que se han visualizado es infinito. Los relojes digitales darán un número determinado de valores que, dependiendo de la precisión del reloj, será diferente. Si por ejemplo, únicamente tiene horas y minutos en un intervalo de sesenta segundos, sólo nos visualizará dos valores: el anterior y el siguiente a este. Si, por el contrario, el reloj tuviera también segundos en el mismo intervalo que el anterior, se mostrarían 61 valores. De este modo se comprueba que, según la precisión del reloj, se tendrá más o menos cantidad de valores visualizados. Pero, de lo que sí se puede estar seguro es que los relojes digitales siempre tendrán un número finito de valores en un intervalo de tiempo completo.

Por lo tanto, la información digital es una forma práctica de reflejar el comportamiento de la naturaleza de una manera sencilla. El proceso de extraer la información digital de la analógica es la denominada conversión analógico / digital. Y como va a ser una información digitalizada vendrá expresada en valores binarios (con “0” y “1”), ya que los encargados de tratarla serán los distintos sistemas de procesamiento digital, tales como microcontroladores, microprocesadores, DSP’s, etc.

La conversión analógico/digital viene de tiempo atrás, aunque no entendida como se hace actualmente. El funcionamiento de la conversión analógico/digital estriba en que la información analógica no es directamente manipulable, ni procesable, mediante sistemas digitales o a través de un ordenador, pero sí lo son las señales digitales que pueden almacenarse indefinidamente y, más aún, pueden incluso reproducir la señal

analógica sin error apreciable. Como ejemplo más destacable en la actualidad, es la técnica de grabación digital, donde la señal analógica que es la voz, en un proceso previo, será sometida a muestreo y transformada en lenguaje binario. Los unos y ceros que se obtienen en esta acción serán los que, posteriormente, se grabarán sobre un disco compacto (compact-disc) esto gracias a la tecnología láser, podrán ser reproducidos con una calidad de sonido increíblemente igual a la original.

La digitalización o conversión analógica-digital (conversión A/D) consiste básicamente en realizar de forma periódica medidas de la amplitud (tensión) de una señal (por ejemplo, la que proviene de un micrófono si se trata de registrar sonidos, de un sismógrafo si se trata de registrar vibraciones o de una sonda de un osciloscopio para cualquier nivel variable de tensión de interés), redondear sus valores a un conjunto finito de niveles preestablecidos de tensión (conocidos como niveles de cuantificación) y registrarlos como números enteros en cualquier tipo de memoria o soporte. La conversión A/D también es conocida por el acrónimo inglés ADC (analogue to digital converter).

En esta definición están patentes los cuatro procesos que intervienen en la conversión analógica-digital:

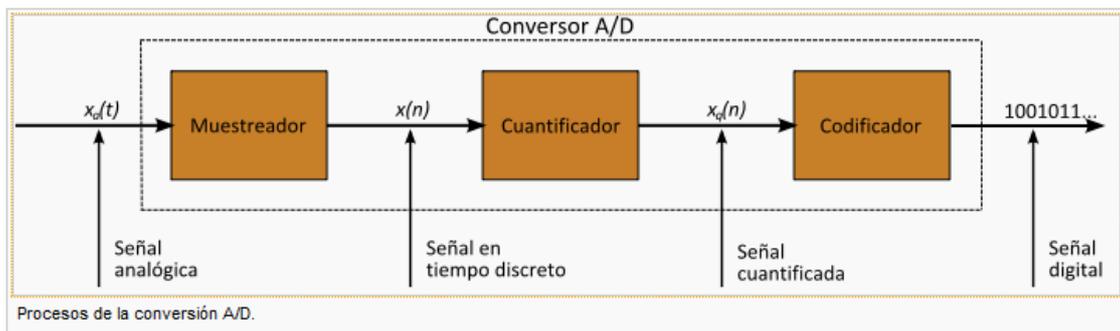


Figura 5.17: Esquema de conversión de Analógico a Digital.

Muestreo: el muestreo (en inglés, *sampling*) consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de onda. La velocidad con que se toma esta muestra, es decir, el número de muestras por segundo, es lo que se conoce como frecuencia de muestreo.

Retención (en inglés, *hold*): las muestras tomadas han de ser retenidas (retención) por un circuito de retención (hold), el tiempo suficiente para permitir evaluar su nivel (cuantificación). Desde el punto de vista matemático este proceso no se contempla, ya que se trata de un recurso técnico debido a limitaciones prácticas, y carece, por tanto, de modelo matemático.

Cuantificación: en el proceso de cuantificación se mide el nivel de voltaje de cada una de las muestras. Consiste en asignar un margen de valor de una señal analizada a un único nivel de salida. Incluso en su versión ideal, añade, como resultado, una señal indeseada a la señal de entrada: el ruido de cuantificación.

Codificación: la codificación consiste en traducir los valores obtenidos durante la cuantificación al código binario. Hay que tener presente que el código binario es el más utilizado, pero también existen otros tipos de códigos que también son utilizados.

Durante el muestreo y la retención, la señal aún es analógica, puesto que aún puede tomar cualquier valor. No obstante, a partir de la cuantificación, cuando la señal ya toma valores finitos, la señal ya es digital.

Un ejemplo de digitalización se da en un ordenador o cualquier sistema de control basado en un microprocesador que no puede interpretar señales analógicas, ya que sólo utiliza señales digitales. Es necesario traducir, o transformar en señales binarias, lo que se denomina proceso de digitalización o conversión de señales analógicas a digitales.

En la gráfica inferior se observa una señal analógica, que para ser interpretada en un ordenador ha de modificarse mediante digitalización. Un medio simple es el muestreo o sampleado. Cada cierto tiempo se lee el valor de la señal analógica.

Si el valor de la señal en ese instante está por debajo de un determinado umbral, la señal digital toma un valor mínimo (0).

Cuando la señal analógica se encuentra por encima del valor umbral, la señal digital toma un valor máximo (1).

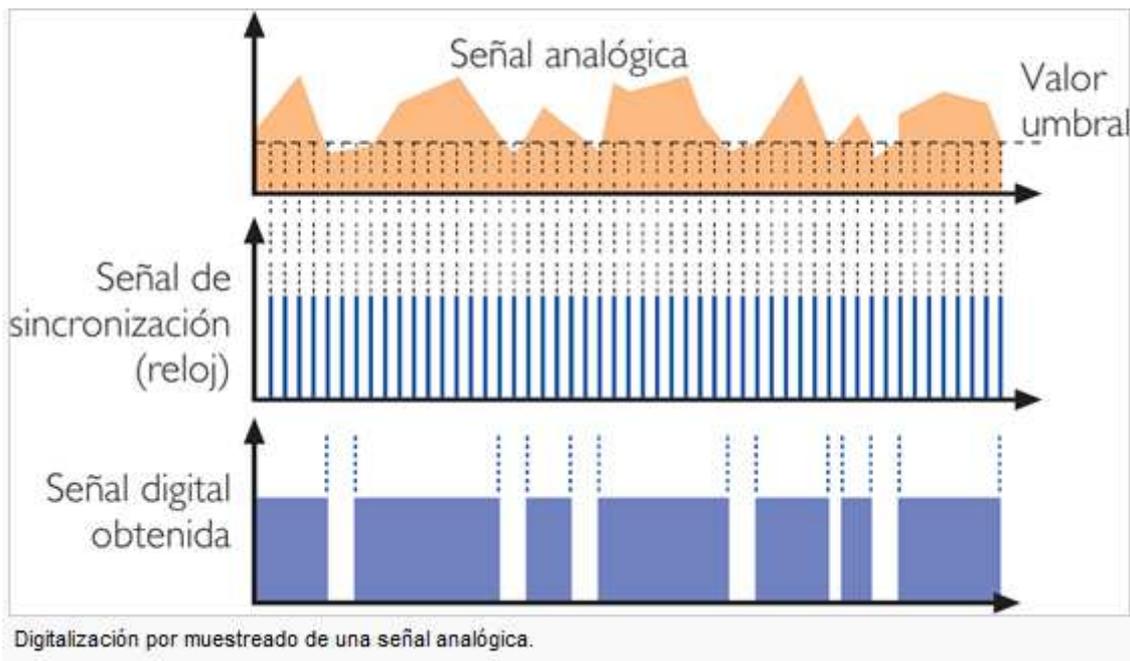


Figura 5.18: Vista de las diferentes señales a lo largo del proceso de conversión.

5.3.2 Tipos de conversores analógico-digital.

Los principales tipos de conversores analógico-digital son:

De aproximaciones sucesivas:

Es el empleado más comúnmente, apto para aplicaciones que no necesitan grandes resoluciones ni velocidades. Debido a su bajo coste se suele integrar en la mayoría de microcontroladores permitiendo una solución de bajo coste en un único chip para numerosas aplicaciones de control. El convertor realiza una búsqueda dicotómica del valor presente en la entrada. Su principal carencia es el elevado tiempo de conversión necesario.

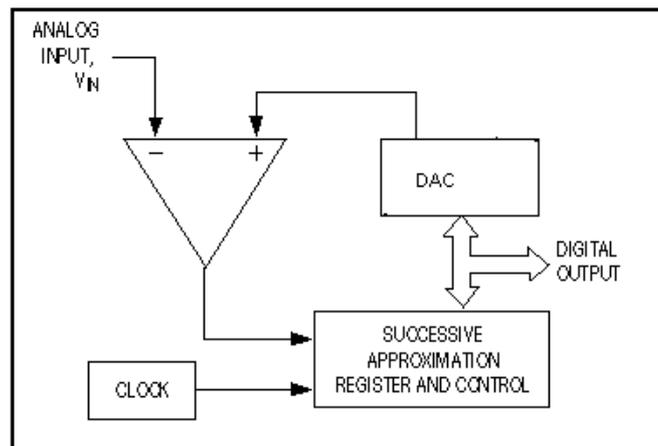


Figura 5.19: Esquema del convertor de aproximaciones sucesivas.

Flash:

Este convertor destaca por su elevada velocidad de funcionamiento. Está formado por una cadena de divisores de tensión y comparadores, realizando la conversión de manera inmediata en una única operación. Su principal desventaja es el elevado costo.

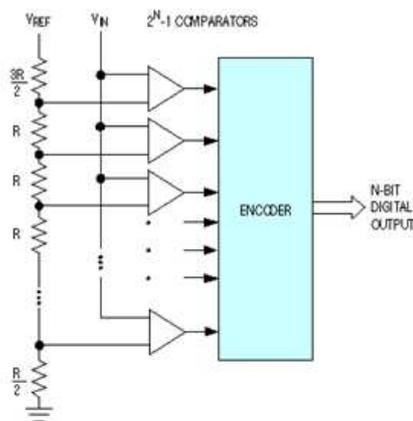


Figura 5.20: Esquema del convertor flash.

Sigma-delta:

Tienen una velocidad máxima de conversión baja pero a cambio poseen una relación señal a ruido muy elevada, la mayor de todos. La operación básica de un convertidor Sigma-Delta es intercambiar tasa de muestreo por resolución. Las señales son muestreadas a una tasa mucho mayor que la de Nyquist, pero con un solo bit de resolución en amplitud. La señal análoga de entrada y el flujo de bits (bitstream), cuya densidad de un bit es una representación de la magnitud de la señal análoga, son sumadas. Luego son integradas y entran a un comparador el cual tiene como salida 0 ó 1 dependiendo si la salida del integrador es mayor o menor que el voltaje de referencia del comparador. La forma más simple de entender la operación es suponer una pequeña variación de una condición, en estado estable y ver qué ocurre. Por ejemplo, suponer una entrada análoga positiva y el promedio del "bitstream" alto comparado con la entrada análoga, entonces la salida del sumador será negativa.

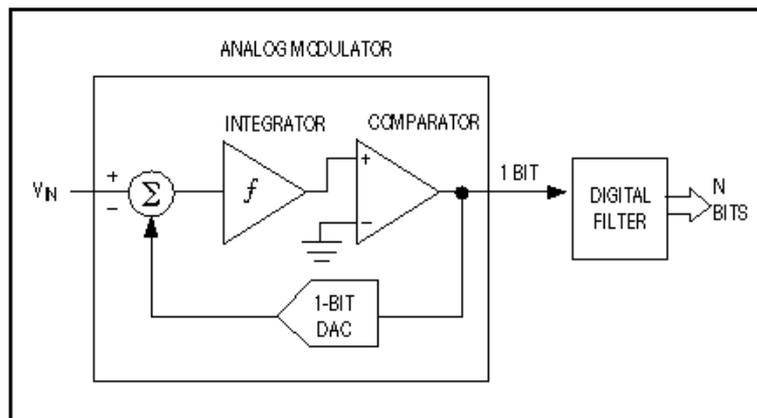


Figura 5.21: Esquema del convertidor sigma delta.

Otros tipos de conversores igualmente utilizados son: rampa, doble-rampa, etc.

Rampa:

El convertidor ADC de rampa digital es relativamente lento debido a que el contador tiene que volver a ponerse en cero al inicio de cada conversión.

Utiliza un contador ascendente/descendente para reducir este tiempo desperdiciado, el contador reemplaza al contador ascendente que proporciona las entradas al DAC.

Doble-rampa:

Es uno de los que tienen mayor tiempo de conversión, pero ofrece la ventaja de un costo relativamente bajo ya que no requiere de componentes de precisión tales como un DAC o un VCO. La operación básica de este convertidor se apoya en la carga y descarga, ambas en forma lineal, de un capacitor mediante el uso de corrientes de valor constante. Otra ventaja es su baja sensibilidad al ruido y las variaciones en los valores de sus componentes causados por los cambios de temperatura.

En la figura 5.22 se puede observar las ventajas y desventajas que presentan los conversores citados en cuanto a resolución (resolution) y ancho de banda (bandwidth).

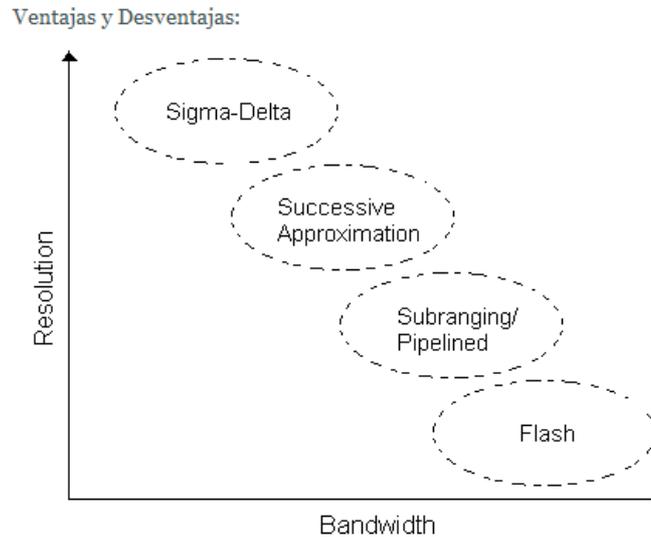


Figura 5.22: Ventanas y desventajas en cuanto a resolución y ancho de banda de los principales conversores.

5.3.3 Conceptos de los conversores analógico-digital.

Un conversor (o convertidor) analógico-digital (CAD), (o también **ADC** del inglés "Analog-to-Digital Converter") es un dispositivo electrónico capaz de convertir una entrada analógica de voltaje en un valor binario. Se utiliza en equipos electrónicos como ordenadores, grabadores de sonido y de vídeo, y equipos de telecomunicaciones. La señal analógica, que varía de forma continua en el tiempo, se conecta a la entrada del dispositivo y se somete a un muestreo a una velocidad fija, obteniéndose así una señal digital a la salida del mismo.

Resolución:

La resolución es definida como el menor cambio distintivo que puede ser resuelto por el conversor. Si se supone un conversor de n bits, la resolución viene representada por:

$$\text{Resolución} = \frac{\text{Fondo de escala}}{2^n} ;$$

Donde es entendido el "Fondo de escala", como el voltaje mayor que se puede representar en este conversor.

Precisión:

Se define la precisión del convertor o la precisión relativa, como el peor caso entre la actual y la ideal respuesta, luego de descontar el error por ganancia y el offset de la respuesta real. Este parámetro se representa por un número o fracción de LSB.

