

Universidad Politécnica de Cartagena

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**CONTROL DE MAQUETA DE
LEVITACIÓN MAGNÉTICA
UTILIZANDO UN
MICROCONTROLADOR**

Alumno: David Cazorla Martínez
Directores: Juan Suardiáz Muro
Juan Antonio López
Riquelme

Cartagena 2011

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.....	8
2.1 <i>Levitación magnética. Historia y aplicaciones.....</i>	8
2.1.1 <i>Historia.....</i>	8
2.1.2 <i>Aplicaciones.....</i>	10
2.1.2.1 <i>Trenes de levitación magnética (maglev).....</i>	10
2.1.2.2 <i>Cojinetes magnéticos.....</i>	12
2.1.2.2.1 <i>Introducción y funcionamiento.....</i>	12
2.1.2.2.2 <i>Características diferenciadoras de los cojinetes magnéticos.....</i>	14
2.1.2.2.3 <i>El auténtico valor de un cojinete magnético.....</i>	14
2.1.2.3 <i>Telefonía móvil.....</i>	15
2.1.2.4 <i>Cohetes espaciales.....</i>	15
2.1.2.5 <i>Magnetismo en medicina.....</i>	16
2.1.2.6 <i>Frenos electromagnéticos.....</i>	17
2.1.2.7 <i>Energía eólica.....</i>	17
2.2 <i>Maquetas de levitación magnética.....</i>	18
2.2.1 <i>Maquetas comerciales.....</i>	18
2.2.2 <i>Otras maquetas.....</i>	21
3. CAPÍTULO 3. COMPONENTES HARDWARE.....	23
3.1 <i>Elementos principales de una maqueta de levitación magnética.....</i>	23
3.1.1 <i>Sensores.....</i>	23
3.1.1.1 <i>Sensor infrarrojo.....</i>	25
3.1.1.2 <i>Detector de ultrasonidos.....</i>	28
3.1.1.3 <i>LVDTs.....</i>	29
3.1.1.3.1 <i>Introducción y principio de funcionamiento.....</i>	29
3.1.1.3.2 <i>Características de diseño.....</i>	31
3.1.1.3.3 <i>Ventajas de su utilización.....</i>	33
3.2 <i>Electroimanes.....</i>	35
3.2.1 <i>Introducción y repaso histórico.....</i>	35
3.2.2 <i>Tipos de electroimanes.....</i>	38
3.3 <i>Otros modos de utilización del electromagnetismo en electroimanes.....</i>	39
3.3.1 <i>Relé.....</i>	39
3.3.1.1 <i>Descripción.....</i>	39
3.3.1.2 <i>Tipos de Relés.....</i>	40
3.3.1.3 <i>Ventajas de su utilización.....</i>	41
3.3.2 <i>Telégrafo.....</i>	41
3.3.2.1 <i>Historia.....</i>	41
3.3.2.2 <i>Funcionamiento.....</i>	41
3.4 <i>Fuente eléctrica.....</i>	42
3.4.1 <i>Clasificación.....</i>	42

3.4.2 Asociaciones de fuentes.....	43
3.5 Nuestra fuente de intensidad.....	44
3.5.1 Operacionales.....	44
3.5.1.1 Definición.....	44
3.5.1.2 Notación.....	45
3.5.2 Características Ideales y Reales.....	46
3.5.3 Comportamiento en corriente continua (DC).....	46
3.5.3.1 Lazo abierto.....	46
3.5.3.2 Lazo cerrado o realimentado.....	46
3.5.4 Comportamiento en corriente alterna (AC).....	47
3.5.4.1 Comparador.....	47
3.5.4.2 Seguidor.....	47
3.5.4.3 Inversor.....	48
3.5.4.4 No inversor.....	49
3.5.4.5 Sumador inversor.....	50
3.5.4.6 Restador.....	50
3.5.4.7 Integrador ideal.....	51
3.5.4.8 Derivador ideal.....	51
3.5.4.9 Conversor de corriente a voltaje.....	52
3.5.4.10 Función exponencial y logarítmica.....	52
3.5.4.11 Otros.....	53
3.5.5 Aplicaciones.....	53
3.5.6 Limitaciones.....	53
3.5.7 Características tensión-frecuencia.....	54
3.5.8 Capacidades.....	54
3.5.9 Deriva térmica.....	54
3.6 Diseño de la fuente de intensidad.....	55
3.6.1 El operacional LM675.....	55
3.6.2 Rasgos característicos.....	56
4. CAPÍTULO 4. ARQUITECTURA HARDWARE DE CONTROL.....	58
4.1 Estructura y descripción.....	58
4.2 Sistema de procesamiento.....	59
4.2.1 Controlador y microcontrolador.....	59
4.2.2 Aplicaciones de los microcontroladores.....	60
4.2.3 El mercado de los microcontroladores.....	60
4.2.4 Elección del microcontrolador adecuado.....	61
4.2.5 Recursos comunes a todos los microcontroladores.....	63
4.2.5.1 Arquitectura básica.....	63
4.2.5.2 El procesador en detalle.....	64
4.2.5.2.1 Registros.....	65
4.2.5.2.2 Unidad de control.....	65
4.2.5.2.3 Buses.....	66
4.2.5.2.4 Unidad aritmética y lógica.....	66
4.2.5.2.5 Conjunto de instrucciones.....	66
4.2.5.2.6 Memoria.....	67
4.2.5.2.7 Interrupciones.....	70
4.2.5.2.8 Periféricos.....	70
4.2.6 La familia de los PIC como elección.....	73
4.2.6.1 El fabricante: Microchip Technology.....	73
4.2.6.2 El PIC.....	74
4.2.6.3 Juego de instrucciones y entorno de programación.....	74
4.2.6.4 Arquitectura central.....	75

4.2.6.5 Programación del PIC.....	76
4.2.6.6 Características de la serie PIC.....	77
4.2.6.7 Variaciones del PIC.....	77
4.2.6.7.1 Gama enana: PIC12 (F) XXX de 8 patitas.....	77
4.2.6.7.2 Gama baja o básica: PIC16C5X con instrucciones de 12 bits.....	78
4.2.6.7.3 Gama media: PIC16FXXX. Con instrucciones de 14 bits.....	80
4.2.6.7.4 Gama alta: PIC17CXXX con instrucciones de 16 bits.....	81
4.2.6.7.5 Gama mejorada: PIC18FXXX con instrucciones de 16 bits.....	81
4.2.6.8 PIC16F877 elegido el microcontrolador para el sistema de levitación.....	82
4.2.6.8.1 Características generales del PIC16F877.....	83
4.2.6.8.2 Esquema de la organización interna del PIC16F877.....	85
4.3 Conversor Analógico-Digital.....	85
4.3.1 Introducción.....	85
4.3.2 Tipos de conversores analógico-digital.....	88
4.3.3 Conceptos de los conversores analógico-digital.....	90
4.3.4 El conversor analógico-digital LTC 1273BCN.....	93
4.4 Conversor digital-analógico.....	94
4.4.1 Introducción.....	94
4.4.2 Tipos.....	95
4.4.3 Parámetros característicos de un convertidor DAC.....	96
4.4.4 Aplicaciones.....	98
4.4.5 Conversor digital-analógico DAC0808.....	98
4.5 Construcción de un ICSP.....	100
4.5.1 Introducción.....	100
4.5.2 Modo monitor.....	100
4.5.3 Arquitectura.....	100
4.5.3.1 Nivel físico.....	101
4.5.4 Materiales.....	103
5. CAPÍTULO 5. ARQUITECTURA SOFTWARE DE CONTROL.....	104
5.1 El lenguaje de programación.....	104
5.2 Pasos para programar un PIC.....	105
5.3 El software del programador PicKit2.....	106
5.4 El programa de control.....	107
5.4.1 PID digital.....	107
5.4.2 Diagrama de flujo.....	110
5.4.3 Implementación.....	111
6. CAPÍTULO 6. PRESUPUESTO Y PLANIFICACIÓN PARA EL DESARROLLO COMERCIAL.....	116
6.1 Presupuesto.....	116
6.2 Planificación para el desarrollo comercial	119
6.2.1 Tareas.....	119
6.2.2 Uso de recursos.....	122

7. CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	124
7.1 Conclusiones, problemas y éxitos.....	124
7.2 Trabajos futuros.....	124
BIBLIOGRAFÍA.....	125

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.

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 y viceversa.

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 lenguaje de alto nivel como C, el mismo que se utilizó en la anterior versión del proyecto.

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 la levitación magnética.**

En esta fase 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. Componentes hardware.**

Se detallarán los componentes utilizados por la maqueta de levitación magnética. Así como la utilización del electromagnetismo en electroimanes. Posteriormente se dará información sobre fuentes eléctricas y su análisis, así como la clasificación de las mismas. También se hablará de los amplificadores operacionales detallando tipos aplicaciones limitaciones y características tensión frecuencia. Como ultimo se desarrollará la fuente de intensidad.

- **Capítulo 4. Arquitectura hardware de control.**

En esta fase se abordará la arquitectura hardware encargada del control de la maqueta. 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 y, finalmente, se acabará hablando de la construcción de un ICSP para la programación de nuestro PIC, dotando al proyecto de mayor flexibilidad con respecto al original.

- **Capítulo 5. 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 objeto de

implementación en el programa que se elabore. Posteriormente, se elaborará un diagrama de flujo, que ayudará a la implementación y finalmente se mostrará el programa de control finalmente implementado y explicado al detalle.

- **Capítulo 6. Presupuesto y planificación para el desarrollo comercial.**

En esta fase en primer lugar se tratará de dar un presupuesto de los materiales utilizados en la construcción del ICSP y el diseño la fuente de intensidad. En segundo lugar se presentará la simulación del desarrollo del proyecto mediante la herramienta informática que proporciona Microsoft Project.

- **Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.**

En esta fase el autor da una serie de conclusiones sobre los objetivos que se siguen en el proyecto. Se detallan algunos problemas surgidos en el desarrollo así como se llegaron a solventar y que culminan con el éxito del proyecto. En la segunda parte se habla de trabajos futuros dándole al proyecto una continuidad de mejora con vistas al futuro.

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 implementación de un control y mejora de esta con la construcción de la fuente de tensión, 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.

Se tiene que citar a Tales de Mileto (625 – 546 a.C.) 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.) 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) 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 dinamo. 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).