Errores:

En cuanto a los errores se refiere se pueden distinguir:

Errores lineales:

Son los más comunes para los ADC's, éstos son corregidos por simples calibraciones, por adición y/o multiplicación de constantes. Este tipo de errores no distorsionan la función de transferencia, sólo cambian el rango de operación del ADC.

Error de OFFSET:

Corresponde a un corrimiento debido a una cte. de la respuesta real a la ideal. Dicha diferencia puede ser corregida por diversas técnicas, la más simple es la suma de un voltaje constante en sentido inverso del corrimiento, o la suma de una constante digital.

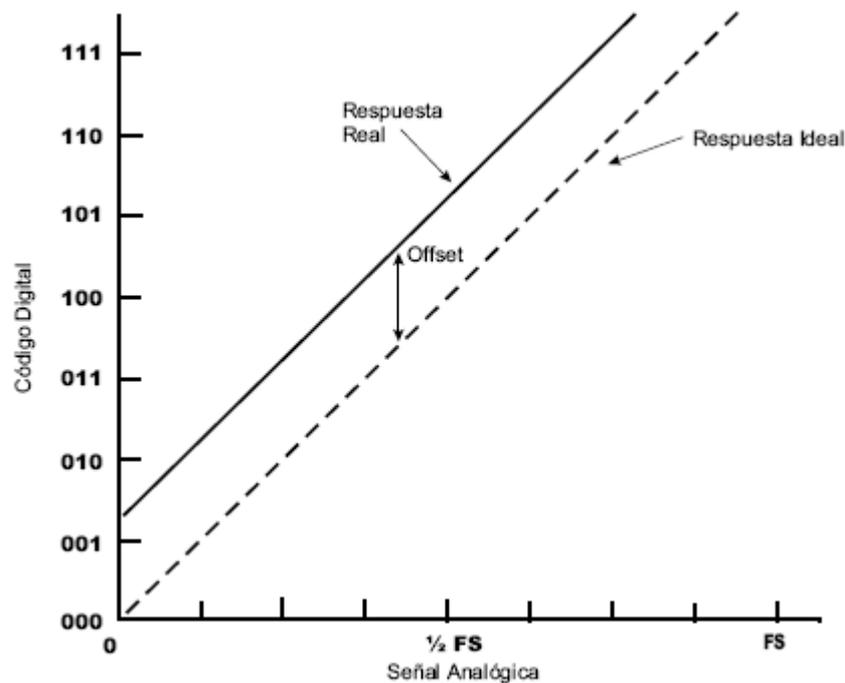


Figura 5.23: Error de offset.

Error de no linealidad diferencial (DNL):

Cuantifica la no uniformidad del tamaño de los pasos de cuantización en el convertor, usualmente se especifica como una fracción de LSB.

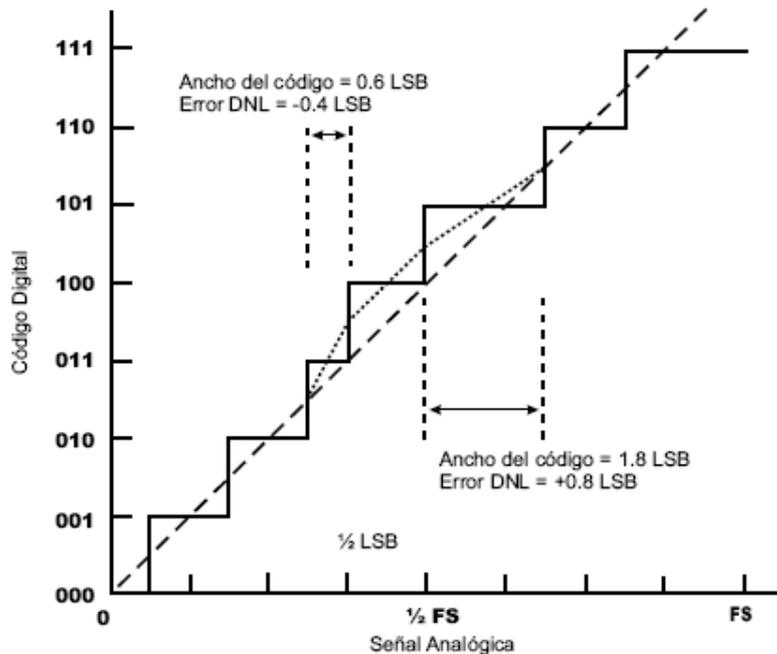


Figura 5.26: Error de no linealidad diferencial.

5.3.4 El convertor analógico-digital LTC 1273BCN.

De entre los distintos convertidores A/D, la primera opción que se tuvo en cuenta fue la utilización del propio convertor interno que el incorpora el microcontrolador PIC16F877. Es sin duda la mejor opción, pues está en el interior del PIC, es cómoda su programación, etc. Sin embargo debido a sus características de resolución y tiempo de conversión no es posible su utilización para este proyecto. Su resolución es de 8 ó 10 bits, según se elija, algo no suficiente para el proyecto que se está tratando, como después en las pruebas efectivamente se pudo comprobar. Hay que tener en cuenta que un convertor de 8 bits permite 2^7 ó 128 valores distintos mientras que uno de, por ejemplo 12 bits, permite 2^{11} , o lo que es lo mismo, 2048 valores distintos, lo que supone un cambio realmente significativo. Se pudo comprobar además, a través de medidas en el osciloscopio, que el tiempo de conversión del convertor interno del PIC era elevado, suponiendo una ralentización de todo el proceso al llegar a ese punto. Por todo ello, se descartó la utilización del convertidor A/D del PIC y se sondeó el mercado en busca de algún convertor externo que se adecuara a las necesidades requeridas. De entre ellos se eligió el convertor A/D LTC 1273BCN. Se trata de un convertor de excelentes prestaciones, con un tiempo de conversión realmente bajo ($2.7 \mu s$), y más si lo comparamos con el del convertor del PIC, de una resolución de 12 bits y con formato de extracción de datos en paralelo, que es otra característica que se buscaba para facilitar la conexión entre componentes y simplificar la complejidad del sistema.

Además el modelo seleccionado dentro de la familia de convertidores A/D de 12 bits de Linear Technology, el 1273, trabaja con un rango de tensión de entrada de 0 a 5V, lo cual es inmejorable, puesto que las salidas de este convertidor van unidas directamente a las patillas del PIC que hay que recordar trabaja con niveles TTL, es decir 0 ó 5V, para niveles lógicos “bajos” y “altos” respectivamente.

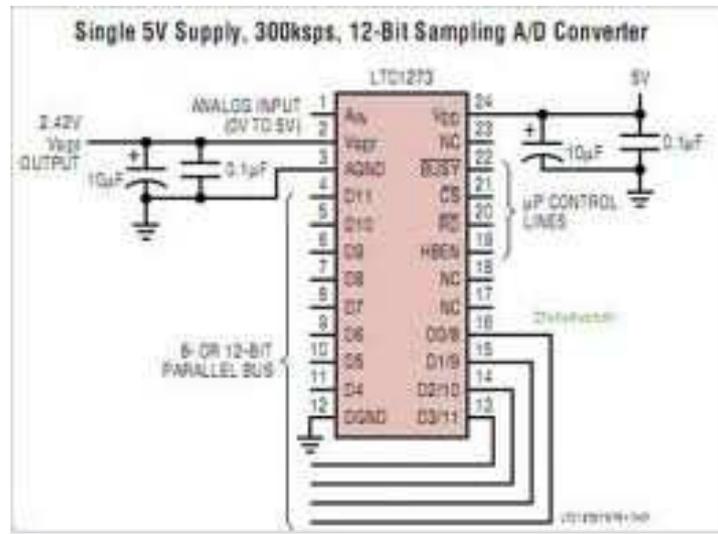


Figura 5.27: Esquema de funcionamiento del convertidor LTC1273BCN.

5.4 Conversor digital-analógico.

5.4.1 Introducción.

Un conversor digital-analógico tiene como entrada una señal digital para dar a su salida una señal analógica. El valor de la salida depende de una tensión de referencia V_{REF} suministrada al convertidor.

Sea la entrada A_{in} una señal (o palabra) digital de N bits de la forma:

$$A_{in} = a_1 2^{N-1} + a_2 2^{N-2} + \dots + a_{N-1} 2^1 + a_N 2^0 \quad (1)$$

Dónde los coeficientes a_i (bits) pueden tomar los valores 0 ó 1. Se define a_N como el bit menos significativo (LSB) y a_1 como el bit más significativo (MSB).

La señal de salida del conversor (V_{out}) viene dada por:

$$V_{out} = A_{in} \frac{V_{REF}}{2^N} \quad (2)$$

Se ha supuesto que las señales son de tensión, aunque en la práctica puede tratarse de cualquier tipo de señal (corriente, carga, etc.). También se ha supuesto que la palabra A_{in} codifica un valor positivo. La discusión puede generalizarse para señales negativas si se sabe cómo están codificadas.

Se define la magnitud V_{LSB} como la variación en la tensión de salida al cambiar el bit menos significativo:

$$V_{LSB} = \frac{V_{REF}}{2^N} \quad (3)$$

Es cómodo (sobre todo para el estudio de los errores) definir la unidad adimensional “LSB”:

$$1 \text{ LSB} = \frac{V_{LSB}}{V_{REF}} = \frac{1}{2^N} \quad (4)$$

Para pasar una señal de tensión a LSB habría que dividir por V_{REF} y multiplicar por 2^N . (O lo que es lo mismo, dividir por V_{LSB}).

La figura 5.27 muestra la característica de transferencia de un conversor D/A ideal de 2 bits. Obsérvese que el número de valores posibles a la salida del conversor es 2^N , siendo N el número de bits del conversor. El valor máximo es $V_{REF} - V_{LSB}$ y la diferencia entre un valor posible y el inmediato es V_{LSB} . (En unidades de LSB, el valor máximo de salida es $2^N - 1$ LSB y el intervalo entre valores 1 LSB).

5.4.2 Tipos.

Los tipos más comunes de la DAC electrónico son:

Convertidor en escalera ponderado R/2R (Weighted Resistor Ladder)

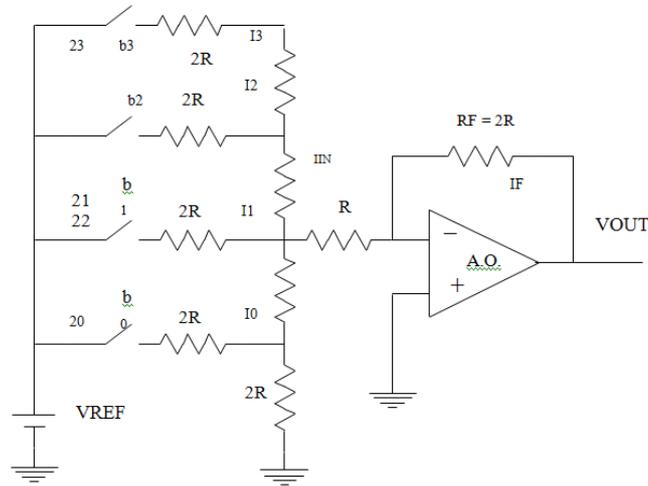


Figura 5.29: Esquema de un convertidor en escalera.

$$V_{OUT} = - \frac{V_{REF}}{R} \left(\frac{b_3}{8} + \frac{b_2}{4} + \frac{b_1}{2} + \frac{b_0}{1} \right)$$

Convertidor con ponderación binaria:

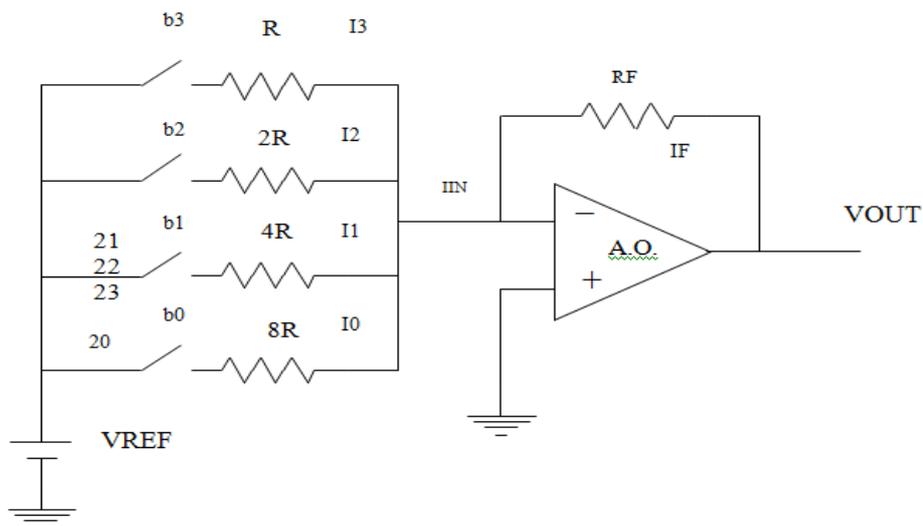


Figura 5.30: Esquema de un convertidor con ponderación binaria.

$$V_{OUT} = - \frac{V_{REF}}{R} \left(\frac{b_{n-1}}{2} + \frac{b_{n-2}}{4} + \frac{b_{n-3}}{8} + \dots + \frac{b_1}{2^{n-1}} + \frac{b_0}{2^n} \right)$$

Este tipo de convertidor es simple y trabajan en paralelo, pero su principal desventaja es el gran número de resistencias de distinto valor que se necesitan. Así, para un DAC de 10 bits son necesarias 10 resistencias con valores de R a $512 R$, con una muy baja tolerancia para poder mantener la precisión del convertidor.

5.4.3 Parámetros característicos de un convertidor DAC.

Escala completa de salida (Full-Scale Output (FSO)):

Se define como el máximo valor analógico de salida posible, es decir, cuando se aplica a la entrada el máximo valor binario.

Resolución (Resolution):

Se define como el número de valores analógicos distintos que puede resolver el conversor. La resolución se expresa normalmente en bits y corresponde al número de bits de la entrada.

Error de offset (EOFF):

Es la salida del conversor para una entrada nula. En unidades de LSB:

$$E_{OFF} (LSB) = \frac{V_{OUT}}{V_{LSB}} \Big|_{A_{in} = 0 \dots 0}$$

Error de ganancia (EGAIN):

Es la diferencia entre el valor de salida real al fondo de escala (es decir, para $A_{in} = 1 \dots 1$), tras corregir E_{OFF} , y el valor ideal:

$$E_{GAIN} (LSB) = \left(\frac{V_{OUT}}{V_{LSB}} \Big|_{A_{in} = 1 \dots 1} - E_{OFF} \right) - (2^N - 1)$$

Precisión o exactitud:

Es la máxima diferencia entre el valor de salida real del convertor y el ideal. La precisión absoluta incluye los errores de *offset* y ganancia. La precisión relativa se calcula tras corregir los errores de *offset* y de ganancia y coincide con el valor máximo del error integral de no linealidad. No debe confundirse la precisión con la resolución del convertor.

La precisión se puede expresar como porcentaje de fondo de escala, en LSB o como número efectivo de bits. En este último caso, un número efectivo de bits N_{eff} significa que el error normalizado al fondo de escala es menor que $1/2^{N_{eff}}$. Cuando se calcula N_{eff} siempre se redondea hacia el entero inmediatamente inferior.

Por ejemplo, supongamos un convertor con $V_{REF} = 4 \text{ V}$ y que la máxima desviación entre los valores reales y los ideales es: $\Delta V = 11 \text{ mV}$.

Para calcular N_{eff} se tendría:

$$\frac{\Delta V}{V_{REF}} < \frac{1}{2^{N_{eff}}} \Rightarrow N_{eff} < \log_2 \frac{\Delta V}{V_{REF}} = 8.5 \Rightarrow N_{eff} = 8$$

La precisión absoluta expresada como número efectivo de bits se conoce como número absoluto de bits del convertor y la precisión relativa corresponde al número relativo de bits.

Error integral de no linealidad (E_{INL}):

Una vez corregidos los errores de *offset* y de ganancia, se define el error integral de no linealidad como la desviación de cada valor de salida con respecto a una línea recta. Obsérvese que el E_{INL} se define para cada uno de los valores de entrada. Como línea recta se puede considerar la resultante de unir los puntos de origen y de fondo de escala (que tras corregir E_{OFF} y E_{GAIN} coincidirán con los ideales), o considerar la recta resultante del análisis de regresión de la salida. En el primer caso, el valor máximo de E_{INL} coincide con la precisión.

Error diferencial de no linealidad (E_{DNL}):

Se define como la desviación del intervalo entre dos valores analógicos de salida consecutivos con respecto al valor ideal de 1 LSB (una vez corregidos los errores de *offset* y de ganancia). Por ejemplo, si la diferencia entre dos valores de salida consecutivos es de 1.08 LSB, el E_{DNL} es de 0.08 LSB.

Monotonicidad:

Un convertor D/A es monotónico si la salida siempre aumenta al aumentar la entrada. En otras palabras, la curva de transferencia es siempre creciente. Si el E_{DNL} máximo es menor que 1 LSB o si el E_{INL} máximo es menor que 0.5 LSB, se garantiza que el convertor es *monotónico*. No obstante, el convertor puede ser monotónico sin cumplir las condiciones anteriores.

5.4.4 Aplicaciones.

Los DAC se utilizan siempre que la salida de un circuito digital tiene que ofrecer un voltaje o corriente analógico para impulsar o activar un dispositivo analógico. Algunas de las aplicaciones más comunes se describen a continuación.

- **Control:** la salida digital de una computadora puede convertirse en una señal de control analógica para ajustar la velocidad de un motor, la temperatura de un horno o bien para controlar casi cualquier variable física.

- **Análisis automático:** las computadoras pueden ser programadas para generar las señales analógicas (a través de un DAC) que se necesitan para analizar circuitos analógicos. La respuesta de salida analógica del circuito de prueba normalmente se convertirá en valor digital por un ADC y se alimentará a la computadora para ser almacenada, exhibida y algunas veces analizada.

- **Control de amplitud digital:** un DAC multiplicativo se puede utilizar para ajustar digitalmente la amplitud de una señal analógica. Recordemos que un DAC multiplicativo produce una salida que es el producto de un voltaje de referencia y la entrada binaria. Si el voltaje de referencia es una señal que varía con el tiempo, la salida del DAC seguirá esta señal, pero con una amplitud determinada por el código de entrada binario. Una aplicación normal de esto es el “control de volumen” digital, donde la salida de un circuito o computadora digital puede ajustar la amplitud de una señal de audio

5.4.5 Convertor digital-analógico DAC0808.

Entre los convertidores D/A más conocidos se encuentra sin lugar a dudas el DAC0808. Se trata probablemente del convertidor más conocido a nivel de aprendizaje, pero no por ello es un convertidor que no ofrezca unas prestaciones más que adecuadas para otras muchas aplicaciones, de hecho su popularidad, fama y vigencia en el mercado se sustentan en esto precisamente. Se trata de un DAC de 8 bits, con tiempo de estabilización de 150 ns, precisión de +/- 1LSB, con formato paralelo de ingreso de datos y que puede operar con una tensión de +/-5V. Sus características lo hacen adecuado para la aplicación que se está tratando, y esto sumado a su bajo coste y a

alguna experiencia positiva que ya se tenía con él, hicieron que finalmente éste fuera el DAC seleccionado. En las figuras que se acompañan a continuación (5.24 y 5.25), se puede observar el aspecto exterior que presenta este convertidor así como la distribución de pines que presenta este circuito integrado.



Figura 5.31: Imagen del convertidor analógico-digital DAC0808 utilizado.

Otra característica destacada de este convertidor es que trabaja con señal de corriente y no con señal de tensión, como se sería deseable para este caso concreto. Por ello es necesaria la utilización de un amplificador operacional. En particular se ha utilizado el operacional LF356. Se trata de un operacional con un tiempo de respuesta rápido e ideal para esta aplicación, de hecho, es el recomendado en la hoja de características del fabricante del DAC0808. Como ya se ha mencionado con anterioridad en esta memoria se desea obtener a la salida una tensión, correspondiente a la tensión de control de entre 0 y 5V para entregárselo a nuestra fuente de intensidad. Así pues para estas características, el circuito del convertidor con el amplificador operacional LF356 será el mostrado en la figura 5.32.

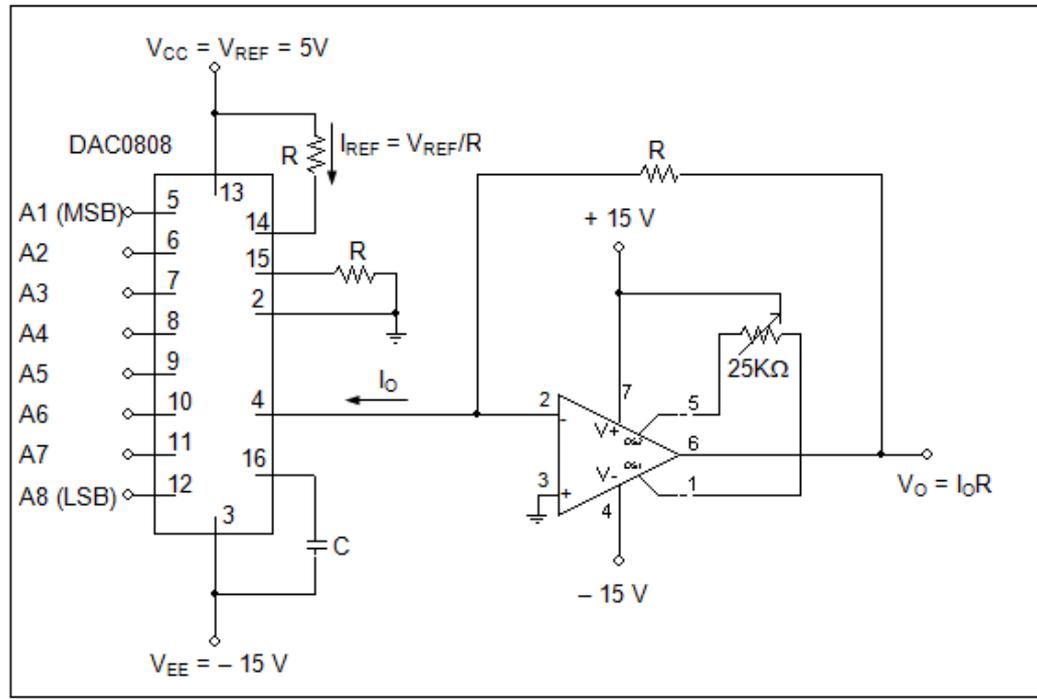


Figura 5.32: Conexión del LF356 al DAC0808 para obtener una salida de tensión de entre 0 y 5V.

5.5 Construcción de un ICSP.

5.5.1 Introducción.

Los microcontroladores PIC se graban mediante un método llamado ICSP (*in circuit serial programming*), que nos van a permitir grabar la memoria de programa, la memoria de datos y la palabra de configuración.

A continuación se van a ir explicando los principios básicos de grabación, para las familias 16F8X y 16F87X que son las que nos ocupa en el proyecto. Esta información resultará útil para construir un programador de PICS. En los manuales de Microchip hay más información por si el lector quiere ampliar conocimientos.

5.5.2 Modo monitor.

Para realizar la grabación, el PIC debe estar en modo monitor. Existen varias maneras de entrar en este modo, que dependen del PIC que se esté utilizando. Para el caso que nos aborda se utilizará el método denominado de bajo voltaje introduciendo 5 voltios por la pata RB3.

En la figura 5.32 se muestra un ejemplo de un circuito para hacer que el PIC entre en modo monitor. Hay que introducir 5V por la patilla MCLR. Cada vez que se pulse (y

suelte) el botón de reset, el pic entrará en modo monitor, por lo que se tendrá acceso a los servicios de grabación.

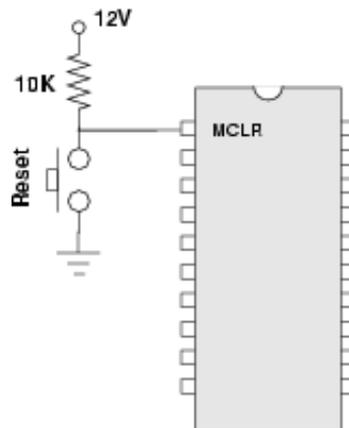


Figura 5.33: Activación de la patilla MCLR para entrar en modo monitor.

5.5.3 Arquitectura.

Una vez en modo monitor, se tiene acceso a una serie de servicios, a través del protocolo ICSP. Este protocolo se describe a dos niveles: nivel físico y nivel de comandos. En el nivel físico se especifica cómo se transmiten los bits (temporizaciones, sincronismo, etc) y en el de comandos qué tramas hay que enviar para tener acceso a los diferentes servicios.



Figura 5.34: Capas de los niveles físico y nivel de comandos del protocolo ICSP.

5.5.3.1 Nivel físico.

Para realizar la comunicación se utiliza un protocolo serie síncrono. Son necesarios dos hilos, del puerto B, uno para llevar los datos (conectado a RB7) y otro para el reloj (conectado a RB6).

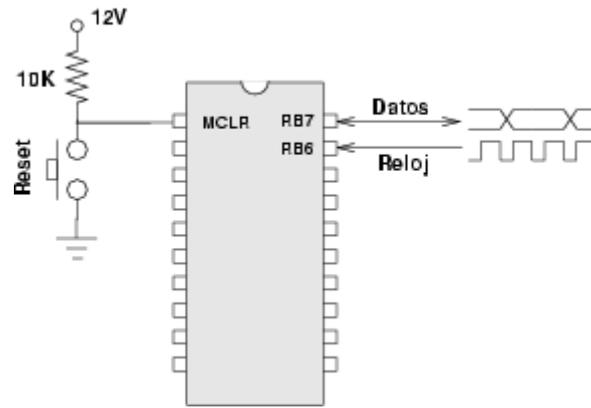


Figura 5.35: Patilla MCLR a activar y funcionamiento de las patillas RB7 Y RB6 donde se pueden observar los distintos tipos de señal que circulan por ellas.

Despues de mucho buscar y experimentar con diferentes metodos de construccion de un ICSP se dio con el siguiente modelo que proporciona MICROCHIP con una herramienta.

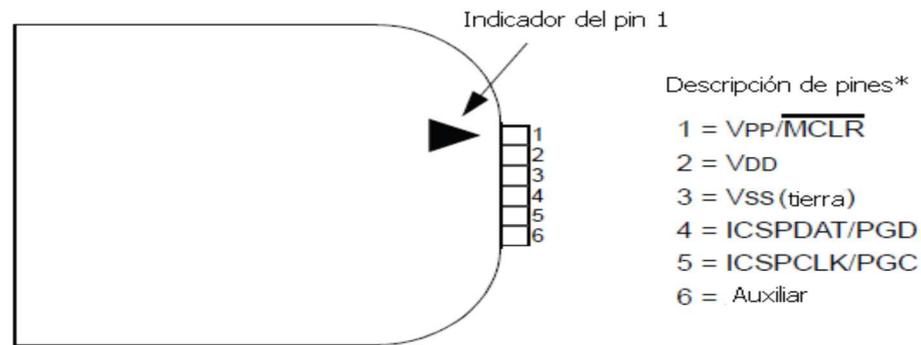


Figura 5.36: Programador PICKit 2 de Microchip.

El PicKit2 es un programador denominado in-circuit-programmer, es decir, no tiene un zócalo para programar el pic, más bien tiene un conector de 6 pines para conectar con la tarjeta del pic.

Se debe tener cuidado con esta característica pues si no está conectado de manera correcta el PIC nunca podrá ser programado y hasta puede llegar a dañarse. Esta última es lo que se ha resistido más, ya que la conexión entre PICkit2 y el circuito ICSP ha llegado a dar problemas en numerables ocasiones, si bien, se ha podido subsanar.

Otra característica interesante es que el PicKit2 tiene la opción de depuración del programa.



La tira de 6 pines con espaciado de .1" acepta pines cuadrados de .025"

Figura 5.37: Pines de salida del PicKit2.

ICSP requiere de 5 señales que se analizan a continuación :

VPP → Voltaje de programación , cuando se aplica el voltaje adecuado , el PIC entra en modo programación.

ICSPCLK o PGC → Señal sincrónica unidireccional de reloj.

ICSPDAT o PGD → Señal de datos bidireccional sincrónica.

Vdd → Alimentación.

Vss → Toma de tierra.

Este es el esquema utilizado para la construcción del ICSP:

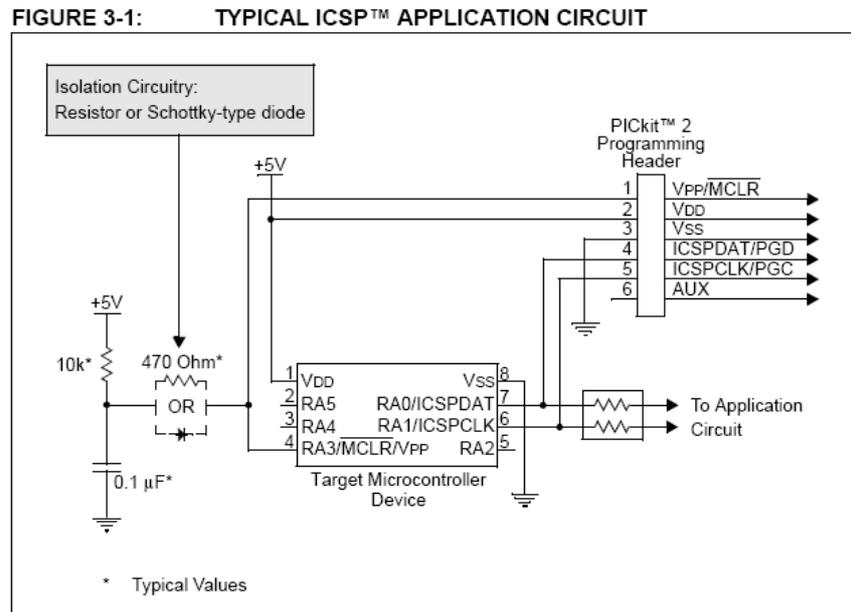


Figura 5.38: Circuito del ICSP construido.

5.5.4 Materiales.

Para la construcción del programador se ha utilizado los materiales que se muestran a continuación:

- Pila Phillips de 9V.
- Protoboard para hacer el montaje.
- Resistencias de 0.5 K Ω , 10 K Ω .
- Condensador de 0.1 μ F.
- Conversor de voltaje de 9V a 5V.
- Clavija con 5 pines.
- Cristal de cuarzo de 11,50 MHz.

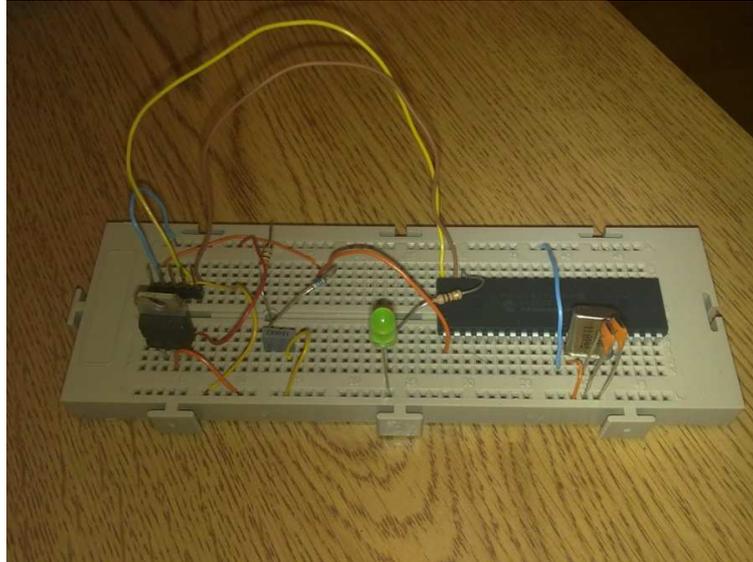


Figura 5.39: A modo de pruebas la construcción del ICSP se llevo a cabo a base de una protoboard, donde se pueden apreciar las diferentes conexiones.

La construcción del circuito requería una alimentación externa mediante pila de 9V. Ante utilización de PIC se tuvo que bajar ese voltaje a las necesidades del mismo mediante la utilización de un convertor de voltaje de 9V a los 5V requeridos por el PIC.