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 Northeastern 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 futuras 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 los 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).

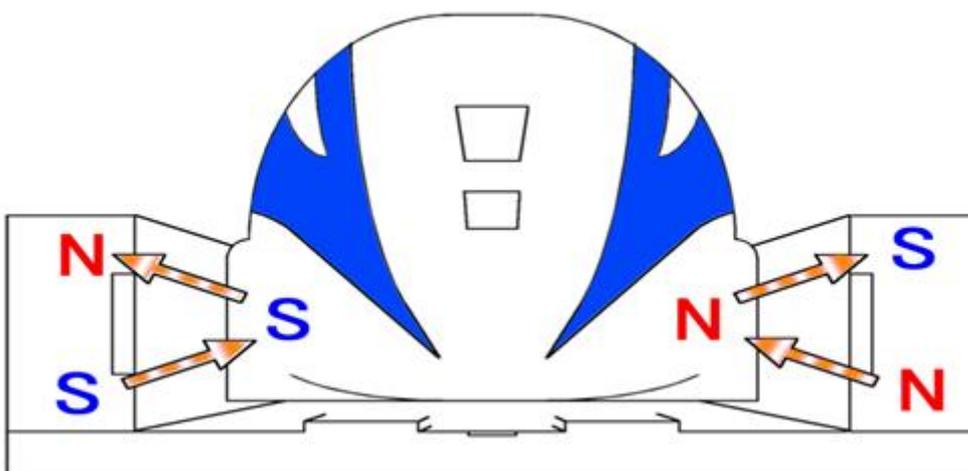


Figura 2.2: Tren MAGLEV dónde se aprecia cómo se genera el campo magnético que impulsa el tren hacia delante.

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.

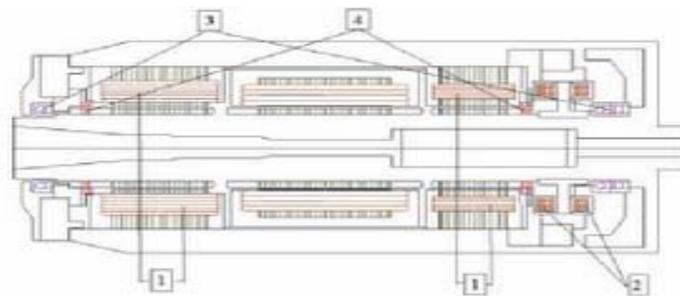


Figura. 2.4: Esquema del cojinete de levitación.

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.

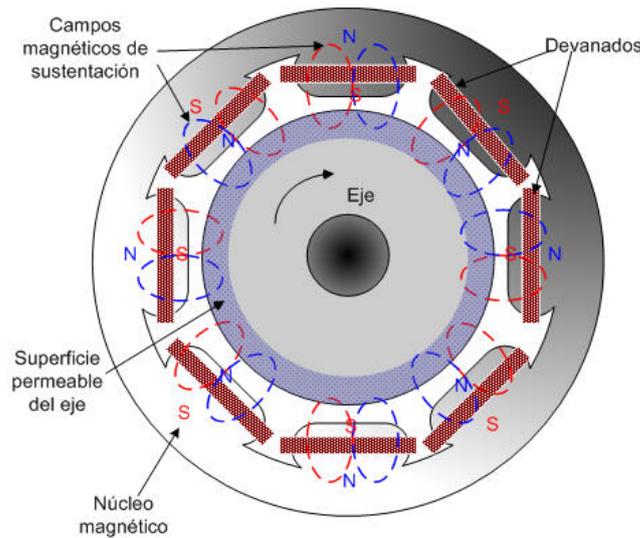


Figura 2.5: Esquema del cojinete de sustentación radial.

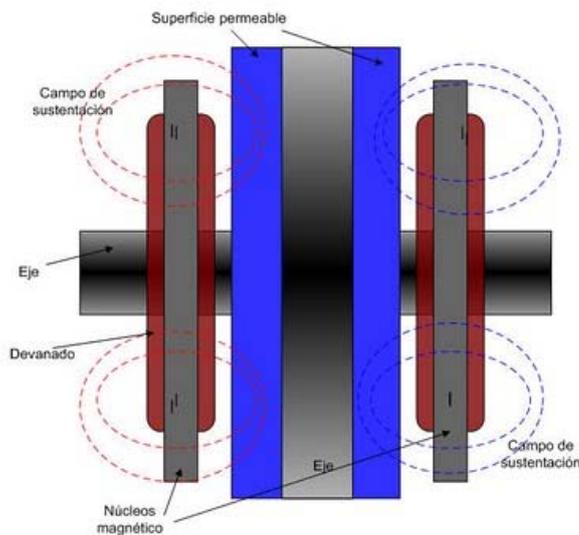


Figura 2.6: Esquema del cojinete de sustentación axial.

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.

2.1.2.2.2 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 posible 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 ha 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.”

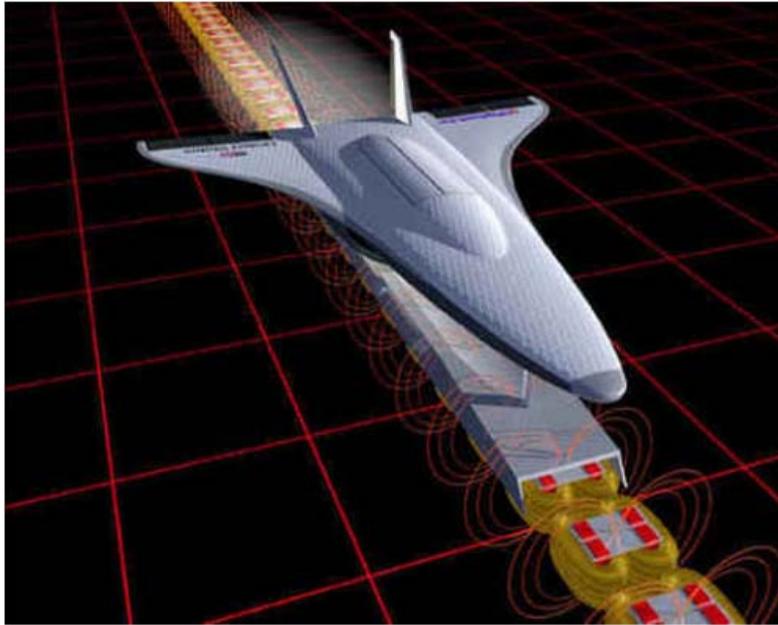


Figura. 2.8 Simulación informática de un cohete espacial por levitación magnética. Fuente: NASA.

Como noticia que ha parecido interesante hablar y que se hace 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 (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.

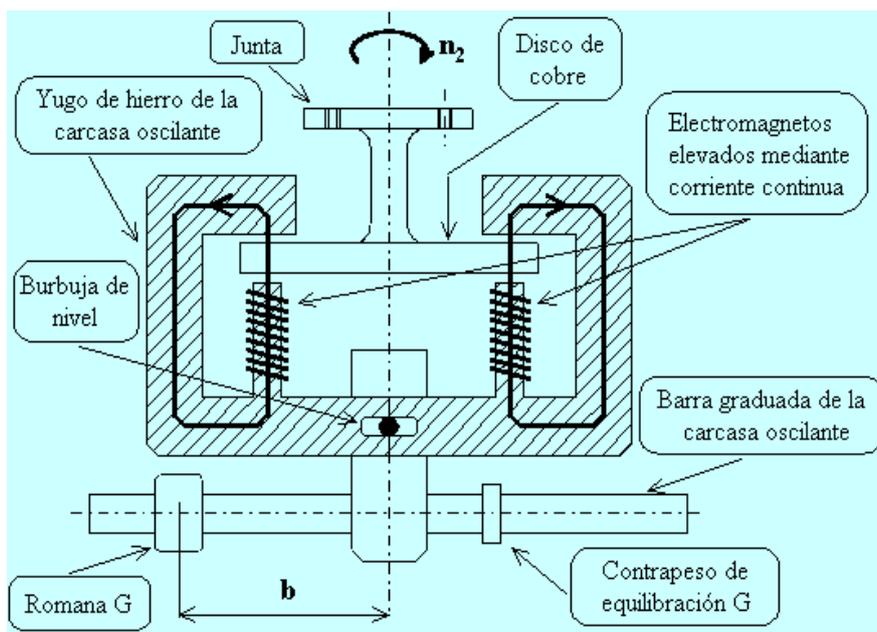


Figura 2.9: Esquema de un freno electromagnético.

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 2.11.

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 ponemos a disposición a continuación:

Specification	Value	Units
MAGLEV Enclosure Dimensions (L x D x H)	16 x 16 x 28	cm
Coil Inductance	412.5	mH
Coil Resistance	10	Ω
Number Of Turns in the Coil Wire	2450	
Coil Steel Core Radius	0.008	m
Steel Ball Radius	1.27E-002	m
Steel Ball Mass	0.068	kg
Steel Ball Travel	0.014	m
Ball Position Sensor Power Bias	± 12	V
Ball Position Sensor Measurement Range	± 5	V
Ball Position Sensor Sensitivity	2.83E-003	m/V

Figura 2.12: Tabla datasheet especificaciones.

También incluimos una tabla con las especificaciones más relevantes.

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 2.13: 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.

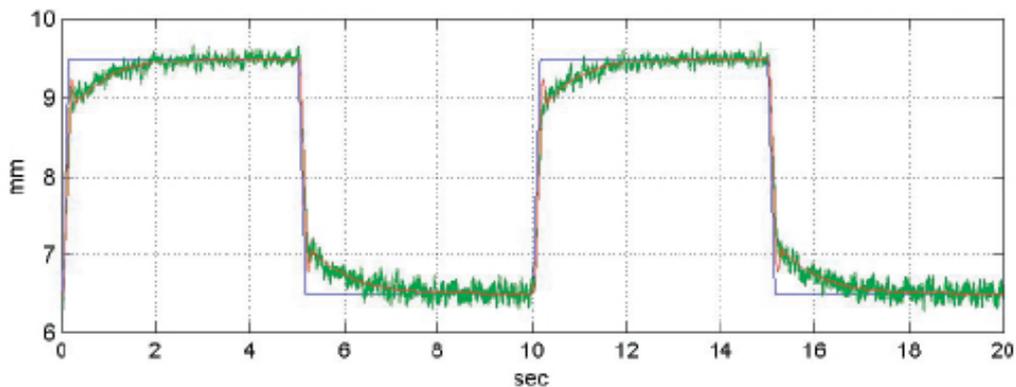


Figura 2.14: Comportamiento teórico (azul) y real (verde) de la posición de la bola cuando se le aplica una referencia de tipo onda cuadrada.