El ICSP estará constituido por 2 partes, el circuito y el programador PICKit2 del que ya se habló anteriormente.

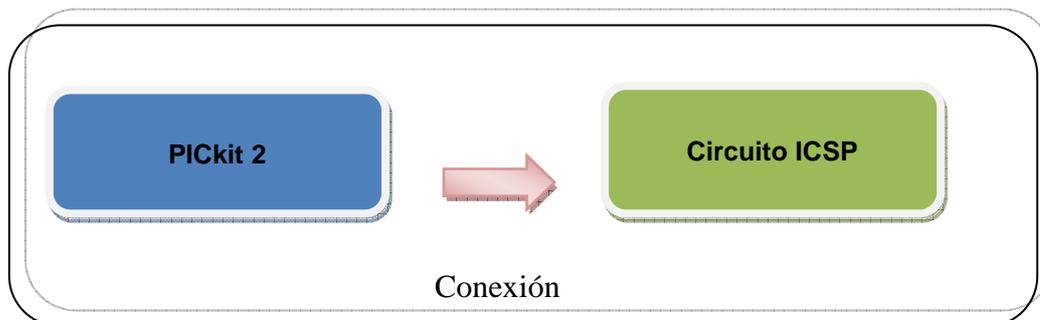


Figura 5.40: Esquema del ICSP, donde se pueden apreciar las distintas partes del mismo.

5.6 Módulo Xbee-PRO ZNet 2.5 OEM

Los módulos Xbee/Xbee-PRO ZNet 2.5 OEM fueron diseñados para operar dentro del protocolo ZigBee soportando las necesidades particulares de las redes de sensores de bajo costo y consumo, requiriendo una alimentación mínima y a la vez permitiendo el transporte confiable de datos entre dispositivos remotos.

El módulo opera dentro de la banda ISM (“*Industrial ,Scientific and Medical*”) utilizando una frecuencia de 2.4 GHz.

Los requerimientos mínimos de conexionado consisten en proveer alimentación mediante dos terminales (VCC y GND) y dos de datos (V_{in} y V_{out}). Para la actualización de firmwares es necesario agregar las conexiones de los pines RTS y DTR.

Los módulos Xbee fueron diseñados para ser montados en un zócalo, no requiriendo ningún soldado. Para ello se disponen de dos hileras de 10 pines separadas entre ellas por 22mm. Las medidas de un módulo Xbee vienen detalladas a continuación:

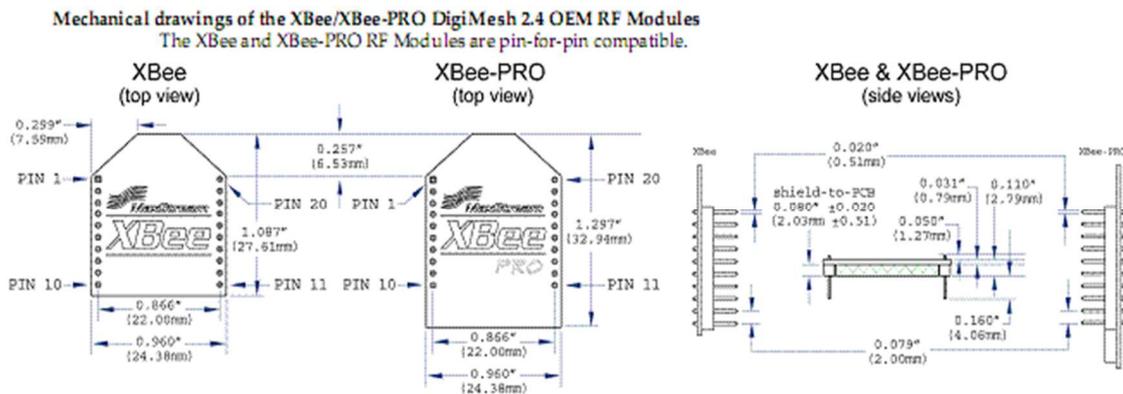


Figura 5.41: Esquema con las dimensiones de los módulos Xbee

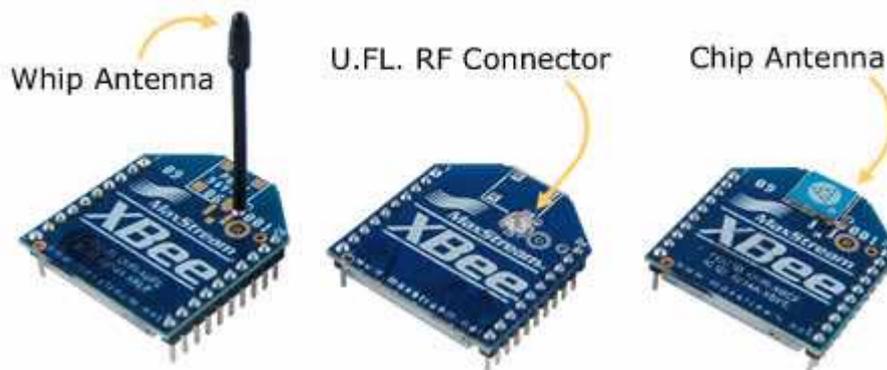


Figura 5.42: Aspecto de los módulos Xbee con antena, conector RF y Chip Antena.

5.6.1 Características.

Características eléctricas:

A continuación se presenta una tabla extraída del datasheet del dispositivo donde se aprecia las principales características eléctricas del dispositivo

Symbol	Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Units
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.2 * VCC	V
V _{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.8 * VCC	-	-	V
V _{OL}	Output Low Voltage	I _{OL} = 2 mA, VCC >= 2.7 V	-	-	0.18*VCC	V
V _{OH}	Output High Voltage	I _{OH} = -2 mA, VCC >= 2.7 V	0.82*VCC	-	-	V
I _{IN}	Input Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all inputs, per pin	-	-	0.5uA	uA

Figura 5.43: Tabla con las principales características eléctricas del módulo Xbee.

Distribución de pines:

A continuación se presenta una tabla extraída del datasheet del dispositivo donde se aprecia la descripción de cada pin.

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DIO12	Either	Digital I/O 12
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI / DIO10	Either	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	PWM / DIO11	Either	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ/ DIO8	Either	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8
10	GND	-	Ground
11	DIO4	Either	Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP / DIO9	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	[reserved]	-	Do not connect
15	Associate / DIO5	Either	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0 / Commissioning Button	Either	Analog Input 0, Digital IO 0, or Commissioning Button

Figura 5.44: Distribución de pines del modulo Xbee.

Diagrama interno de flujo de datos

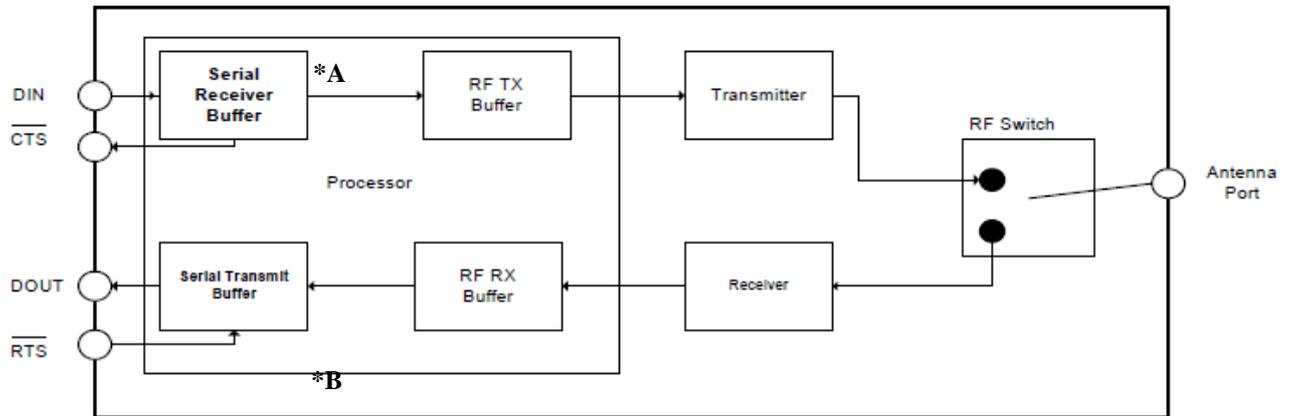


Figura 5.45: Esquema del diagrama interno de flujo de datos.

Hay que prestar especial atención a los serial buffer de recepción (*A) y el Serial buffer de transmisión (*B) debido a la cantidad de datos que se proceden a enviar y recibir.

Serial Buffer de recepción

Cuando el flujo de datos entra por el pin DIN (pin 3) los datos son almacenados en el buffer de recepción hasta que son procesados. Sobre ciertas condiciones el modulo podría no ser capaz de procesar la información inmediatamente. Si el flujo de datos recibidos es muy largo el pin CTS podría ser requerido para que no producir desbordamiento.

Serial Buffer de transmisión

Cuando los datos RF son recibidos los datos son trasladados hacia el buffer de transmisión y enviado fuera de la UART. Si el Serial buffer de transmisión se llena lo suficiente para que la información no pueda ser encajada dentro de un paquete RF de transmisión, el paquete RF entero se descarta.

5.7 Montaje del dispositivo de conexionado USB

El módulo Xbee es el encargado de conectar la red ZigBee a la computadora y por lo tanto incluye una interfaz para conectarse a la misma. Las opciones de comunicación que se presentaron durante la etapa de diseño fueron la de utilizar una comunicación serie estándar (RS-232) o mediante puerto USB. La segunda opción fue finalmente elegida ya que tiene la ventaja de utilizar puerto USB presente en cualquier PC actual. Esta diferencia es aún más marcada cuando se refiere al campo de las computadoras portátiles, cuyos diseños rara vez incluyen puertos seriales.

Los materiales que se utilizan en el conexionado son:

- 1 protoboard.
- 1 módulo XBee ZNet 2.5 OEM.
- 1 módulo Xbee Breakout Board.
- 1 módulo Xbee Xplorer regulador del voltaje
- 2 sockets de 10 pines para Xbee.
- 1 pinera para el módulo USB-SERIE y la placa adaptadora de Xbee (2,5 mm de separación).
- 1 FT232RL Breakout Board (módulo USB-SERIE).
- Cables.
- Cable USB miniB.

La placa necesaria para adaptar los pines de 2mm de separación del módulo Xbee a los 2,5 mm de separación del protoboard. Se deben montar los zócalos y las pineras correspondientes a los puntos de conexión de esta placa. El montaje es el que se presenta en la figura.



Figura 5.46: Pinera Xbee Breakout Board para montar el modulo Xbee.



Figura 5.47: Modulo Xbee ya montado Xbee Breakout Board.

5.7.1 Módulo USB FT232RL

Para la conexión entre el módulo Xbee y el puerto USB se necesita un módulo USB-SERIE. Para tal objetivo se hace uso de la placa “FT232RL Breakout Board” una interfaz entre la comunicación en serie utilizada por el módulo Xbee y la implementada de acuerdo a la norma USB.



Figura 5.48: Vista del Módulo USB FT232RL.

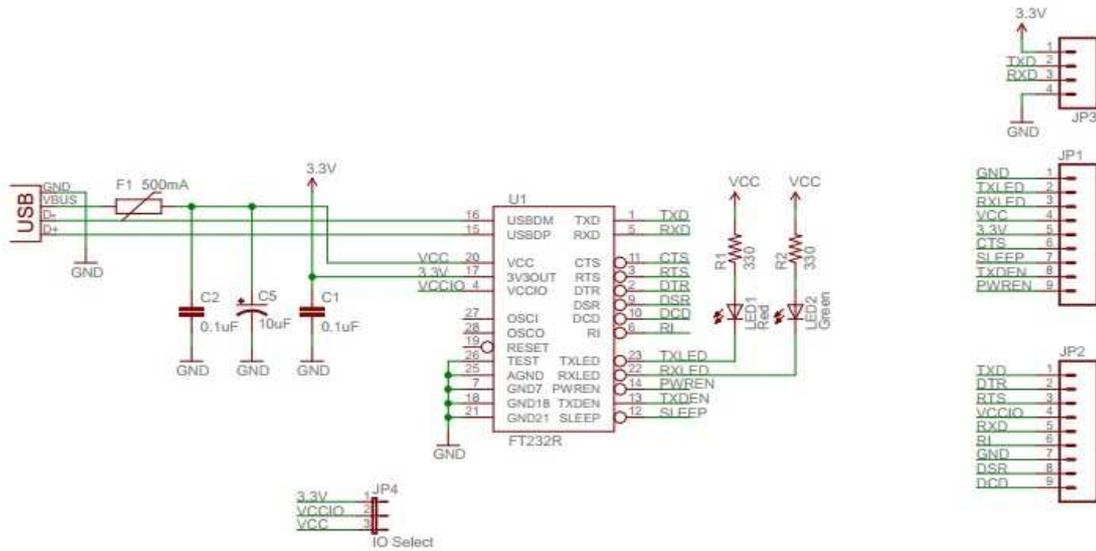
Características:

- Implementa el protocolo USB v2.0 completo
- No necesita cristal externo
- EEPROM interna para identificación del dispositivo y cadenas Descripción del producto

- Royalty-Free Soporte de controladores para Windows, Linux, y Mac OSX.
- Dimensiones: 0.9 cm x 1.25 cm.

Puede ampliar información sobre este módulo FT232RL en el anexo, al final del proyecto.

El esquema de conexionado de FT232RL es el siguiente:



FT232RL Breakout

Figura 5.49: Esquema de conexionado del modulo FT232RL.

El aspecto del módulo Xbee y el módulo FT232RL sobre una protoboard es el presentado en la figura 5.50.

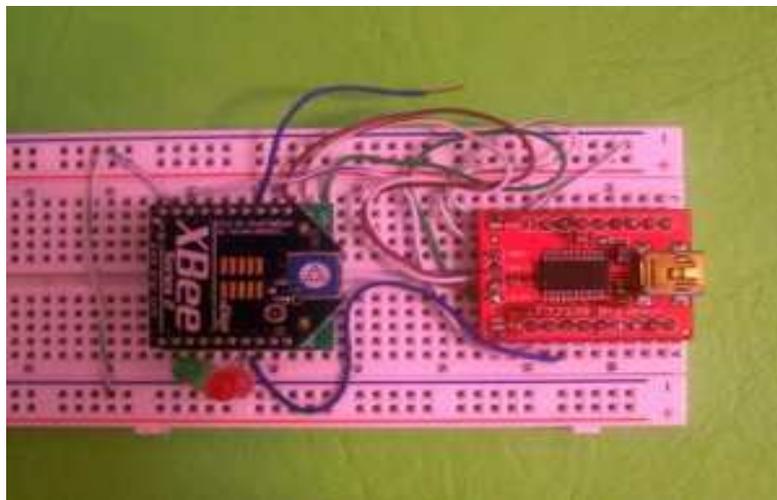


Figura 5.50: Modulo Xbee conectado al modulo FT232RL.

5.7.2 Módulo Arduino Xbee.

Ya se ha planteado anteriormente la construcción de un dispositivo para la conexión del dispositivo Xbee mediante USB. Puesto que la tarea puede ser un poco laboriosa se ha indagado en el problema y se ha encontrado una solución, que aunque no es la más económica, nos ahorrará tiempo. Para tal fin, se ha optado por utilizar la solución que nos proporciona Arduino con Arduino Xbee del que se hablará a continuación.

Este módulo fue desarrollado por Arduino para la comunicación Wireless usando el protocolo Zigbee. Xbee shield permite a una placa Arduino comunicarse de forma inalámbrica usando Zigbee. El módulo puede comunicarse hasta un alcance de 30 metros en interior y 90 metros en exterior con visión directa y sin obstáculos.

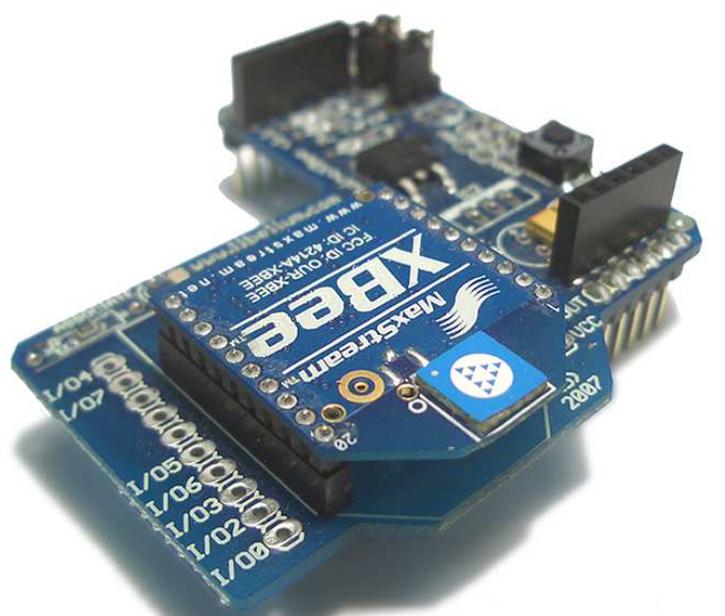


Figura 5.51: XBee Shield montado sobre la placa Arduino

Utilizando dos módulos Arduino Xbee se podrá conseguir una comunicación bidireccional entre los extremos maqueta y PC utilizando los comandos estándar de Arduino de los que se hablará en un apartado posterior.

Los materiales para la construcción de los dos módulos son:

- 2 módulos XBee Shield.

- 2 placas Arduino, una de ellas sin el microcontrolador (hay que tener cuidado especial al retirarlo para no doblarle los pines).
- Un LED.
- Un eliminador de 9V para alimentar el Arduino remoto.
- Un cable USB para conectar el Arduino local a la computadora

5.7.2.1 Configuración.

Cada módulo XBee viene configurado con los parámetros de fábrica con un PAN ID (el identificador de la red personal) con el valor 3332 y configurados con una tasa de transferencia de 9600 baudios, con datos de 8 bits, sin paridad y 1 bit de paro. Cada módulo Xbee tiene un par de jumpers para definir si la comunicación serial se realiza hacia el puerto USB o hacia el módulo XBee. Se configura para que interactúe con el puerto USB, esto quiere decir poner ambos jumpers en la posición externa de los pines, en la figura X se puede observar la ubicación de tales jumpers.

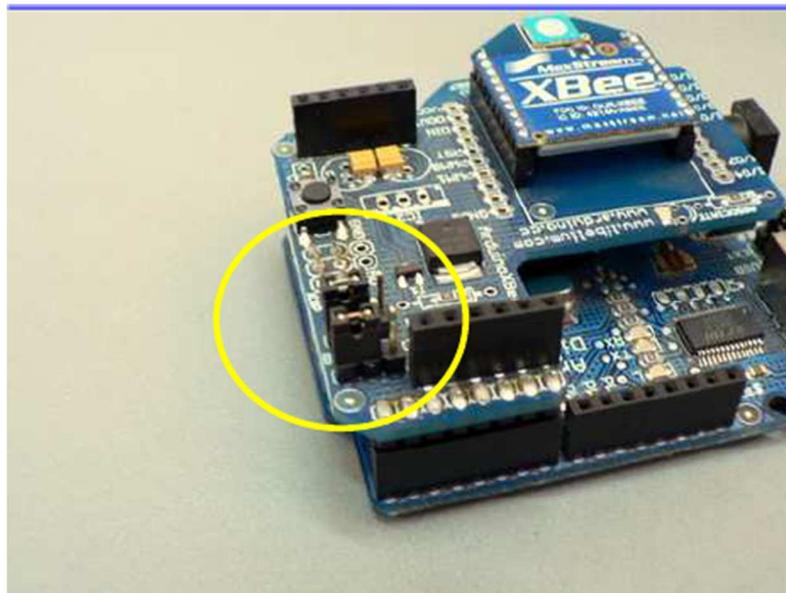


Figura 5.52: Posición de los jumpers en el módulo Arduino.

Se puede utilizar el programa Hyperterminal de Windows para comenzar a configurar el módulo XBee. Otras alternativas son el Serial Monitor que viene integrado en el entorno de programación de Arduino o el programa Bray++ Terminal.

El comando para iniciar la programación consiste en tres símbolos de operador suma seguidos, es decir, “+++”. Teclando esta secuencia se debe recibir en respuesta un “OK”. En la siguiente figura se puede observar esta interacción entre el módulo Xbee y el programa Bray++ Terminal.

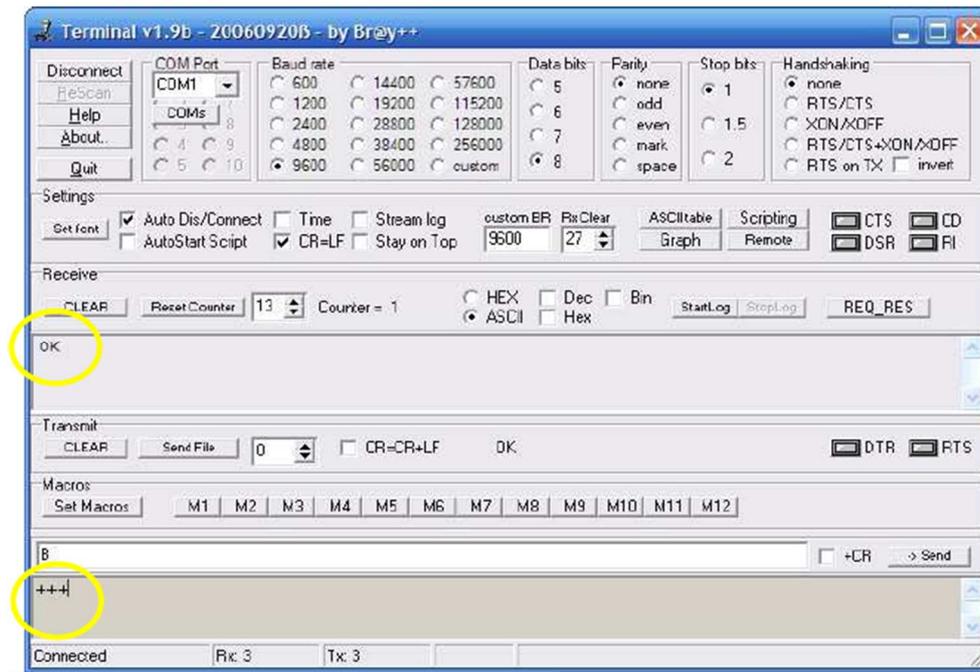


Figura 5.53: Establecimiento de la conexión con el módulo Xbee en el programa Bray++ Terminal.

Se dispone de 5 segundos para comunicarse con el módulo, pasado ese tiempo de inactividad el dispositivo vuelve a su estado nativo por lo que si se desea volver a entrar al modo programación habrá que teclear de nuevo la secuencia “+++”.

Cada comando que se introduzca debe ir precedido de las letras AT. Este modo de operación de los módems está basado en el protocolo de comandos AT de Hayes, fabricante de Smart modem en 1977. Este dispositivo fue el primero que utilizó este protocolo de comandos y hasta la fecha continúa en uso.

La cadena de comandos tiene la forma ATxx (donde xx es el nombre de un ajuste). Para leer el valor actual de la configuración, se envía la cadena de comando seguido de un retorno de carro. Para escribir un nuevo valor para la configuración, AT, seguido inmediatamente por el nuevo ajuste (sin espacios ni saltos de línea en el medio), seguido de un retorno de carro. Por ejemplo, para leer el ID de red del módulo utilice el comando “ATID” y retorno de carro:

Enviar comando	Respuesta esperada
ATID <enter>	3332 <CR>

Para cambiar el ID de red del módulo:

Enviar comando	Respuesta esperada
ATID3330 <enter>	<CR> Aceptar

Ahora, se puede comprobar que la configuración ha surtido efecto:

Enviar comando	Respuesta esperada
ATID <enter>	3330 <CR>

A menos que no se indique al módulo los cambios se guardan en una memoria volátil, que sólo estará en vigor hasta que el módulo queda sin batería. Para guardar los cambios de forma permanente se utiliza el comando **ATWR**:

Enviar comando	Respuesta esperada
ATWR <enter>	<CR> Aceptar

Para restablecer el módulo para la configuración de fábrica, utilice el **ATRE** comando:

Enviar comando	Respuesta esperada
ATRE <enter>	<CR> Aceptar

Se debe tener en cuenta que al igual que los otros comandos, el reinicio no será permanente a menos que se indique con el comando **ATWR**. Éstos son algunos de los parámetros más útiles para la configuración del módulo Xbee.

Comando	Descripción	Valores válidos	Valor por omisión
ID	El ID de red del módulo Xbee.	0 - 0xFFFF	3332
CH	El canal del módulo Xbee.	0x0B - 0x1A	0x0C
SH y SL	El número de serie del módulo Xbee (SH da los 32 bits, SL los bajos 32 bits). Sólo lectura.	0 - 0xFFFFFFFF (tanto para SH y SL)	diferente para cada módulo

MI	La dirección de 16-bit del módulo.	0 - 0xFFFF	0
DH y DL	La dirección de destino para la comunicación inalámbrica (DH es los 32 bits, bajo el DL 32).	0 - 0xFFFFFFFF (tanto para DH y DL)	0 (para DH y DL)
BD	La velocidad de transmisión para la comunicación serial con la placa Arduino o computadora.	0 (1.200 bps) 1 (2400 bps) 2 (4800 bps) 3 (9600) 4 (19200 bps) 5 (38400 bps) 6 (57600 bps) 7 (115200 bps)	3 (9600)

También se dispone de otro comando para restablecer los valores por defecto.

Comando	Descripción
RE	Restablecer los valores por defecto (tenga en cuenta que al igual que los cambios de parámetros, esto no es permanente a menos seguido del comando WR).

Direccionamiento

Hay varios parámetros que deben ser configurados correctamente para que los dos módulos tengan comunicación (aunque con los ajustes por defecto, todos los módulos deben ser capaces de hablar el uno al otro). Esta serie de parámetros son los siguientes:

- Los módulos tienen que estar en la misma red, según lo establecido por el parámetro **ID**
- Los módulos deben estar en el mismo canal, tal como se establece en el parámetro **CH**.
- Por último, la dirección de un módulo de destino (parámetros **DH** y **DL**) determinan qué módulos de la red y qué canal recibirá los datos que transmite. Esto puede suceder de varias maneras:
 - Si en un módulo su **DH** es igual al valor 0 y su **DL** inferior al valor 0xFFFF, los datos transmitidos por dicho módulo serán recibidos por cualquier módulo cuya dirección indicada en el parámetro **MI** sea igual a **DL**.
 - Si en un módulo su **DH** es igual al valor 0 y su **DL** es igual al valor 0xFFFF, las transmisiones del módulo serán recibidas por todos los demás módulos.

- Si su **DH** es distinto del valor cero o su **DL** es mayor que el valor 0xFFFF, la transmisión sólo será recibida por el módulo cuyo número de serie es igual a la dirección del módulo de transmisión de destino (es decir, cuya **SH** sea igual al módulo de transmisión de **DH** y cuya **SL** sea igual a su **DL**).
- Una vez más, esta coincidencia de dirección sólo se producirá entre los módulos de la misma red y el canal. Si dos módulos están en redes diferentes o canales, no se puede comunicar, independientemente de sus direcciones.

CAPÍTULO 6

ARQUITECTURA SOFTWARE DE CONTROL

Este capítulo se centrará en el programa de control que regirá el comportamiento del microcontrolador para conseguir que el sistema funcione de la forma pensada. En primer lugar, se hablará del lenguaje de programación que se va a utilizar para la implementación del programa de control en el PIC. Se hablará de varios tipos de lenguajes de programación analizando sus ventajas e inconvenientes haciendo que se decante por uno. A continuación, y ya dentro de lo que respecta al programa de control en sí, se obtendrá la expresión en tiempo discreto del PID que será calculado por un PC de manera remota en vez de ser calculado por el propio PIC como en la versión anterior del proyecto. Posteriormente, se elaborará un diagrama de flujo de los extremos maqueta y PC que ayudará a la implementación y finalmente se mostrará el programa de control explicado al detalle en forma de pseudocódigo ya que por causas externas al proyecto no se ha podido implementarlo y hacer las pruebas necesarias.

6.1 El lenguaje de programación.

En el mundo de la programación existen multitud de lenguajes de programación. Cada uno de estos lenguajes tienen peculiaridades que lo hacen distintos a otros, dependiendo en gran medida del sistema final al que va orientado ese programa. En el caso que nos ocupa el lenguaje de programación que se utilizará deberá ser compatible con la serie de microcontroladores PIC. Dentro de una amplia gama de lenguajes es posible utilizar lenguajes de alto nivel como, por ejemplo, Basic ó C, o programar en un lenguaje de más bajo nivel y por tanto más cercano a la máquina, como es el caso de ensamblador del propio dispositivo. De entre los distintos lenguajes existentes, debido a su amplia utilización y a la experiencia que previamente se tiene de ellos, se seleccionan el lenguaje ensamblador y el lenguaje C como posibles candidatos.

El lenguaje ensamblador es un lenguaje de una eficiencia indudable. La programación utilizando este lenguaje de nivel medio, requiere el conocimiento de la estructura interna y recursos de los que el microcontrolador dispone. Hay que tener conocimiento profundo de cómo está distribuida la memoria (registros existentes y dirección de memoria de los mismos), en algunos casos hay que tener en cuenta los ciclos de reloj invertidos para la ejecución de las distintas instrucciones, para el caso, por ejemplo, de que se deseen realizar temporizaciones, conocimientos incluso de cada uno de los bits que componen un registro y de cuáles son las funciones que lleva a cabo su puesta a nivel lógico alto o bajo y otras muchas características, como se puede observar, todo a nivel interno. El lenguaje ensamblador es un lenguaje altamente indicado para aquellas personas que se inician en el mundo de la programación de los microcontroladores, pues como se ha indicado, obliga en cierto modo al programador a tener un conocimiento

profundo sobre la estructura interna y los recursos de los que el microcontrolador que desea programar dispone y eso es algo de importancia notable.

Sin embargo hay muchas ocasiones, en las que programar en ensamblador no es la opción más adecuada. El lenguaje C propio de los PIC, ofrece una comodidad alejada de la que ofrece la programación en ensamblador, si bien su eficiencia es inferior. En ocasiones el programa de control obliga a realizar cálculos complejos o manejar tipos de datos, que si se programaran en ensamblador resultaría muy tedioso y largo y en algunos casos rozando la no viabilidad. En el programa de control que se pretende desarrollar en este proyecto se van a utilizar tipos de datos en coma flotante (del tipo *float*) y a realizar ciertas operaciones que justifican la utilización de un lenguaje de alto nivel. A pesar de la no eficiencia de los lenguajes de alto nivel (una instrucción en C, puede suponer decenas de instrucciones en ensamblador), el programa a desarrollar además no requiere ni mucho menos una amplia memoria de programa (el PIC seleccionado cumple perfectamente los requerimientos de memoria que se pueden estimar) y además va a permitir obtener una comodidad a la hora de realizar temporizaciones y a la hora de utilizar ciertos recursos.

6.2 Pasos para programar un PIC.

A la hora de programar un PIC se deben seguir unos pasos para que el proceso tenga éxito.

- Editar.
- Compilar.
- Exportar el programa al PIC.
- Probar el programa.

Editar.

Editar es escribir el programa, hacer una lista de instrucciones en un lenguaje que permita indicarle al PIC lo que se desea que haga. Existen varios lenguajes como: Ensamblador, Basic, C, etc. Todos ellos pretenden acercarse a nuestra manera de pensar y de hablar. Sin embargo los PIC no conocen más que unos y ceros. Por eso es necesario compilar.

Compilar.

Compilar es traducir el programa al lenguaje de máquina que sí entiende el PIC. Para realizar esta traducción se hace uso de un software que transforma el Programa Fuente,

aquel que se edita, en otro que se puede comunicar al PIC por estar, ahora sí, en lenguaje máquina.

Exportar el programa al PIC.