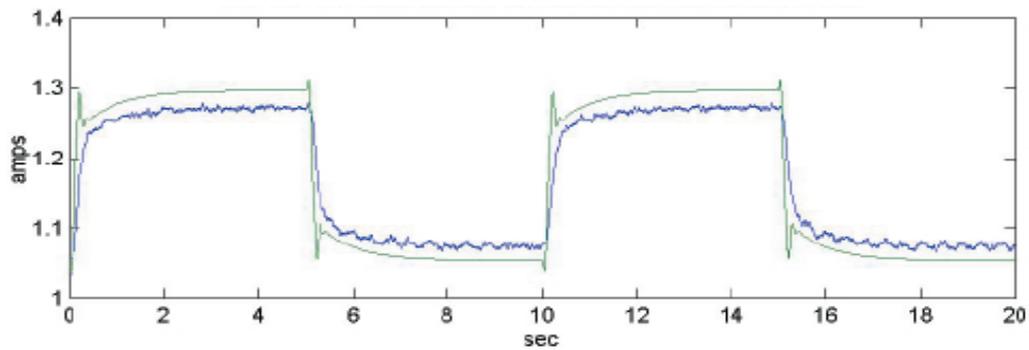


Figura 2.15: Comportamiento teórico (azul) y real (verde) de la intensidad que atraviesa la bobina para el mismo caso anterior (referencia de tipo onda cuadrada).

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 2.16: 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 2.17: 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.

Se adjunta en la siguiente figura el diagrama de bloques del sistema.

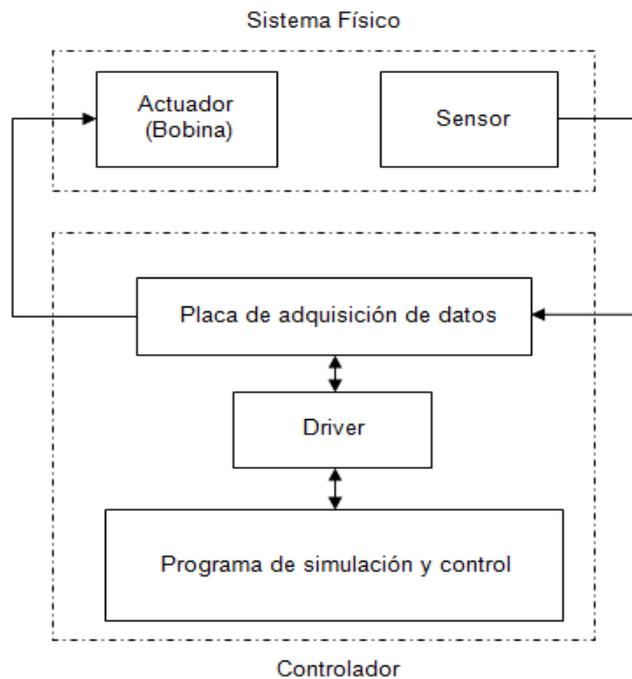


Figura 2.18: Diagrama de bloques del sistema.

El bloque controlador representa la implementación del control a través de una PC que cuenta con una tarjeta de adquisición de datos marca National Instruments y el conjunto de programas que se utilizan para el manejo de la misma y para la simulación e implementación de los controladores en el PC. Los programas utilizados: Real Time Workshop, Real Time Windows Target, Matlab y Simulink. La utilización de estos programas permite la simulación interactiva del sistema, permitiendo el cambio de parámetros de los controladores on-line, analizando lo que sucede inmediatamente, ideal para el trabajo en laboratorio.

El bloque actuador representa a la bobina encargada de entregar el campo magnético necesario para producir la levitación. La misma se construyó con núcleo de ferrita para reducir los efectos de histéresis, y es alimentada mediante una fuente de corriente electrónica.

Por último el bloque sensor está compuesto por el instrumento que nos entrega la información de la posición vertical del cuerpo metálico.

CAPÍTULO 3

COMPONENTES HARDWARE

3.1 Elementos principales de una maqueta de levitación magnética.

3.1.1 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 solo 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.

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.

3.1.1.1 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 se encuentra un material piroeléctrico, natural o artificial, normalmente formando una lámina delgada dentro del nitrato de galio (GaN), 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. Como se puede apreciar en la figura 3.1, el detector queda activado de forma estable, mientras recibe un tren de pulsos modulado a la frecuencia del filtro que incorpora.

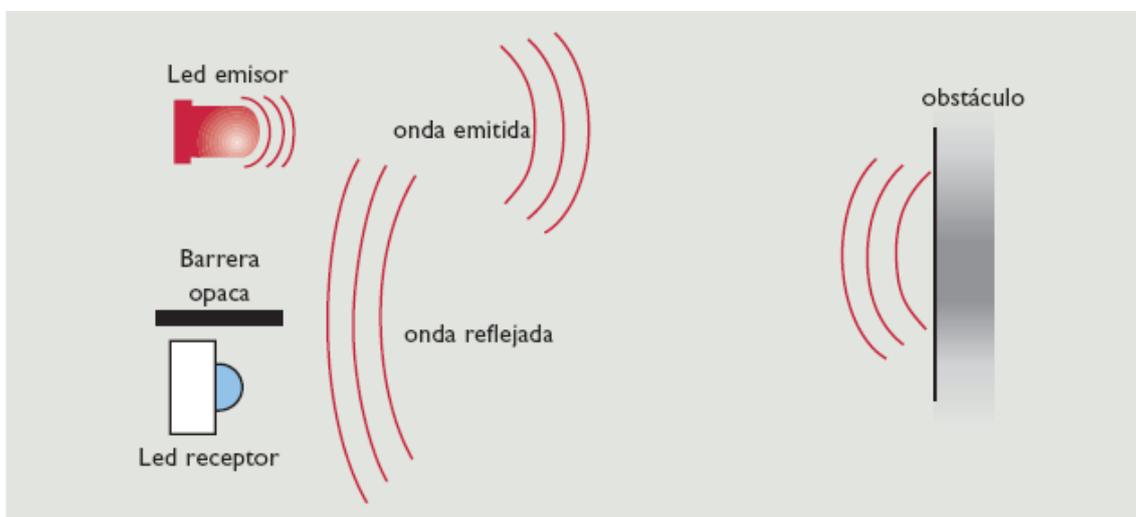


Figura 3.1: Funcionamiento típico de un sensor de infrarrojo.

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.

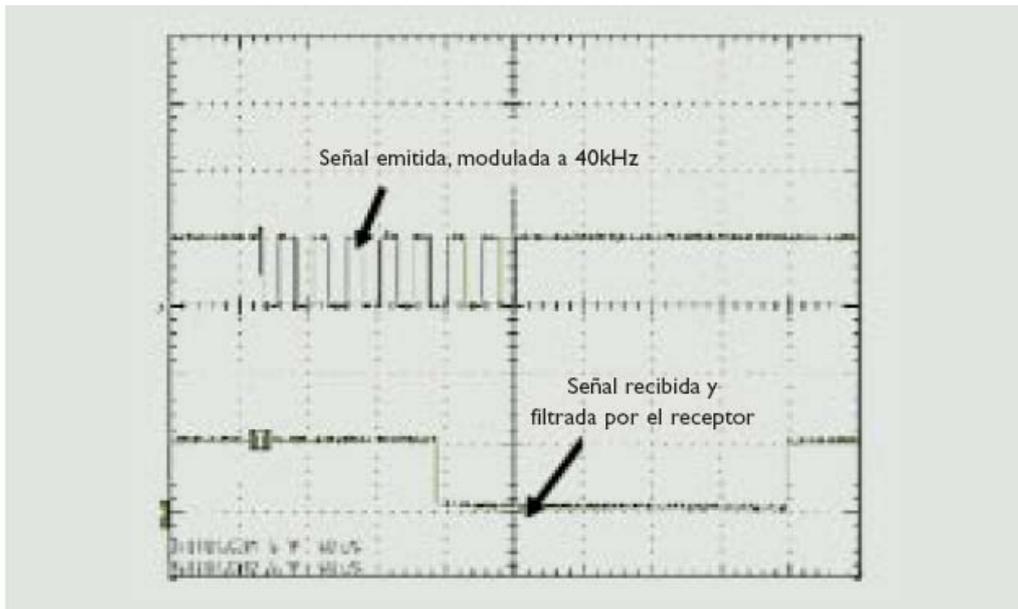


Figura 3.2: Captura en osciloscopio de la señal emitida por el emisor y recibida por el receptor de un sistema de infrarrojo.

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 telemandos de los equipos de audio y vídeo domésticos, así como en los telemandos de alarma y de control de apertura de vehículos.

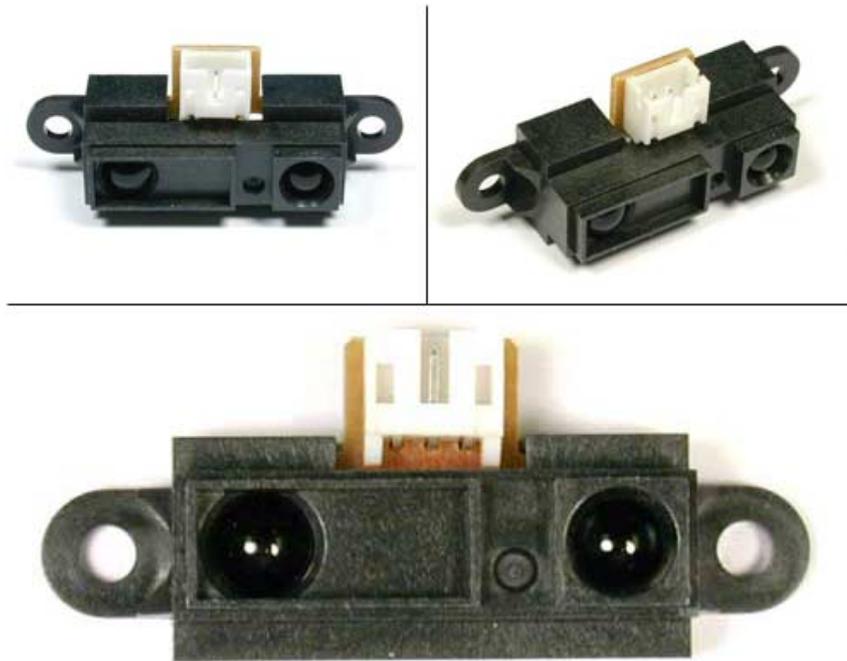


Figura 3.3: Diferentes vistas del sensor de infrarrojo modelo GP2D12 comercializado por Sharp.

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 direccionabilidad, 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.

3.1.1.2 Detector 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 3.4: 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.

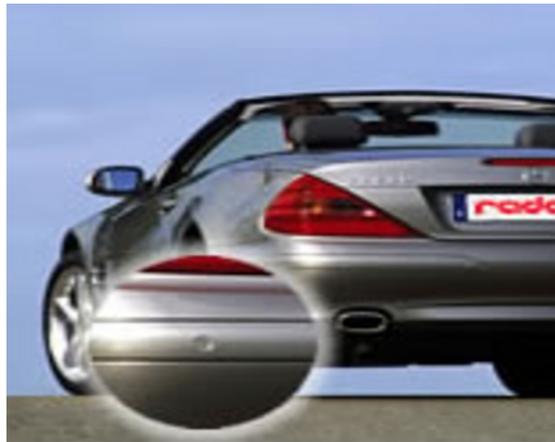


Figura 3.5: Aplicación de los sensores de ultrasonidos en la industria automovilística, con el fin de alertar de la distancia de un obstáculo, facilitándole así las maniobras al conductor.

3.1.1.3 LVDT.

3.1.1.3.1 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.

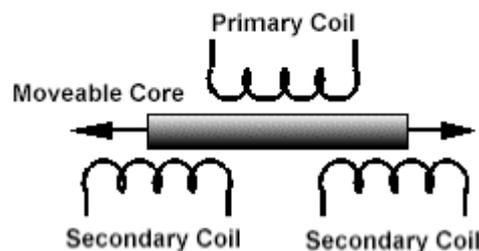


Figura 3.6: Esquema del principio de funcionamiento general de un LVDT.

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} : es la tensión de salida.

V_{in} : la tensión de entrada.

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

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

Como el núcleo se desplace, 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.

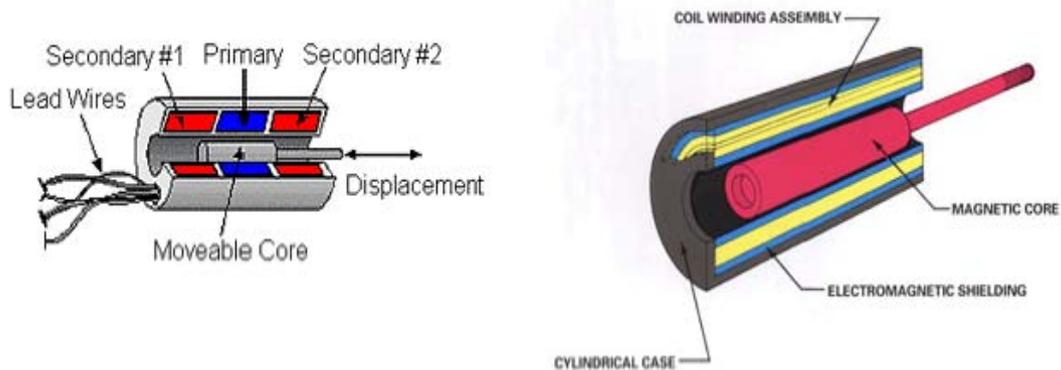


Figura 3.7: Esquema de la estructura básica y principio de funcionamiento específico de un LVDT.

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.

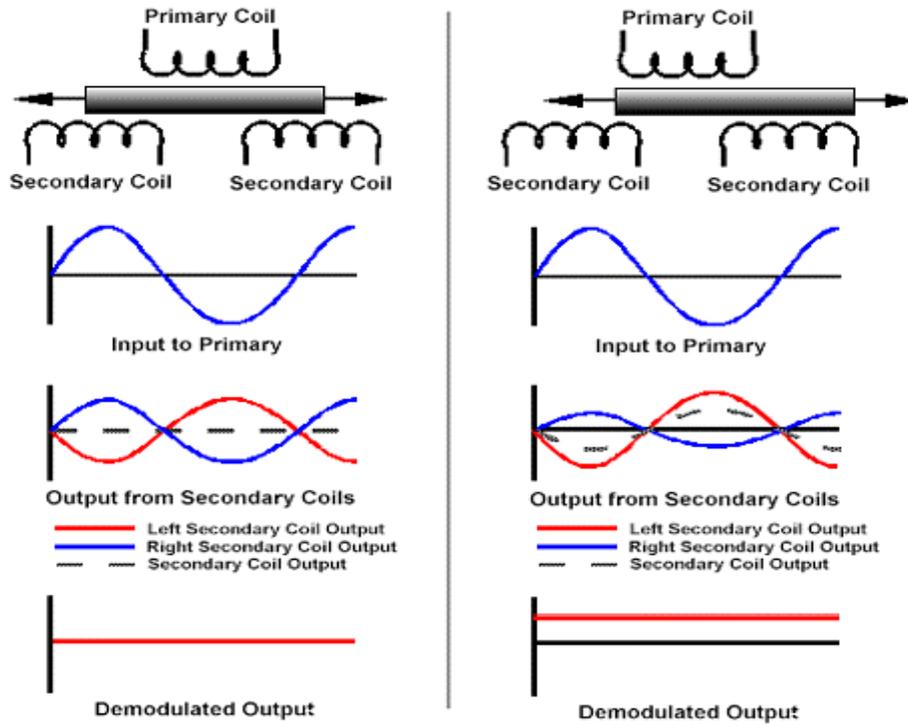


Figura 3.8: Diagrama con la relación entre la señal de entrada del bobinado primario, el núcleo magnético y la señal de salida.

3.1.1.3.2 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.

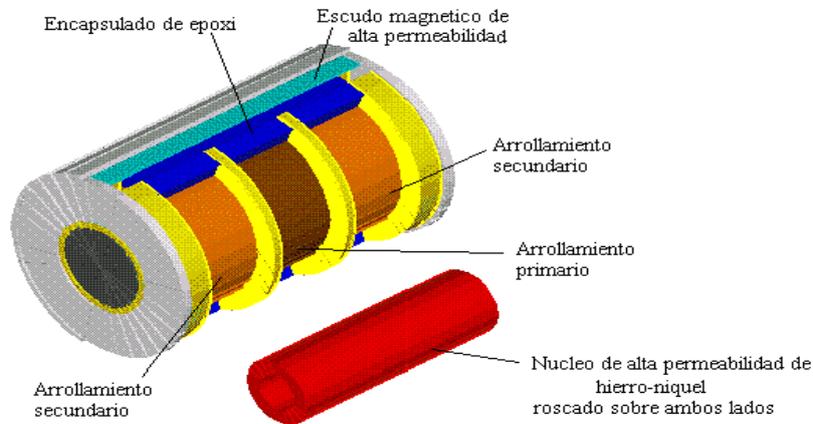


Figura 3.9: Esquema de la estructura de un LVDT.

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.

En la figura 3.10 se ilustra que sucede cuando el núcleo de los LVDT está en posición axial diferente.

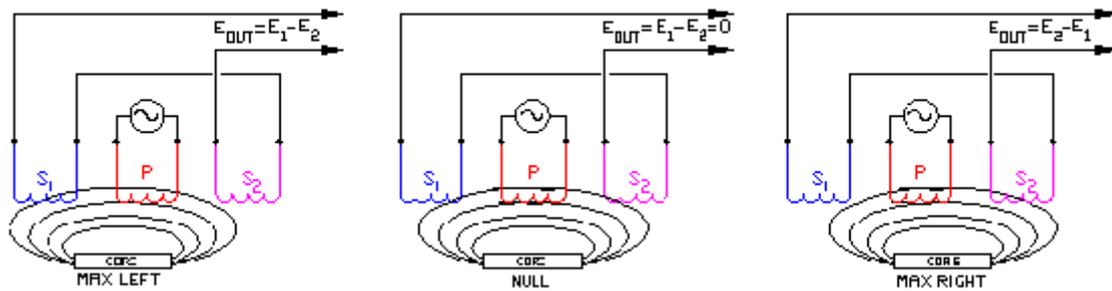


Figura 3.10: Diferentes tensiones de salida obtenidas según la posición del núcleo del LVDT.

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 2.20 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.

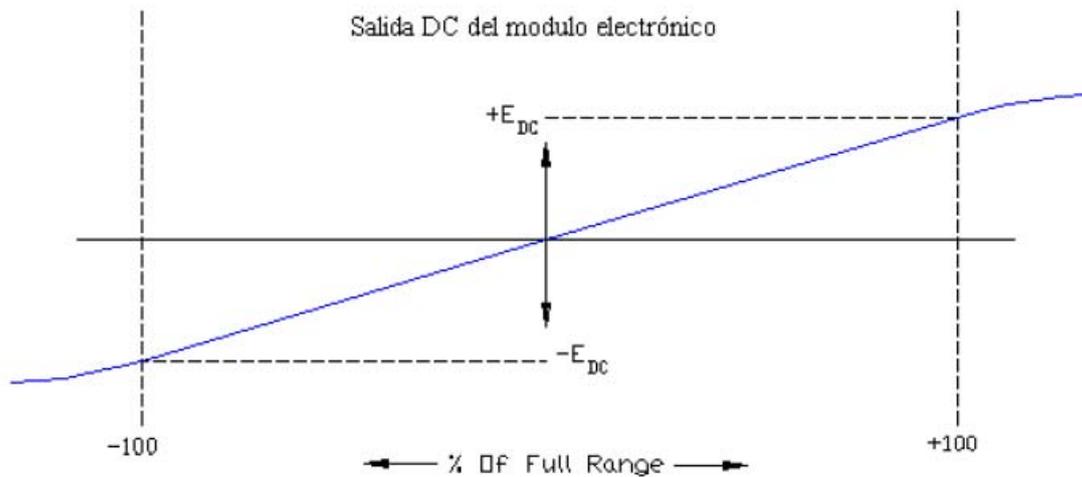


Figura 3.11: Salida de un LVDT sobre la totalidad del rango de trabajo (rango específico de movimiento del núcleo).