En este paso se graba el programa en el PIC mediante una tarjeta electrónica y un software adecuado se pasa el programa compilado del PC al PIC. Son solamente unos cuantos clics y listo. Es necesario hacer una aclaración en este momento. Frecuentemente se le denomina programador de PIC a la tarjeta electrónica que transfiere el programa compilado de la PC al PIC. Está bien mientras se entienda que este aparato no va a pensar por nosotros y que es incapaz de programar instrucciones por sí mismo, sólo se encarga de pasar esas líneas de código y grabarlas en la memoria del PIC en un lenguaje que este si entenderá.

Probar el programa.

Es este el último paso, tratar de verificar el funcionamiento del programa. Se trata de comprobar que el PIC se comporta como se le ha indicado en el programa. Si todo es correcto, el PIC estará programado y con el programa funcionando correctamente, sino es así, puede ser que lo que se le indicó en las instrucciones a la hora de editar no fuera lo correcto, en ese caso se deberá volver a repetir los pasos anteriores hasta llegar al final.

6.3 El software del programador PicKit2.

Con el Software del PicKit2 Programmer instalado correctamente en el PC, al conectar el Programador por el puerto USB, vienen los siguientes acontecimientos:

1. El PC advierte con un sonido al instante de haber enchufado el cable USB en el PicKit2-Clone.
2. Se enciende un Led (verde) que he colocado sobre la entrada de los +5V del USB, indicando que este está correctamente alimentado.
3. Al abrir el Administrador de Dispositivos del PC, aparece una nueva categoría de Dispositivos:
“Dispositivos de Interfaz de Usuario (HID)”, con dos subcategorías: “Dispositivo compatible con HID” y “Dispositivo de interfaz humana USB”; deben aparecer sin ningún problema, como el resto de los dispositivos del PC.
4. Cerrar el Administrador de Dispositivos del PC, el dispositivo ya ha sido correctamente conectado.

5. Inicio el Software PicKit2 Programmer y se encienden durante unos segundos los otros dos led's del PicKit2 Original que indican BUSY y VDD (+5V) al ZIF. Apareciendo de la siguiente manera la pantalla del PicKit2 Programmer.

La ventana principal del programa de aplicación es la presentada en la figura 5.1

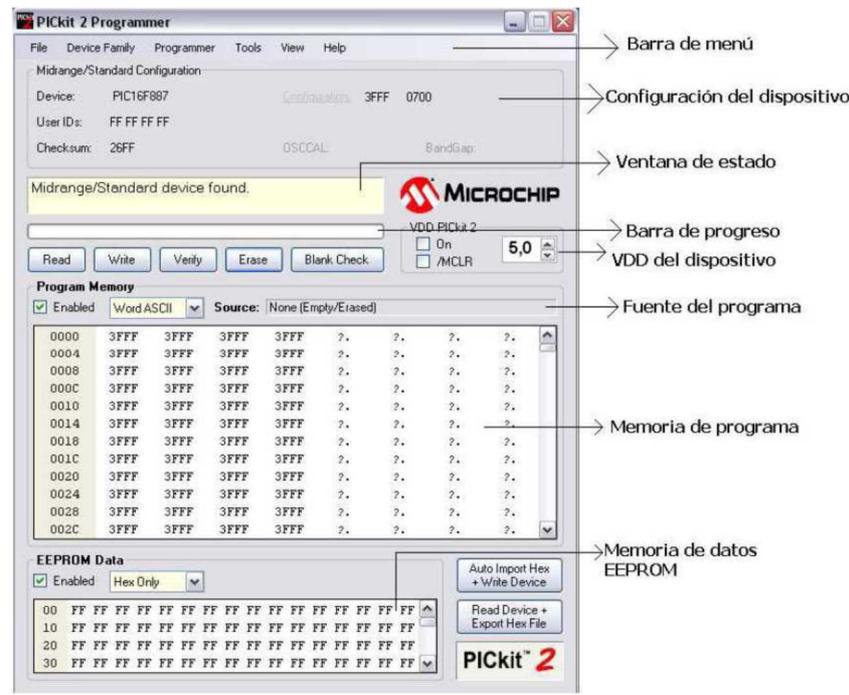


Figura 6.1: Aspecto del software PICkit2.

6.4 El programa de control.

A continuación se indicará el proceso de obtención de la función del PID, posteriormente se presentará el diagrama de flujo tanto en la maqueta como en el PC que ayudará al entendimiento del programa y por último su implementación en lenguaje de programación C adecuado al PIC y se desarrollará una aplicación en la parte PC que calcule la función del PID y sea capaz de enviarla al PIC para que este controle la intensidad de corriente que circula por la bobina.

6.4.1 PID digital.

Es interesante señalar que más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado. Los controladores PID analógicos, son principalmente de tipo hidráulico, neumático, electrónico, eléctrico o

sus combinaciones. En la actualidad, muchos de estos se transforman en formas digitales mediante el uso de microprocesadores

La función de transferencia de un PID analógico o continuo es:

$$U(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + Kd \cdot \frac{de(t)}{dt}; \quad (1)$$

Donde **e(t)** es el error de la señal y **u(t)** es la entrada de control del proceso. **Kp** es la ganancia proporcional, **Ti** es la constante de tiempo integral y **Td** es la constante de tiempo derivativa.

Realizando Laplace se obtiene:

$$U(s) = Kp \cdot e(s) + Ki \cdot \frac{e(s)}{s} + Kd \cdot e(s) \cdot s; \quad (2)$$

Sacando factor común e(s), en el dominio de la frecuencia, el controlador PID se puede escribir como:

$$U(s) = \left(Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \right) \cdot e(s); \quad (3)$$

Donde **Ki** y **Kd** no se ajustan por sus constantes, sino por un tiempo integral **Ti** y un tiempo derivativo **Td** que dependen de **Kp**. De tal forma que:

$$Ki = \frac{Kp}{Ti}; \quad (4)$$

$$Kd = Kp \cdot Td; \quad (5)$$

Sustituyendo en (3):

$$U(s) = \left(Kp + \frac{Kp}{Ti \cdot s} + Kp \cdot Td \cdot s \right) \cdot e(s) = Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right) \cdot e(s); \quad (6)$$

La relación entre el espacio “s” y “z” es:

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} ;$$

Sustituyendo en (6):

$$\frac{U(z)}{e(z)} = Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot \frac{1 - z^{-1}}{T}} + Td \cdot \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)$$

Operando se obtiene:

$$\frac{U(z)}{e(z)} = Kp + \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot Ki + (1 - z^{-1}) \cdot Kd ; \quad (7)$$

Donde:

$$Ki = \frac{Kp \cdot T}{Ti} ; \quad Kd = \frac{Td \cdot Kp}{T} ;$$

La expresión (7) se puede escribir como:

$$U(z) = e(z) \cdot \left(Kp + \frac{Ki}{1 - z^{-1}} + Kd \cdot (1 - z^{-1}) \right) ; \quad (8)$$

Multiplicando ambos miembros de la igualdad por $(1 - z^{-1})$:

$$(1 - z^{-1}) \cdot U(z) = e(z) \cdot (Kp \cdot (1 - z^{-1}) + Ki + Kd \cdot (1 - z^{-1})^2) ; \quad (9)$$

Operando se obtiene:

$$U(z) - U(z) \cdot z^{-1} = e(z) \cdot (Kd \cdot z^{-2} - (Kp + 2 \cdot Kd) \cdot z^{-1} + (Kp + Ki + Kd)) ;$$

Realizando la transformada z inversa:

$$U[k] = U[k - 1] + Kd \cdot e[k - 2] - (Kp + 2 \cdot Kd) \cdot e[k - 1] + (Kp + Ki + Kd) \cdot e[k] \quad (10)$$

Siendo esta expresión (10) la expresión correspondiente a un PID discreto y que será implementada en el programa de la parte PC que más tarde se mostrará. Pero antes, observar en la expresión, que el valor a sacar en cada iteración depende del valor anteriormente extraído, de los errores obtenidos en las iteraciones presente, anterior y dos veces anterior y de los valores de Kp , Ki y Kd , aunque estos tres últimos valores son constantes y no dependerán del momento actual o anterior del proceso, esto quiere decir, que el sistema es LTI (estable, causal, con memoria, lineal e invariable).

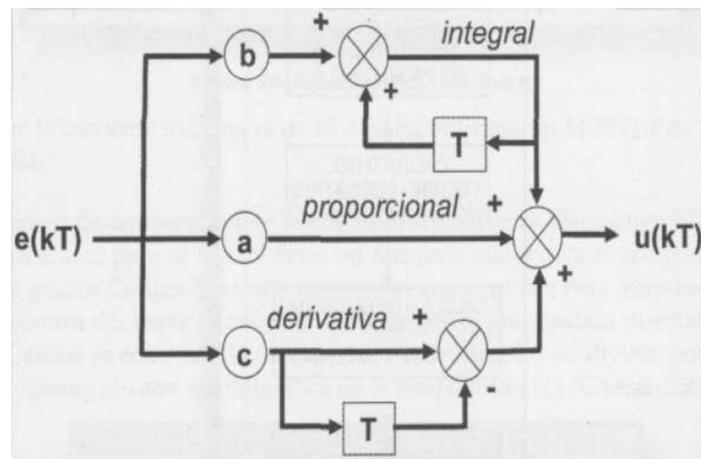


Figura 6.2: Representación del sistema en diagrama de bloques.

6.4.2 Diagrama de flujo.

Una vez seleccionado el lenguaje de programación a utilizar para la implementación del PID, y como paso previo a la implementación en sí del programa de control, se muestra el diagrama de flujo en la siguiente figura.

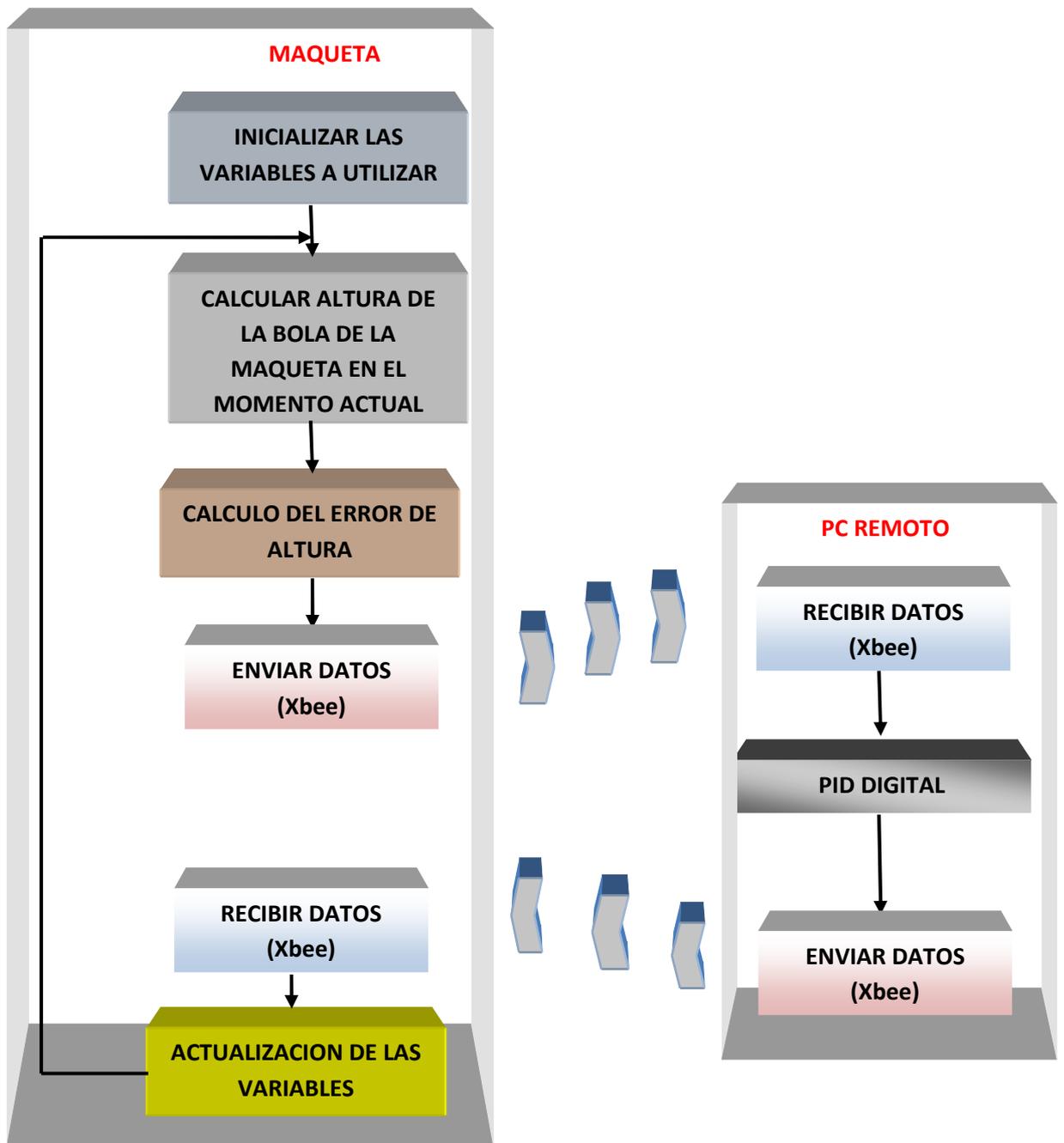


Figura 6.3: Diagrama de flujo del control de la maqueta.

En un principio se procede a la inicialización de las variables que se van a utilizar en el programa. Seguidamente se procede a determinar la altura actual de la bola en la maqueta y, una vez obtenida ésta, se determinará el error de altura, que viene dado por la diferencia entre la altura actual de la bola y la referencia o altura a la que se desea que se encuentre. Obtenido este error se envía por el módulo Xbee al PC donde se calculará la expresión del PID digital, , una vez calculado se vuelve a enviar a la maqueta el resultado utilizando el mismo módulo Xbee (la comunicación es bidireccional, se envía y recibe por el mismo módulo Xbee). En el extremo de la maqueta se recibirá por el mismo módulo Xbee que se utiliza para enviar los datos al PC, actuando la salida del módulo como la salida del PIC que actuará sobre la fuente de intensidad y sobre la maqueta, haciendo que la bola se aproxime a la altura deseada. Antes de comenzar con la siguiente iteración, se actualizarán las variables que forman parte de la expresión del PID digital. De tal forma que el error actual pasará a ser el error anterior, el error anterior pasará a ser el error dos veces anterior y la salida del PID digital actual pasará a ser la anterior. A partir de aquí, comenzará una nueva iteración, volviéndose a determinar la altura a la que se encuentra la bola, calculando el nuevo error actual enviando y recibiendo los cálculos de la expresión del PID y el valor de salida correspondiente para el control de la fuente de intensidad.

6.4.3 Implementación.

6.4.3.1 Extremo maqueta.

Se va a presentar la implementación del programa de control en el extremo de la maqueta que medirá la altura a la que se encuentra la bola que será recogida por el sensor de altura y enviado al PIC, este último es el encargado de enviar dicha información al módulo Xbee para que lo transmita al PC.