3.1.1.3.3 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 aviones, 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 3.12: Aspecto de un sensor LVDT.

3.2 Electroimanes

3.2.1 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.

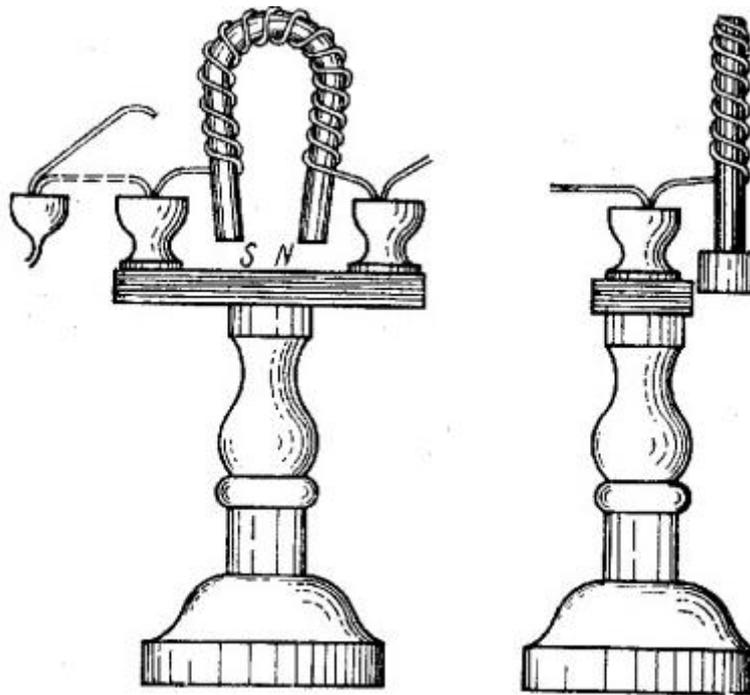


Figura 3.13: Primeros electroimanes contruidos por el electricista inglés Sturgeon.

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. 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.

3.2.2 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 3.14: 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.

3.3 Otros modos de utilización del electromagnetismo en electroimanes

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

3.3.1 Relé

3.3.1.1 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

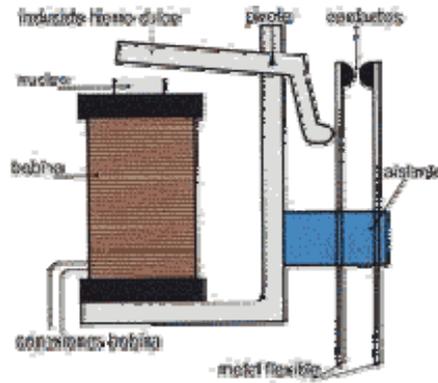


Figura 3.15: Se presenta el esquema básico de un relé

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.

3.3.1.2 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 lo 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 ó 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.

3.3.1.3 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

3.3.2 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

3.3.2.1 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.

3.3.2.2 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.

3.4 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.

3.4.1 Clasificación

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.

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 podemos enumerar los siguientes:

Batería
Pila
Fuente de alimentación
Célula 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.

3.4.2 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.

Ideales

Cuando dos o más fuentes ideales de tensión se conectan en serie, la fem (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.

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.

3.5 Nuestra fuente de intensidad

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

Procedemos a explicar los materiales que se utilizan para su construcción así como la metodología de trabajo seguida.

El autor y el director se vieron inmersos en la búsqueda de un amplificador operacional adecuado que diera las especificaciones que pedía la maqueta.

Antes de todo, se debe introducir al lector en el mundo de los operacionales y conocer un poco de ellos.

3.5.1 Operacionales

3.5.1.1 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.

3.5.1.2 Notación

El símbolo de un amplificador es el mostrado en la siguiente figura

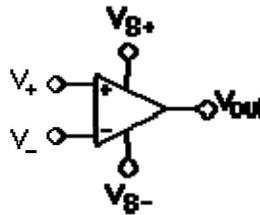


Figura 3.16: Símbolo de un amplificador.

Los terminales son:

V_+ : entrada no inversora

V_- : entrada inversora

V_{OUT} : salida

V_{S+} : alimentación positiva

V_{S-} : alimentación negativa

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.

3.5.2 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	

Nota: 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.

3.5.3 Comportamiento en corriente continua (DC)

3.5.3.1 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-} .

3.5.3.2 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.

3.5.4 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.

3.5.4.1 Comparador

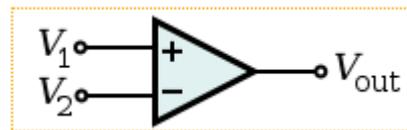


Figura 3.17: Esquema de un amplificador comparador

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.

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

3.5.4.2 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:

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

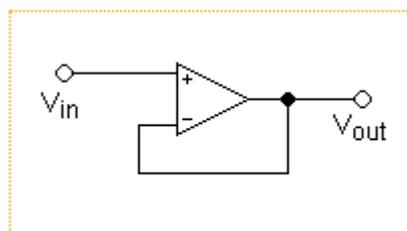


Figura 3.18: Esquema de un seguidor de tensión

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.

3.5.4.3 Inversor

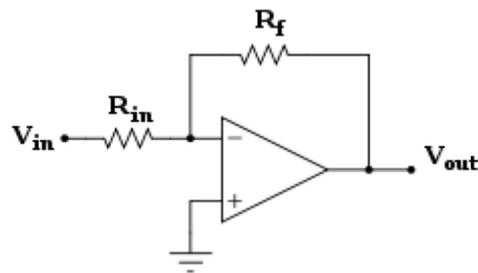


Figura 3.19: Esquema de un Inversor

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 despeja

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

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.

3.5.4.4 No inversor

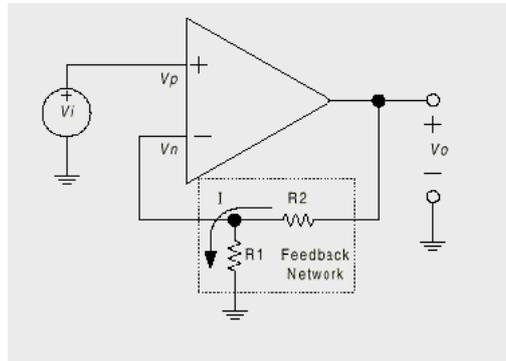


Figura 3.20: Esquema de un circuito no inversor.

Como se observa, 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 supone una ventaja frente al amplificador inversor.

3.5.4.5 Sumador inversor

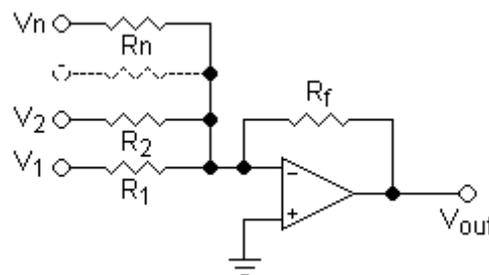


Figura 3.21: Esquema de un Sumador inversor.

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:

$$Z_n = R_n$$

3.5.4.6 Restador

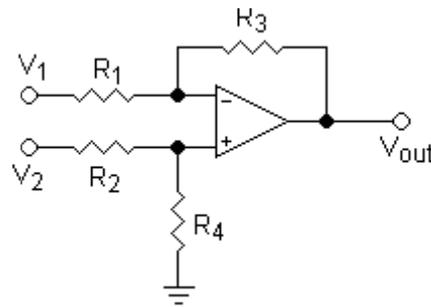


Figura 3.22: Esquema de un restador.

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.

3.5.4.7 Integrador ideal

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

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

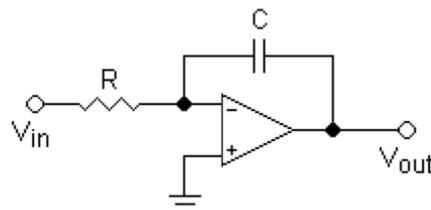


Figura 3.23: Esquema de un circuito Integrador ideal.

$V_{inicial}$ 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.

3.5.4.8 Derivador ideal

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

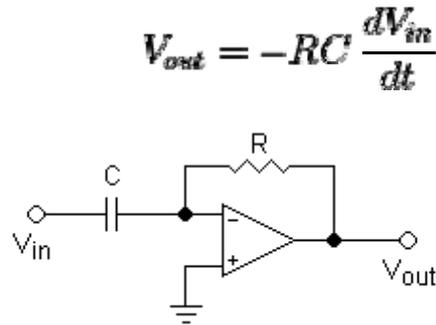


Figura 3.24: Se presenta el esquema básico de un relé

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.

3.5.4.9 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 está 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:

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

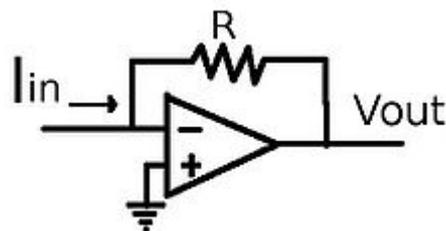


Figura 3.25: Esquema de un conversor de corriente a voltaje.

3.5.4.10 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.

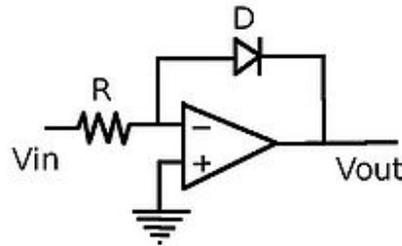


Figura 3.26: Esquema de un circuito exponencial

La señal de entrada, desarrollará 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:

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

3.5.4.11 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).

3.5.5 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).

3.5.6 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.

3.5.7 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.

3.5.8 Capacidades

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

3.5.9 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.