Primero se incluirá las librerías que serán necesarias.

```
#include"C:\Users\Daybi\trabajo_final_grado_carrera\A_entregar\codigos_programacion\control_PID.h"  
  
#include "Math.h"  
  
#include <stdio.h>  
  
#include <stdlib.h>
```

En segundo lugar se declaran las variables que se van a utilizar en el programa de control, serán variables globales, al declararlas fuera del método principal main () y por tanto, serán comunes a todo el código y se tendrá que tener especial cuidado a la hora de actualizarlas.

```
short signo;

long int aux,aux2,aux3,aux4=0;

long int usen;    //Dónde vamos aguardar lo recibido por el ADC

float usenf;     //Dónde vamos a guardar lo recibido por el ADC en float.

float kp=0.175;

float ki=0.00010;

float kd=0.0003;
```

En tercer lugar se tiene el método principal o método main ():

```
void main(int argc,char *argv[]){

output_c(0x00);    //Salidas a cero para evitar posibles estados iniciales extraños.

output_d(0x00);

//-----

disable_interrupts(GLOBAL);    //todas las interrupciones desactivadas

setup_adc_ports(NO_ANALOGS);

setup_adc(ADC_OFF);

setup_psp(PSP_DISABLED);

setup_spi(FALSE);

setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1);

setup_timer_1(T1_DISABLED);

setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);

//-----
```

```
// Configuración de los puertos como entrada o salida

set_tris_a(0xFF);          //portA como entrada

set_tris_b(0xFF);          //portB como entrada

set_tris_c(0x00);          //portC como salida

set_tris_d(0x00);          //portD como salida

set_tris_e(0b00000010);    //portE RE1 entrada, RE2 salida
```

En forma de esquema quedaría configurado de la siguiente manera:

	ENTRADAS	_____	SALIDAS
//			
//	PORT A -->		--> PORT C
//		PIC	
//	PORT B -->	16F877	--> PORT D
//			
//	RE1 (PORT E) -->		--> RE2 (PORT E)
//		_____	

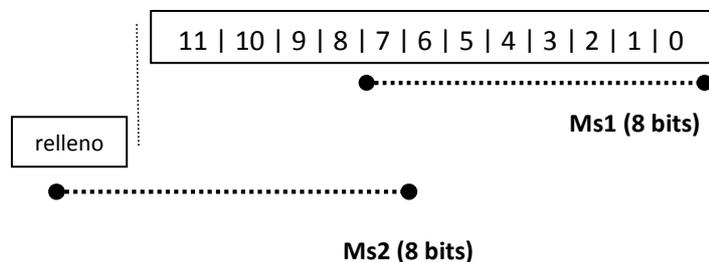
En quinto lugar se deberá obtener la altura de la bola proveniente del sensor, el problema surge en que la salida del sensor es de tipo analógico mientras que el PIC solo entiende en formato digital, por lo que de alguna manera tenemos que hacer que esa información analógica llegue en formato digital, para ello ya se utilizó el convertidor Analógico a Digital, por lo que a la entrada del PIC se tendrá la salida del ADC. Pero surge un problema, el convertidor funciona a 8 bits, mientras nosotros trabajamos con 12 bits, por lo que se tendrá que utilizar dos convertidores, uno que dé 8 bits y el otro los 4 bits restantes, sumando ambos resultados se obtendrá los 12 bits guardados en una variable a la que posteriormente se le hará un casting a float para poder trabajar con ellos. Y ya finalmente se procede a la multiplicación por una constante para codificar el valor dentro de un rango entre 0 y 5 V.

```
//----- Programa PID -----
delay_ms(2500);    // Retardo para la estabilización de la tensión
                  // de 2.5 segundos
while (TRUE){
    output_low(PIN_E2); //Se activa la conversión de Analógico a Digital
    aux=input_b();      //Se guarda en aux lo que recibimos del ADC por el puerto b
    aux2=input_a();     //Se guarda en aux2 lo que recibimos del ADC por el puerto a
    aux2=aux2<<8;
    usenf=aux+aux2;     // Se suman ambos valores para tener el resultado (8 bits + 4 bits)
                      // convertido a digital (12 bits) que es con lo que trabaja el PIC
    usenf=(float)usenf; //Se hace un casting a float para poder trabajar con él cómodamente
    usenf=usenf*0.00122; //Se multiplica por una constante para codificar el valor
    output_high(PIN_E2); //Se vuelve a poner el RE2 a nivel alto para poder ponerlo
                        // posteriormente a nivel alto para una nueva reiteración.
```

Posteriormente se calcula el error de posición de la bola y se envía al módulo Xbee en formato de 8 bits. El problema surge porque el PIC funciona con datos de 12 bits por lo que se tiene que fragmentar el dato en dos mensajes de 8 bits para ser enviados al módulo Xbee. Una vez enviado los datos se espera a la recepción de datos del módulo Xbee.

```
usenf; //Variable de 12 bits donde tenemos la altura de la bola
```

```
//Se fragmenta el dato en dos mensajes de 8 bits
```



```
Ms1; //Mensaje 1 con los 8 bits menos significativos de la variable usenf
```

```
Ms2; //Mensaje 2 con los 4 bits más significativos de la variable usenf con 4 bits de relleno.
```

```
//Enviar los mensajes al módulo Xbee
```

```
//Recibir datos del módulo Xbee.

// Salida del PIC que controla la intensidad de corriente según los datos recibidos desde el
módulo Xbee.
```

Una vez enviados los datos al módulo Xbee, el PIC se queda esperando los datos que el módulo Xbee le enviará. Una vez recibidos el PIC calcula la intensidad de corriente que debe pasar por la fuente de intensidad. Posteriormente actualiza variables y vuelve al principio del algoritmo, esperando datos del ADC.

6.4.3.2 Extremo PC.

Se va a presentar la implementación del programa de control en el extremo del PC dónde se calcula la función del PID cuyo resultado es enviado al extremo de la maqueta.

```
//Recibir datos del módulo Xbee en mensajes de 8 bits.

usenf; //Variable con la altura de la bola

float uref=2.5; //Altura deseada por el usuario

float ek;

float uk; //Se guarda el valor de tensión.

float uk_1=0; //Se guardará el valor de tensión anterior que será necesario para la ecuación del PID .

float ek_1=0;

float ek_2=0;

//Bucle

//Se recibe en dos mensajes (Ms1 y Ms2) la variable usenf con la altura de la bola.

Ms2=Ms2<<8;

usenf=Ms1+Ms2; // Se suman ambos valores para tener el resultado (8 bits + 4 bits)

// Convertido a digital (12 bits).

//Se calcula el error de altura de la bola

ek= usenf-uref; //Diferencia entre la altura de la bola y el valor deseado.

//Calcular función PID.

uk=uk_1+kd*ek_2-(kp+2*kd)*ek_1+(kp+ki+kd)*ek; //Ecuación del PID digital

ek_2=ek_1; //El error 2 veces anterior pasa a ser el anterior

//Enviar uk al módulo Xbee en mensaje de 8 bits
```

Se implementará un sencillo programa que escuche por el puerto USB donde está conectado el módulo Xbee .El programa debe ser capaz de recibir una serie de datos de tamaño de 8 bits, calcular la función PID y posteriormente ser capaz de enviar los datos en mensajes de 8 bits al módulo Xbee.

6.5 Conexión módulo Xbee a PC.

En el desarrollo del proyecto se ha optado por utilizar el módulo Xbee/Xbee-PRO ZNet 2.5 OEM pues reúne las características idóneas para utilizarlo en el proyecto.

6.5.1 Software X-CTU.

En la conexión del dispositivo al PC es necesario utilizar un software para programar el módulo Xbee, actualizar firmwares y realizar todas las pruebas necesarias para verificar el buen funcionamiento del mismo.

El software que se va a utilizar para tal fin es X-CTU provisto por Digi .Aunque existen más opciones se ha optado por este software por ser el que menos problemas presenta. A continuación se presenta una introducción a este software.

Una vez instalado el software (es compatible tanto en Windows como en Linux) nos aparecerá una pantalla como la siguiente.

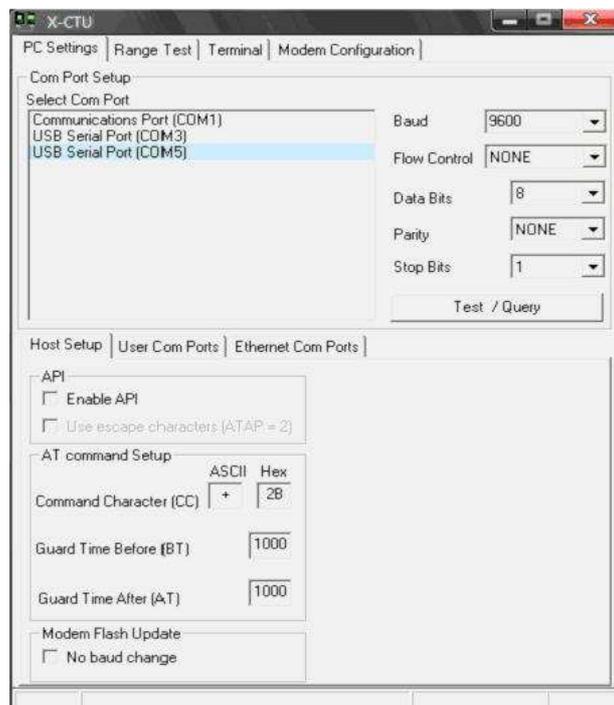


Figura 6.4: Vista en Windows de la ventana principal del software X-CTU.

La comunicación USB está basada en el circuito integrado FT232RL. El fabricante del chip provee un driver que instala un puerto serie virtual en Windows. Una vez instalado el driver, se debe conectar el módulo Xbee, utilizando el cable USB MiniB e iniciar X-CTU (Nota: Es importante ejecutar el software X-CTU posteriormente a la instalación del puerto serie virtual porque podría no aparecer si se ejecuta con anterioridad X-CTU).

Con el botón “*Test / Query*” se puede verificar la conexión, si esta es correcta, debe aparecer el nombre del modem del dispositivo Xbee y la versión del firmware instalado.

Seguidamente se debe programar el firmware en cada uno de los dispositivos Xbee que van a constituir la red. Es importante tener actualizadas las versiones de los firmwares, para esto se debe presionar el botón “*Download new versions*”. Una vez finalizada la actualización, se debe seleccionar el firmware a grabar y presionar el botón “*Write*”. En ese momento los módulos Xbee quedaran actualizados.

Es importante configurar un nodo como coordinador y dejar los demás como routers o “*end devices*” para que la red funcione apropiadamente.

Se incluye un pequeño tutorial de cómo configurar los nodos de la red como pasarela o servidores en el anexo.

CAPÍTULO 7

PRESUPUESTO Y PLANIFICACION PARA EL DESARROLLO COMERCIAL

En este último capítulo se tratará en un primer lugar de dar un presupuesto de los materiales utilizados en la implementación del ICSP, de la fuente de intensidad así como de los módulos Xbee, detallando importes y unidades utilizadas. En la segunda parte del capítulo se presentará mediante la utilización del programa que proporciona Microsoft Office Project una simulación del desarrollo del proyecto con los eventos más importantes y planificados bajo unos tiempos de simulación acordes al desarrollo del proyecto, así como un análisis no muy extenso sobre la carga de tareas sobre el director y el autor del presente proyecto.

7.1 Presupuesto.

A continuación se muestra el coste de la fuente de alimentación, del ICSP, de la placa de control de la maqueta y los packs Arduino Zigbee. No se tendrá en cuenta los materiales software necesarios para la programación y simulación del PIC.

En este presupuesto se pueden observar la totalidad de los materiales que componen las diferentes partes así como los precios individuales y coste total de la revisión del proyecto sobre la primera versión tal como lo dejaron los autores de la maqueta de levitación magnética.

PRESUPUESTO FUENTE DE ALIMENTACIÓN

REFERENCIA	PRECIO/UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
Amplificador Operacional LM675	6.74	1	6.74
Condensador electrolítico 0.1 µF	0.15	2	0.30
Resistencia 20 KΩ	0.10	2	0.20
Resistencia 1 KΩ	0.10	2	0.20
Protoboard	9.50	1	9.50

TOTAL PRESUPUESTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

16.94 €

IVA 21 %

3.55 €

TOTAL PRESUPUESTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN FINAL

20.49 €

PRESUPUESTO DE LA PLACA DE CONTROL

REFERENCIA	PRECIO/UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
ADC LTC1273BCN	26.26	1	26.26
DAC 0808LCN	1.60	2	3.20
PIC 16F877-20/P	6.67	1	6.67
Cristal de cuarzo 11.50 MHz	0.89	1	0.89
Resistencia 100Ω ¼ W	0.05	1	0.05
Resistencia 1KΩ ¼ W	0.05	1	0.05
Resistencia 5K1Ω ¼ W	0.05	5	0.25
Resistencia 10KΩ ¼ W	0.10	1	0.10
Condensador cerámico 15pF	0,25	2	0.50
Condensador cerámico 100nF	0,25	3	0.75
Condensador electrolítico 10uF/25v	0,10	1	0.10
Diodo 1N4148	0.05	1	0.05
Potenciómetro de ajuste vertical de 47 KΩ	0.35	1	0.35
Zócalo para circuito integrado de 8 pines	0.38	1	0.38
Zócalo para circuito integrado de 16 pines	0.38	2	0.76
,	0.38	1	0.38
Zócalo para circuito integrado de 40 pines	0.38	1	0.38

TOTAL PRESUPUESTO DE LA PLACA DE CONTROL

41.12 €

IVA 21 %

8.63 €

TOTAL PRESUPUESTO DE LA PLACA DE CONTROL FINAL

49.75 €

PRESUPUESTO DEL PROGRAMADOR ICSP

REFERENCIA	PRECIO/UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
Pila Philips de 9 V	4.50	2	9
Protoboard	9.50	1	9.50
Resistencias de 0.5Ω	0.03	5	0.15
Resistencia de 10 KΩ	0.10	5	0.50
Condensador electrolítico de 0.1 μF	0.15	5	0.75
Convertor de voltaje de 9V a 5V	0.60	1	0.60
Clavija de 5 pines	0.20	1	0.20
Cristal de cuarzo 11.50 MHz	0.89	1	0.89

TOTAL PRESUPUESTO DEL PROGRAMADOR ICSP

21.59 €

IVA 21 %

4.53 €

TOTAL PRESUPUESTO DEL PROGRAMADOR ICSP FINAL

26.12 €

PRESUPUESTO MÓDULOS XBEE

REFERENCIA	PRECIO/UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
Zigbee pack (802.15.4 versión) Arduino pack	70.18	2	140.36

TOTAL PRESUPUESTO DEL PACK ARDUINO ZIGBEE

140.36 €

IVA 21 %

29.47 €

TOTAL PRESUPUESTO DEL PACK ARDUINO ZIGBEE FINAL

169.83 €

A modo de resumen, una vez calculados los presupuestos de la placa de control, del programador ISCP, de la fuente de alimentación y de los packs Arduino Zigbee se procede al presupuesto total de la revisión del proyecto:

PRESUPUESTO DE LA REVISIÓN DEL PROYECTO

REFERENCIA	PRECIO TOTAL
Total presupuesto Placa de control	49.75
Total presupuesto Programador ICSP	26.12
Total presupuesto Fuente de alimentación	20.49
Total presupuesto Packs Arduino Zigbee	169.83

TOTAL PRESUPUESTO DE LA REVISION DEL PROYECTO FINAL

266.19 €

7.2 Planificación para el desarrollo comercial.

En este apartado se va a desarrollar en un marco teórico una simulación del proyecto con una serie de tareas definidas, tiempo empleado para la consecución de las mismas así como los recursos y costos necesarios en cada una de estas tareas pero sin entrar en detalle. En el CD que acompaña al proyecto se encuentra el archivo de Microsoft Project si desea ampliar información.

7.2.1 Tareas.

En primer lugar se han desarrollado una serie de tareas que se muestran a continuación, en ellas se pueden ver el tiempo empleado para el desarrollo de las mismas así como la fecha de inicio y de final de la tarea. Las tareas principales se marcan en negrita para destacarlas sobre las subtareas.