3.6 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

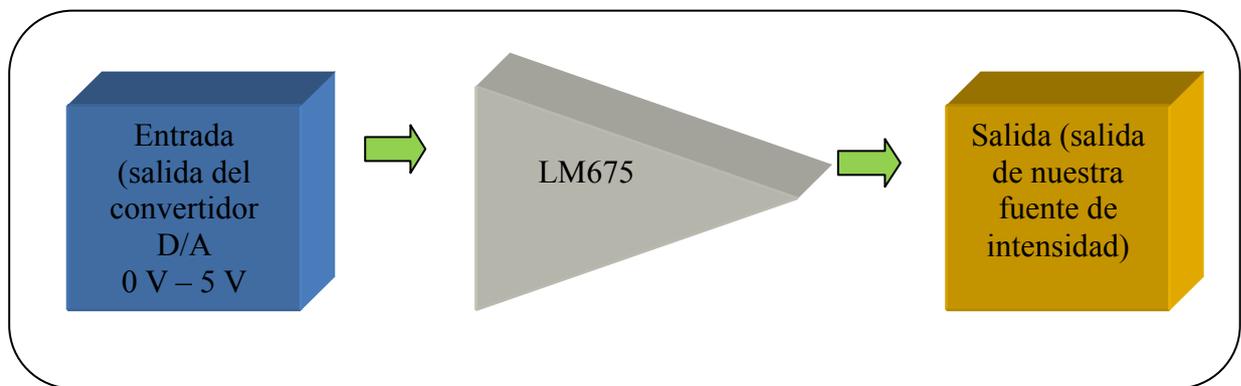


Figura 3.27: Diagrama de nuestra fuente de intensidad, donde se pueden apreciar sus componentes principales.

En la figura 3.27 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.

3.6.1 El operacional LM675

Anteriormente 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 puede encontrar en el CD del proyecto.

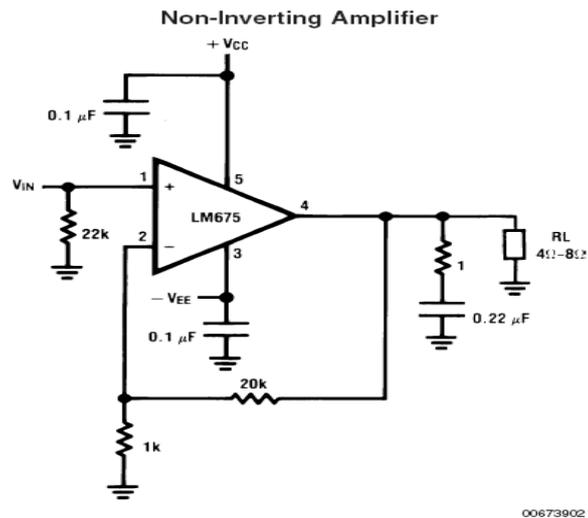


Figura 3.28: Esquema del circuito a implementar con el operacional LM675.

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 3.28 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 3.29, donde se pueden apreciar las distintas patillas que habrá que conectar a cada parte del circuito de la figura 3.28.

Connection Diagram

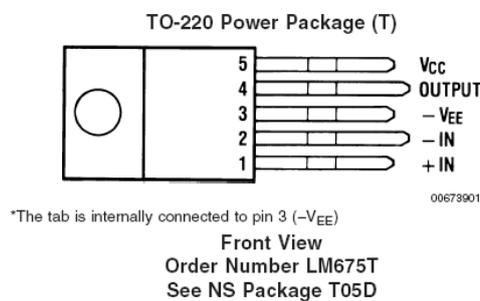


Figura 3.29: Aspecto externo del operacional.

3.6.2 Rasgos característicos

En este apartado se detallan las características del operacional utilizado, así como una tabla de 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% testeado

16 V – 60 V rango de alimentación.

Diodos internos de protección para salida
 Cobertura de plástico TO-220
 90 dB de rechazo 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.

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 3.30: Tabla con los valores de funcionamiento típicos.

CAPÍTULO 4

ARQUITECTURA HARDWARE DE CONTROL

En el presente capítulo se abordará la arquitectura hardware encargada del control de la maqueta. 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 y, finalmente, se acabará hablando de la construcción de un ICSP para la programación de nuestro PIC, dotando al proyecto de mayor flexibilidad con respecto al original.

4.1 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.

Extrayéndose de circuitos y visto desde arriba el proyecto queda definido de esta forma:

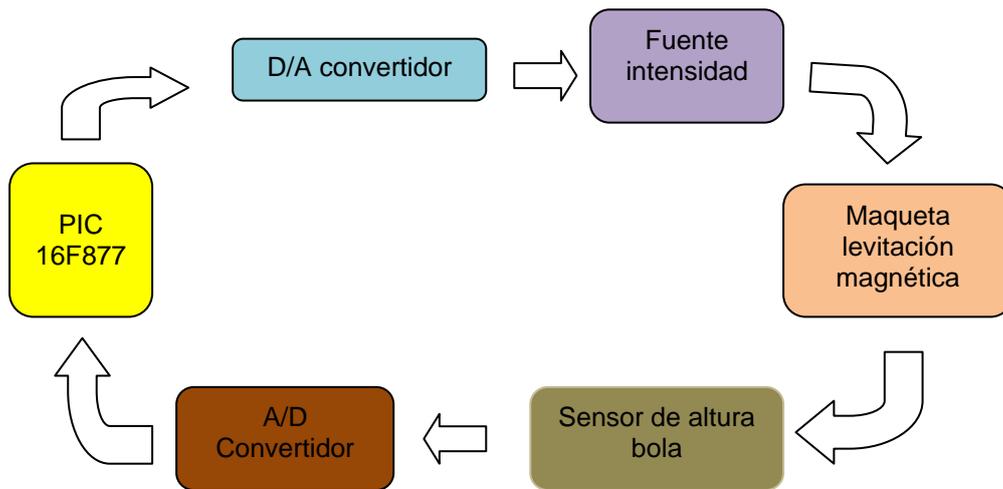


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema

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 entenderá 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, por lo 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 necesitamos 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, el sistema de procesamiento la recogerá y actuará en consecuencia, mediante el algoritmo que lleva implementado y que hemos programado del que entraremos en detalle en un capítulo posterior para que la bola se sitúe en la altura que se le ha fijado. 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.

4.2 Sistema de procesamiento.

4.2.1 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.

4.2.2 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 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.

4.2.3 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.

4.2.4 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.

Vamos 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 va a 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.

4.2.5 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.

4.2.5.1 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.

Se debe comprender que en un 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 se tendrán los siguientes: código (programa), datos y pila. Es por ello que se puede 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

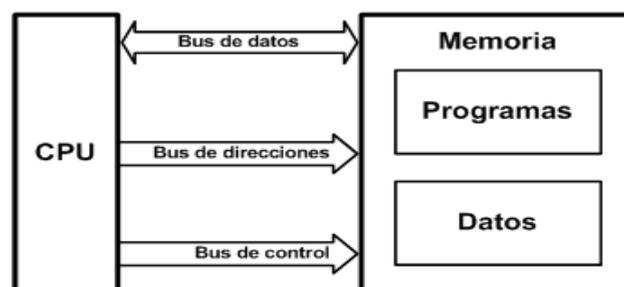


Figura 4.2: Arquitectura Von Neumann

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 los PC, donde el procesador se monta en algún tipo de socket alojado en una placa madre (motherboard). También esta organización 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.

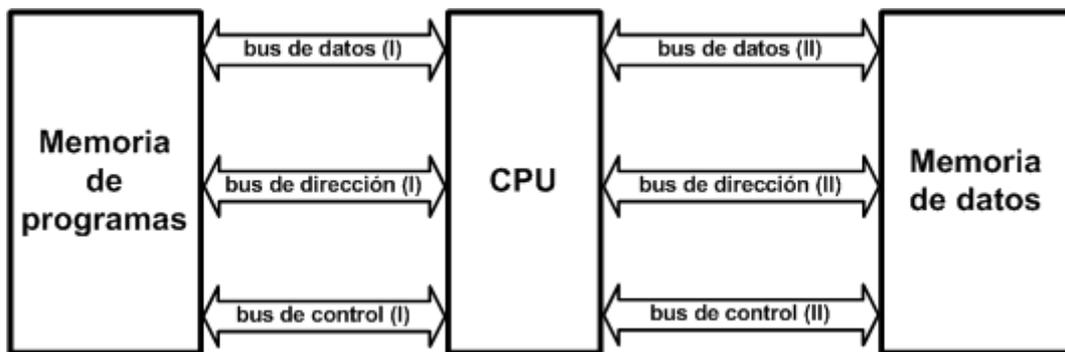


Figura 4.3: Arquitectura Harvard

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 se encuentra la arquitectura Harvard en la mayoría de los microcontroladores.

4.2.5.2 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. Permitted 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

4.2.5.2.1 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.

4.2.5.2.2 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 la unidad de control. La unidad de control en el procesador, es omnipotente y omnipresente.

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.

4.2.5.2.3 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:

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.

Datos.

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

4.2.5.2.4 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.

4.2.5.2.5 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 y RISC.

CISC, 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, 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

Una de las características más destacables de este tipo de procesadores es que posibilitan el paralelismo en la ejecución, y reducen los accesos 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.

4.2.5.2.6 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 costo 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 costo inicial de producción de la máscara y el de fabricación del circuito se distribuye entre todos los circuitos de la serie y, el costo 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.

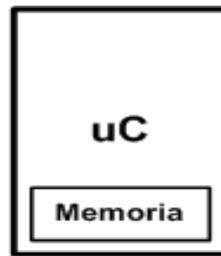


Figura 4.4: Esta configuración es la típica y se puede encontrar casi en el 100% de los microcontroladores.

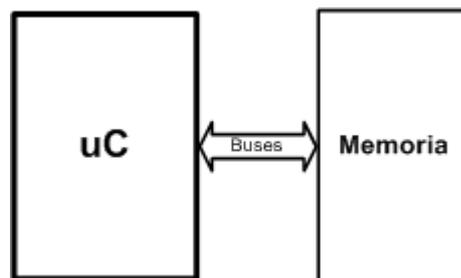


Figura 4.5: Esta configuración es poco frecuente y generalmente se logra configurando al microcontrolador para sacrificar la memoria de programas interna, sin embargo el 8031 de INTEL es un microcontrolador sin memoria de programas interna.

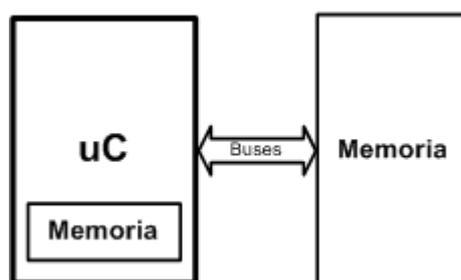


Figura 4.6: La configuración (c) es la que se encuentra habitualmente en los microcontroladores que tienen posibilidades de expandir su memoria de programas como algunos PIC de gama alta.

Quando 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.

4.2.5.2.7 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 asincrónico. 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.

4.2.5.2.8 Periféricos

Cuando se vio la organización básica de un microcontrolador, se señaló 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 encontraremos 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, conversores 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.

4.2.6 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 detallamos:

- * Sencillez de manejo: Tienen un juego de instrucciones reducido; 35 en la gama media.
- * Buena información, fácil de conseguir y económica.
- * Precio: 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.

4.2.6.1 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.

4.2.6.2 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).

4.2.6.3 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.

4.2.6.4 Arquitectura central

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

Área de código y de datos separadas (Arquitectura Harvard).

Un reducido número de instrucciones de largo fijo.

La mayoría de las instrucciones se ejecutan en un solo ciclo de ejecución (4 ciclos de clock), 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).

A diferencia de la mayoría de otros CPU, 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.

4.2.6.5 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

4.2.6.6 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
Convertidores 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

4.2.6.7 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 se encontrará 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.

4.2.6.7.1 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 4.7 que se adjunta a continuación, se muestra el diagrama de conexionado de uno de estos PIC.

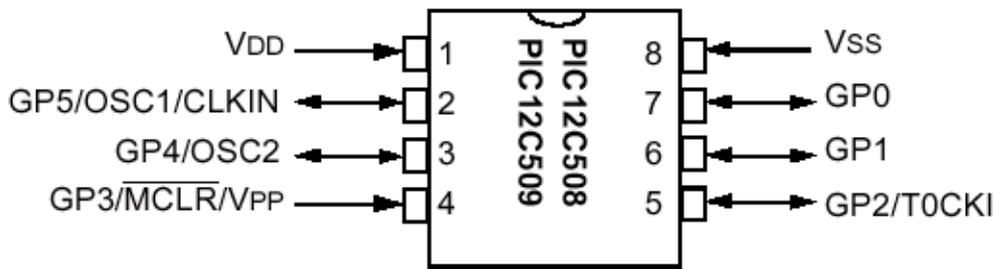


Figura 4.7: Diagrama de conexiones de los PIC12Cxxx de la gama enana.

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	PATILLAS
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 4.8: Características de los modelos PIC12C (F) XXX de la gama enana.

4.2.6.7.2 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.

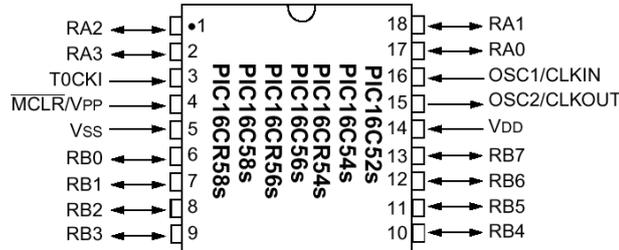


Figura 4.9: Diagrama de patitas de los PIC de la gama baja que responden a la nomenclatura PIC16C54/56.

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.

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.

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

Figura 4.10: Características de los modelos PIC16C(R)5X de la gama baja.

4.2.6.7.3 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 los 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 asincrónicamente 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.

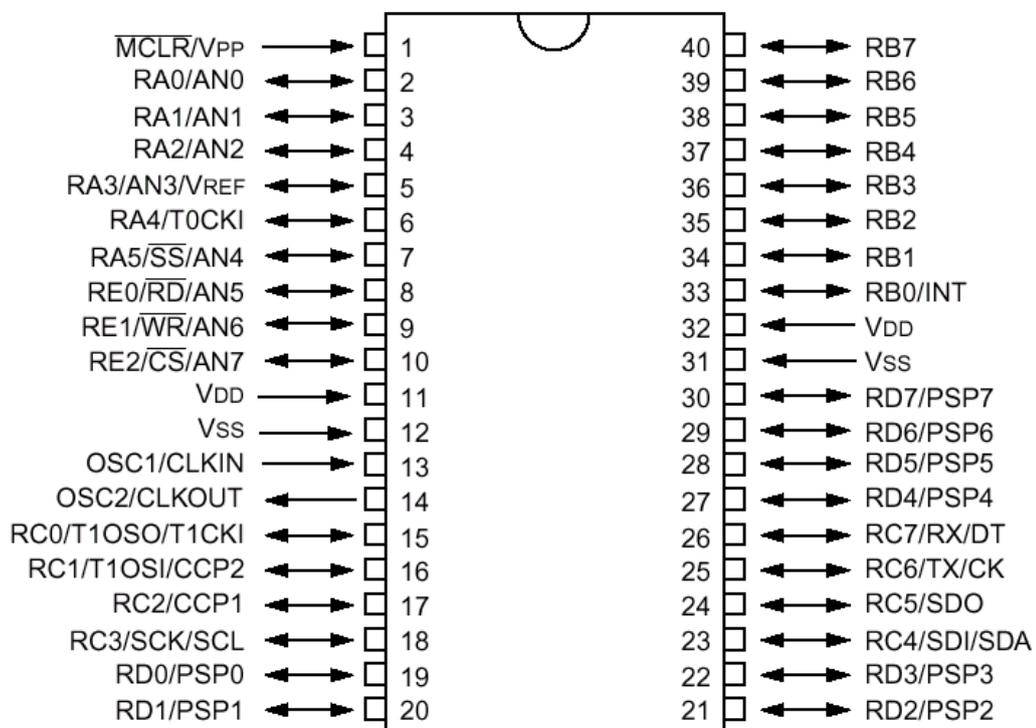


Figura 4.11: Diagrama de patitas del PIC16C74, uno de los modelos más representativos de la gama media.

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

Figura 4.12: Características relevantes de los modelos PIC16X8X de la gama media.

4.2.6.7.4 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	Patitas
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 4.13: Características más destacadas de los modelos PIC17CXXX de la gama alta.

4.2.6.7.5 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.

4.2.6.8 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 convertor analógico-digital, pues es necesario en el sistema total su uso y si las características propias del convertor lo permitieran que mejor que utilizar el propio convertor 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 utilizar un gran número de éstas y más todavía si finalmente el convertor 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.

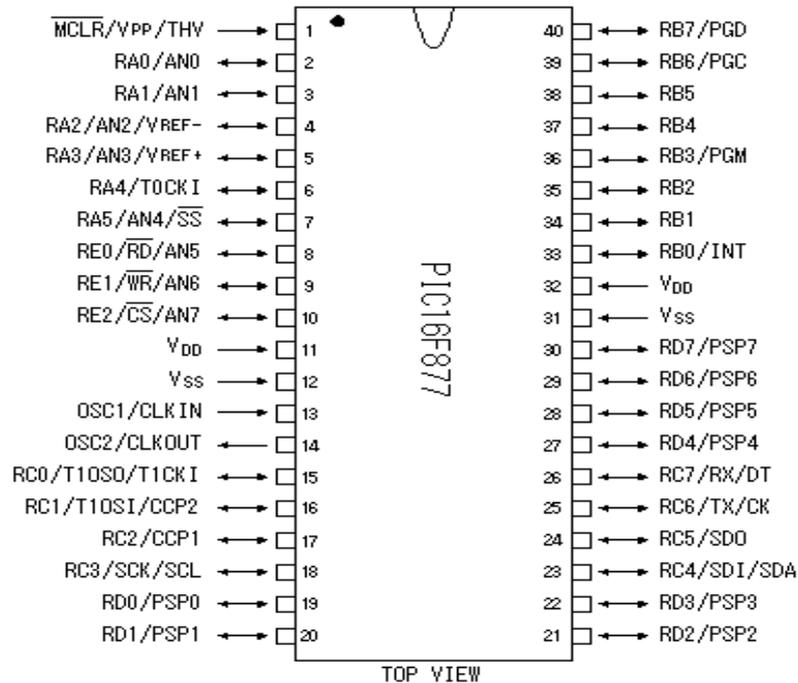


Figura 4.14: Diagrama de patillas del PIC16F877.

4.2.6.8.1 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 4.15: Características de los periféricos presentes en el PIC16F877

4.2.6.8.2 Esquema de la organización interna del PIC16F877

En este subapartado se presenta una imagen bastante reveladora donde se pueden observar la organización interna del PIC. Se pueden ver las entradas/Salidas representadas por las puertas A , B , C , D y E , los cuatro Timers de los que se dispone , la memoria de programa dada en memoria FLASH , la memoria de datos dada en memoria EEPROM. Se observa la comunicación entre las distintas partes mediante buses de comunicación de distinto tamaño.