La primera tarea principal es la Fase Inicial en la que el autor toma el contacto con el proyecto, para ello se desarrollan tres subtareas. La subtaska más importante en esta fase es la búsqueda de objetivos, donde el autor después de la lectura del proyecto y con la ayuda incansable del director busca mejorar el proyecto anterior.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Fase Inicial.	9 días	Jueves 15/11/12	Martes 27/11/12
Leer proyecto anterior.	7 días	Jueves 15/11/12	Viernes 23/11/12
Búsqueda de objetivos.	7 días	Jueves 15/11/12	Viernes 23/11/12
Planificación del proyecto.	2 días	Lunes 26/11/12	Martes 27/11/12

La siguiente tarea es la búsqueda de documentación que debido a su gran tamaño se presenta en las siguientes tres tablas.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Búsqueda documentación.	67 días	Jueves 29/11/12	Viernes 01/03/13
Estado del arte ...	7 días	Jueves 29/11/12	Viernes 07/12/12
Electroimanes.	6 días	Lunes 10/12/12	Lunes 17/12/12
Sensores.	7 días	Martes 18/12/12	Miércoles 26/12/12
Relés.	7 días	Jueves 27 /12/12	Viernes 04/01/13
Fuentes eléctricas.	7 días	Lunes 07/01/13	Martes 15/01/13
Operacionales.	7 días	Miércoles 16/01/13	Jueves 24/01/13
El operacional LM675.	7 días	Viernes 25/01/13	Lunes 04/02/13
* (1)			

* (1) A continuación se presenta en una tabla la subtarea “Arquitectura hardware de control” debido a su gran tamaño para incluirla en la tabla anterior que forma parte de la tarea principal “Búsqueda de información”.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Arquitectura hardware ...	54 días	Lunes 17/12/12	Jueves 28/02/13
Microcontroladores	5 días	Lunes 17/12/12	Viernes 21/12/12
Elección del micro...	5 días	Lunes 17/12/12	Viernes 21/12/12
Convertor analógico...	5 días	Lunes 17/12/12	Viernes 21/12/12
Convertor digital...	5 días	Lunes 24/12/12	Viernes 28/12/12
Información sobre ICSP	5 días	Lunes 31/12/12	Viernes 04/01/13
Elección de la tecnología...	7 días	Lunes 07/01/13	Martes 15/01/13
Módulo Xbee-PRO	7 días	Miércoles 16/01/13	Jueves 24/01/13
Módulo Arduino Xbee	7 días	Viernes 25/01/13	Lunes 04/02/13

La siguiente subtarea es “Arquitectura software de control” que forma parte de la tarea principal “Búsqueda de información”.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Arquitectura software...	17 días	Miércoles 06/02/13	Jueves 28/02/13
El lenguaje de programa...	7 días	Jueves 07/02/13	Viernes 15/02/13
Software Pickit 2	7 días	Miércoles 20/02/13	Jueves 28/02/13

Finalizada la tarea “Búsqueda de información”, se continúa con las siguientes tareas. La tarea “Recibir materiales” se considera un hito puesto que hasta que no se reciban los materiales no se puede continuar con el proyecto.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Recopilación información	2 días	Martes 05/03/13	Miércoles 06/03/13
Recibir materiales	0 horas	Jueves 07/03/13	Jueves 07/03/13
Búsqueda software necesario	2 días	Jueves 07/03/13	Viernes 08/03/13
Pruebas con el software	7 días	Lunes 11/03/13	Martes 19/03/13

En la tarea “Construcción del ICSP” no se emplea tiempo en la revisión del proyecto puesto que se encuentra construido y montado.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Construcción ICSP	1 día	Miércoles 20/03/13	Miércoles 20/03/13
Búsqueda de diseños	0 horas	Miércoles 20/03/13	Miércoles 20/03/13
Diseño del circuito final	0 horas	Miércoles 20/03/13	Miércoles 20/03/13
Montaje del circuito	0 horas	Miércoles 20/03/13	Miércoles 20/03/13
Pruebas con el ICSP	0 horas	Miércoles 20/03/13	Miércoles 20/03/13
Verificar el ICSP	1 día	Miércoles 20/03/13	Miércoles 20/03/13

En la tarea “Diseño de la fuente de intensidad” no se emplea tiempo en la revisión del proyecto puesto que se encuentra construido y montado.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Diseño de la fuente de intensidad	1 día	Jueves 21/03/13	Jueves 21/03/13
Búsqueda de diseños	0 días	Jueves 21/03/13	Jueves 21/03/13
Diseño del circuito final	0 días	Jueves 21/03/13	Jueves 21/03/13

En la tarea “Construcción placa de control” no se emplea tiempo en la revisión del proyecto puesto que se encuentra construido y montado.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Construcción placa de control	1 día	Viernes 22/03/13	Viernes 22/03/13
Diseño del circuito	0 días	Viernes 22/03/13	Viernes 22/03/13
Montaje del circuito	0 días	Viernes 22/03/13	Viernes 22/03/13

En la tarea “Implementación inalámbrica” se lleva a cabo el montaje del circuito Arduino, su configuración y las pruebas realizadas con el circuito.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Implementación inalámbrica	8 días	Lunes 08/04/13	Miércoles 17/04/13
Módulo Xbee	1 día	Lunes 08/04/13	Lunes 08/04/13
Arduino Zigbee	7 días	Martes 09/04/13	Miércoles 17/04/13
Pruebas con el software	7 días	Martes 09/04/13	Miércoles 17/04/13

La tarea final es la redacción de la memoria donde se refleja todo el desarrollo del proyecto con toda la documentación necesaria para entenderlo.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Redacción de la memoria	46 días	Martes 18/03/13	Lunes 20/05/13
Capítulo 1	0 días	Martes 14/05/13	Martes 14/05/13
Capítulo 2	5 días	Lunes 18/03/13	Viernes 22/03/13
Capítulo 3	3 días	Lunes 25/03/13	Miércoles 27/03/13
Capítulo 4	3 días	Jueves 28/03/13	Lunes 01/04/13
Capítulo 5	5 días	Martes 02/04/13	Lunes 08/04/13
Capítulo 6	5 días	Martes 02/04/13	Lunes 08/04/13
Capítulo 7	4 días	Miércoles 08/05/13	Lunes 13/05/13
Capítulo 8	1 día	Miércoles 15/05/13	Miércoles 15/05/13
Índice	1 día	Viernes 17/05/13	Viernes 17/05/13
Bibliografía	1 día	Viernes 17/05/13	Viernes 17/05/13
Anexos	1 día	Lunes 20/05/13	Lunes 20/05/13

En el desarrollo del proyecto el autor y el director de proyecto se reúnen periódicamente para ir supervisando el estado del proyecto con una serie de reuniones periódicas de periodicidad mensual.

Nombre Tarea	Duración Tarea	Fecha de Inicio	Fecha de finalización
Reunión con director proyecto	111 día	Martes 04/12/12	Martes 07/05/13
Reunión con director proyecto 1	1 día	Martes 04/12/13	Martes 04/12/13
Reunión con director proyecto 2	1 día	Martes 01/01/13	Martes 01/01/13
Reunión con director proyecto 3	1 día	Martes 05/02/13	Martes 05/02/13
Reunión con director proyecto 4	1 día	Martes 05/03/13	Martes 05/03/13
Reunión con director proyecto 5	1 día	Martes 02/04/13	Martes 02/04/13
Reunión con director de proyecto 6	1 día	Martes 07/05/13	Martes 07/05/13

7.2.2 Uso de recursos.

Se definen una serie de recursos, alguno de ellos como el autor del proyecto y el director del proyecto son del tipo Trabajo mientras que los demás son del tipo Material. Se pueden observar los precios de los mismos, en el caso del tipo trabajo no se especifica la tasa estándar ni el coste por uso pues se trata de un proyecto ficticio.

NOMBRE RECURSO	TIPO	COSTE
Autor proyecto	Trabajo	0,00 €
Director proyecto	Trabajo	0,00 €
Amplificador Operacional LM675	Material	6,74 €
Condensador electrolítico 0.1 μ F	Material	0,15 €
Resistencia 20 K Ω	Material	0,10 €
Resistencia 1 K Ω	Material	0,10 €
Protoboard	Material	9,50 €
Pila Philips de 9 V	Material	4,50 €
Resistencias de 0.5 Ω	Material	0,03 €
Resistencia 5K1 Ω ¼ W	Material	0,05 €
Condensador cerámico 100nF	Material	0,25 €
Condensador electrolítico 10uF/25v	Material	0,10 €
Diodo 1N4148	Material	0,05 €

Resistencia de 10 K Ω	Material	0,10 €
Convertor de voltaje de 9V a 5V	Material	0,60 €
Clavija de 5 pines	Material	0,20 €
Cristal de cuarzo 11.50 MHz	Material	0,89 €
LTC1273BCN	Material	26,26 €
DAC 0808LCN	Material	1,60 €
PIC 16F877-20/P	Material	6,67 €
Resistencia 100 Ω ¼ W	Material	0,05 €
Resistencia 1K Ω ¼ W	Material	0,05 €
Potenciómetro de ajuste vertical de 47 K Ω	Material	0,35 €
Zócalo para circuito integrado de 8 pines	Material	0,38 €
Zócalo para circuito integrado de 16 pines	Material	0,38 €
Zócalo para circuito integrado de 24 pines	Material	0,38 €
Zócalo para circuito integrado de 40 pines	Material	0,38 €
Condensador cerámico 15pF	Material	0,25 €
Zigbee pack (802.15.4 versión) Arduino pack	Material	70,18 €

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 Conclusiones y éxitos.

La primera y más importante conclusión que se puede extraer tras la finalización de este proyecto fin de carrera es que culminan los estudios en la titulación de la pasarela de grado de ingeniería de telecomunicaciones especialidad en telemática del autor. Como ya se previó cuando se propuso la realización, el proyecto era una revisión de una maqueta y no iba a estar exento de problemas y contratiempos. Efectivamente algunos de ellos aparecieron. A la hora de la construcción del programador ICSP apareció la necesidad de alimentación de 5 V cuando se tenía una fuente de corriente continua como una pila de 9V, al final se pudo resolver fácilmente con la utilización de un adaptador de corriente. Hubo un gran problema con el tiempo de espera de los materiales y que fueron principal causa del mayor tiempo de desarrollo del proyecto, pues se tuvo que estar en espera durante más de un mes y medio. A la hora del diseño de la fuente de alimentación no se sabía en un principio por dónde empezar, sólo el tiempo, una búsqueda exhaustiva y sobre todo con la gran ayuda del director de proyecto se pudo finalmente sacar a la luz un diseño muy sencillo para la obtención de un amperio de intensidad necesario para la bobina. Afortunadamente se solucionó y el camino poco a poco se fue completando. Si bien el cansancio por el tiempo dedicado iba haciendo mella, la ilusión por poder seguir avanzando y alcanzar la meta fijada desde el principio eran un estímulo de gran importancia. A la hora de implementar los módulos Xbee se optó en principio por la construcción en una protoboard de un circuito para el conexionado del módulo Xbee con el PC y con el PIC. Esta solución era más económica pero surgían constantemente problemas así que se propuso utilizar dos módulos Arduinos que aunque mucho más caros solventaban los problemas. Finalmente el camino se pudo completar y con éxito. Se diseñó y construyó el programador ICSP y se diseñó la fuente de alimentación. En el proyecto se tuvieron que aunar una gran cantidad de conocimientos de distintas materias adquiridos durante el proceso de formación universitaria y ampliar algunos de estos conocimientos para superar el reto que suponía este proyecto. A la conclusión del mismo, el enriquecimiento en conocimientos íntimamente ligados con el trabajo desarrollado ha sido más que notable. Así por tanto, este enriquecimiento en conocimientos en las materias preferidas del autor, la experiencia vivida estos meses con el desarrollo del proyecto, el éxito obtenido en los resultados justifica ese estado de ánimo en el que se encuentra el autor por el desarrollo del proyecto.

8.2 Trabajos futuros.

Una vez finalizado el proyecto y teniendo como base la maqueta ya construida, y probada su eficacia en los resultados obtenidos, surgen un abanico de posibilidades a desarrollar en torno a ella. Uno de los primeros trabajos para desarrollar en el futuro es la utilización de un tipo de control diferente al PID como uno de tipo predictivo.

Otro aspecto a mejorar es la estructura física de la maqueta, bien con la inclusión de algún elemento nuevo o bien con la modificación de lo que ya se tiene, de tal modo que se busque un aspecto más atractivo y funcional de la maqueta.

En esta revisión del proyecto se ha implementado una comunicación inalámbrica dando todos los pasos necesarios y estudiados para la construcción física de tal implementación, así como los materiales para la construcción de la red inalámbrica. Este puede ser el siguiente paso para la mejora de la maqueta.

También se podría actualizar algún elemento de la maqueta como el sensor y utilizar alguno de los actuales que habrán mejorado en prestaciones y en eficacia e incluso la sustitución del sensor aplicado por algún otro, evitando en la medida de lo posible, el contacto físico entre el sensor y la bola metálica, aunque estos dos últimos cambios propuestos podrían hacer que el presupuesto de la maqueta aumentara e incluso que la estructura de la maqueta debiera cambiar para adaptarse al nuevo sensor.

En la parte referente a la programación se podría utilizar otro lenguaje como por ejemplo VHDL o lenguaje ensamblador.

De todas formas el mundo de la levitación magnética es un mundo por descubrir y en constante crecimiento y se da por hecho que el futuro dará nuevas formas de trabajo y posibilidades que al día de hoy se fraguan en algún laboratorio y que ni se imaginan en la actualidad.

BIBLIOGRAFIA

Listado de referencias a libros:

Capítulo 2:

[1]Platón

Título: Introducción a la filosofía presocrática: Los orígenes de la metafísica, de la dialéctica y del nihilismo absoluto en Grecia.

Editorial: Universidad de Caldas.

Autor: Amado E.Osono Valencia

Año: 2002

ISBN: 9588041724 , 9789588041728

[2]Tales de Mileto

Título: Platón en 90 minutos

Editorial: Siglo XXI de España Editores.

Autor: Paul Strafhern.

ISBN: 84-323-0975-3

[3] Faraday

Título: Faraday, The life

Editorial: Harper Collins UK

Autor: James Hamilton

Año: 2012

ISBN: 0007467559, 9780007467556

[4] Maglev

Título: Ingeniería e Infraestructura de los transportes ferrocarriles.

Editorial: Universidad de Oviedo

Autor/es: Daniel Álvarez Mántaras.

Pablo Luque Rodríguez.

ISBN: 84-8317-365-4

Capítulo 3:

[1]

Título: Wireless sensor Networks

Editorial: John Wiley & Sons Ltd

Autor/es: Ian F. Akyildiz

Mehmet Car Vuran

ISBN: 978-0-470-03601-3 (H/B)

[2]

Título: ZigBee Wireless Networking

Autor: Drew Gislason

ISBN: 978-0-7506-8597-9

Otras referencias:

Título: Ingeniería de control moderna 4ED

Editorial: Pearson educación

Año: 2003

Autor/es: Katsuhiko Ogata.

ISBN: 8420536784, 9788420536781

Título: Máquinas eléctricas

Editorial: McGraw-Hill Interamericana de España S.L

Autor/es: Jesús Fraile Mora

Año: 2008

ISBN: 8448161122 , 9788448161125

Título: Sistemas Digitales. Principios y Aplicaciones.

Editorial: Prentice Hall

Autor/es: Ronald J. Tocci

ISBN: 970-26-0297-1

Listado de referencias a artículos o noticias digitales:

-Freno electromagnético:

<http://www.adieta.com/consejos-del-experto/funcionamiento-del-freno-electromagnetico.html>

-Noticia sobre uso de la levitación magnética en la industria espacial:

<http://www.joltivan.com/noticia8852-nasa-nave-espacial-propulsada-por-levitacion-magnetica.html>

-Noticia sobre la empresa AMT aparecida en el informador.com la cual ve a Guadalajara como una “gran oportunidad” para el uso de los trenes Maglev:

<http://www.informador.com.mx/jalisco/2010/239865/6/la-empresa-amt-ve-a-guadalajara-como-una-gran-oportunidad.htm>

-El convertidor sigma-delta Ricardo por V. Bautista Cuéllar

**Revista digital “investigación y ciencia” número 19 septiembre de 2005 volumen ii
ISSN 1696-7208**

http://www.csicsif.es/andalucia/modules/mod_sevilla/archivos/revistaense/n19/sigma_delta.pdf

Listado de referencias a direcciones URL:

Historia de los imanes:

<http://imanes.foroactivo.com/t43-los-primeros-electroiman>

Amplificadores operacionales:

http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional

<http://www.wikiciencia.org/electronica/semi/ao/index.php>

Arquitectura de microcontroladores:

http://www.ucontrol.com.ar/wiki/index.php?title=El_microcontrolador#Arquitecturas_de_computadora

La familia de los PIC como elección:

http://webspaces.webring.com/people/dv/valdezda/microcontroladores/fam.htm#_Toc499585748

Microcontrolador PIC:

http://es.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador_PIC

Microcontroladores:

http://webspaces.webring.com/people/dv/valdezda/microcontroladores/fam.htm#_Toc499585758

Convertidores digitales y analógicos:

<http://www.angelfire.com/al4/pc/tad.html>

Página web de Microchip:

www.microchip.com

Página web de Microsystems Engineering:

www.msebilbao.com

Página web de Motorola:

www.motorola.com

Página web de datasheets:

www.alldatasheet.com/