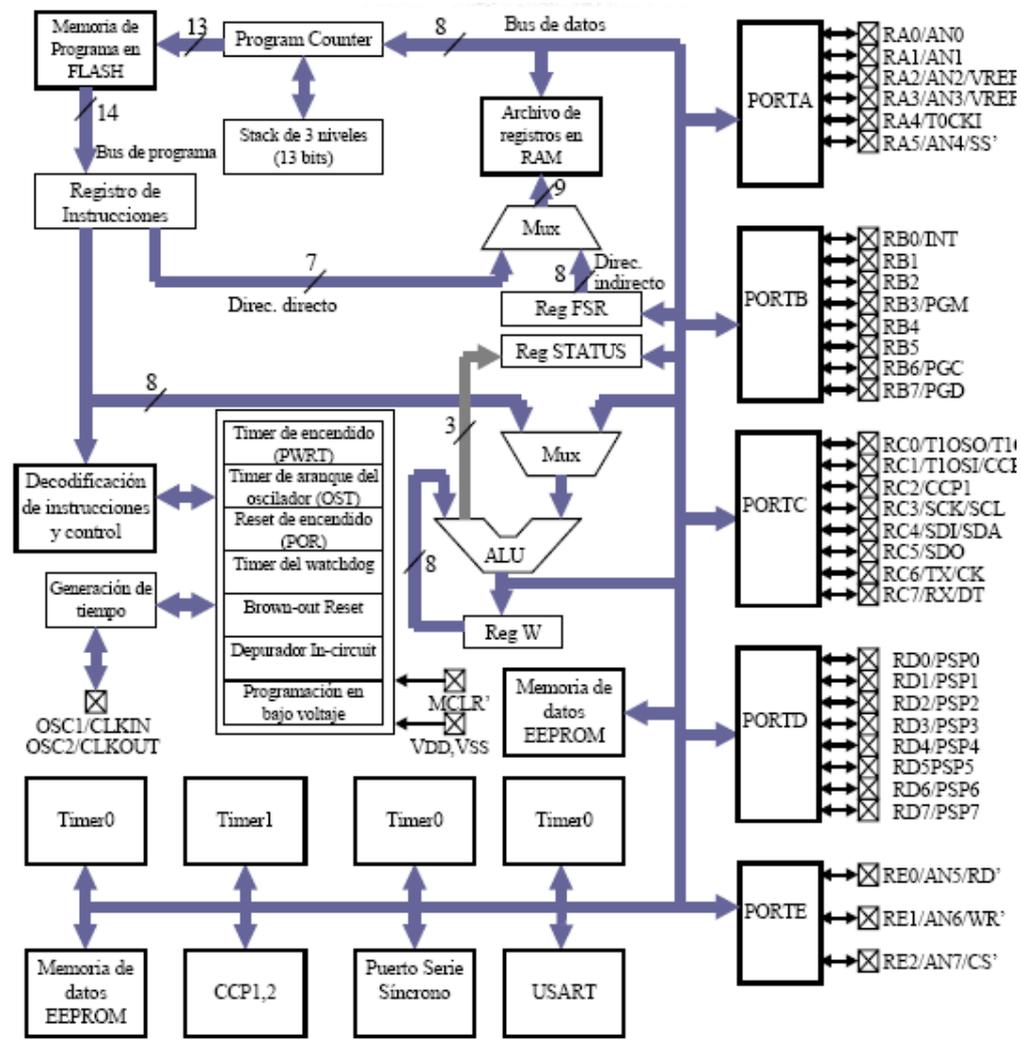


Figura 4.16: Esquema interno del PIC16F877.

4.3 Conversor analógico-digital

4.3.1 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 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:

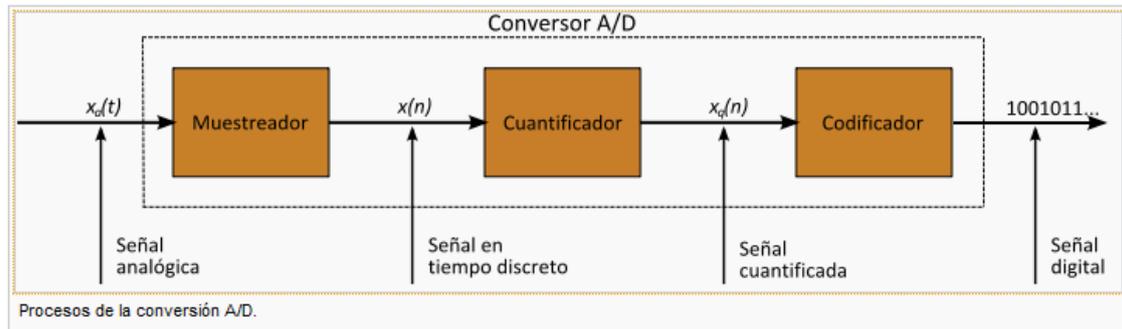


Figura 4.17: Esquema de conversión de Analógico a Digital.

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).

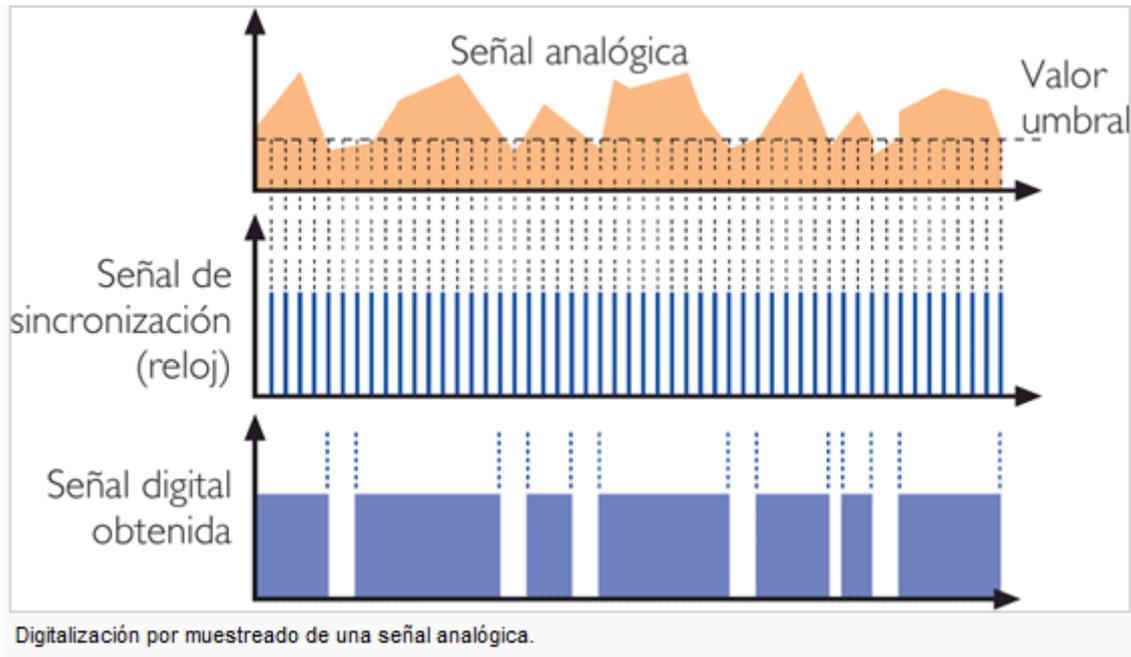


Figura 4.18: Vista de las diferentes señales a lo largo del proceso de conversión.

4.3.2 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.

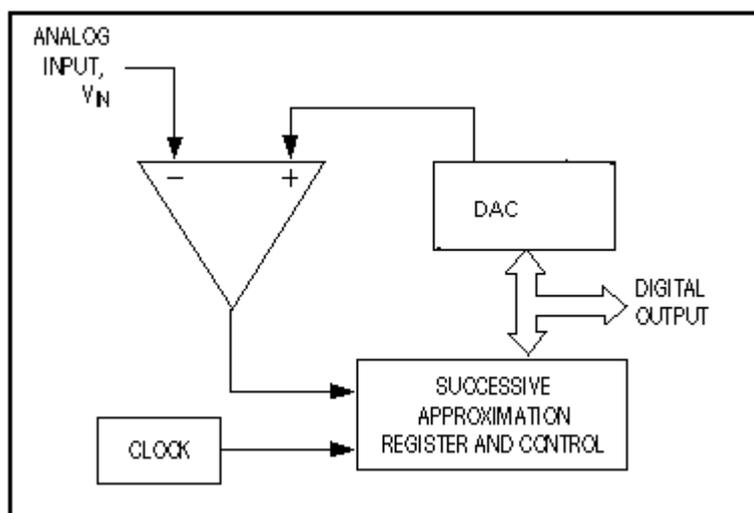


Figura 4.19: Esquema del convertor de aproximaciones sucesivas.

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.

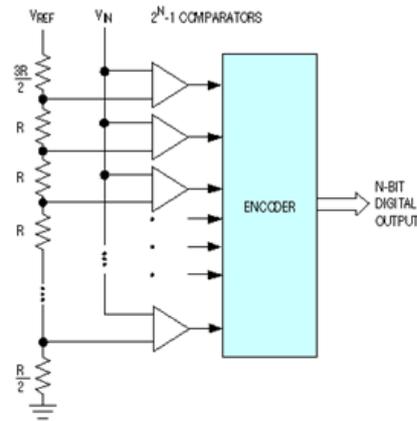


Figura 4.20: Esquema del convertor flash

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.

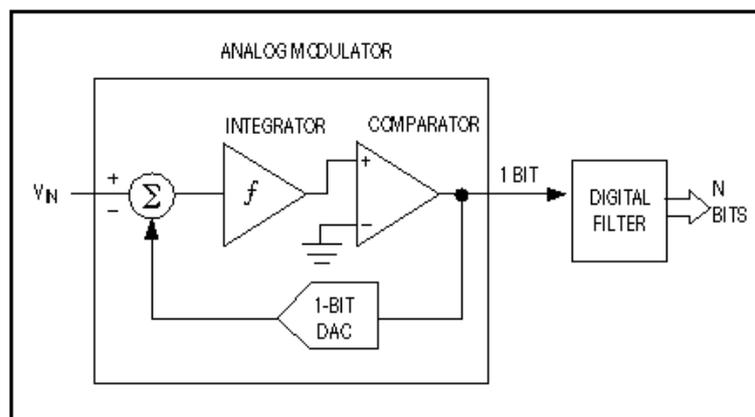


Figura 4.21: Esquema del convertor sigma delta

Otros tipos de convertidores 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 4.22 se puede observar las ventajas y desventajas que presentan los conversores citados en cuanto a resolución (resolution) y ancho de banda (bandwidth).

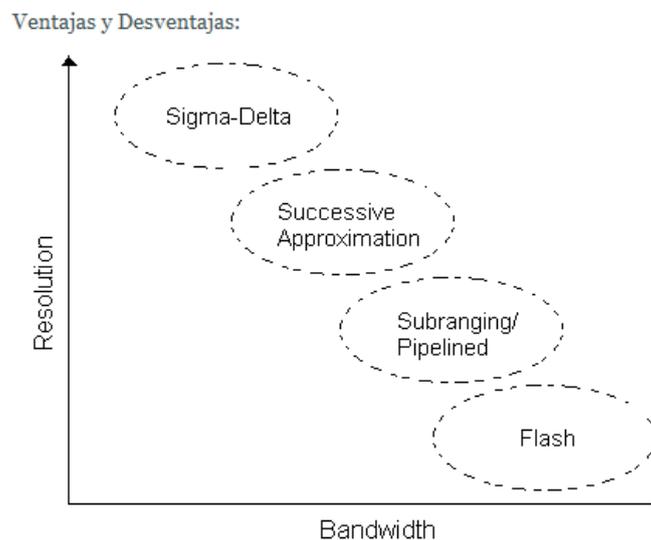


Figura 4.22: Ventajas y desventajas en cuanto a resolución y ancho de banda de los principales conversores.

4.3.3 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 convertidor.

Precisión:

Se define la precisión del convertidor 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:

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.

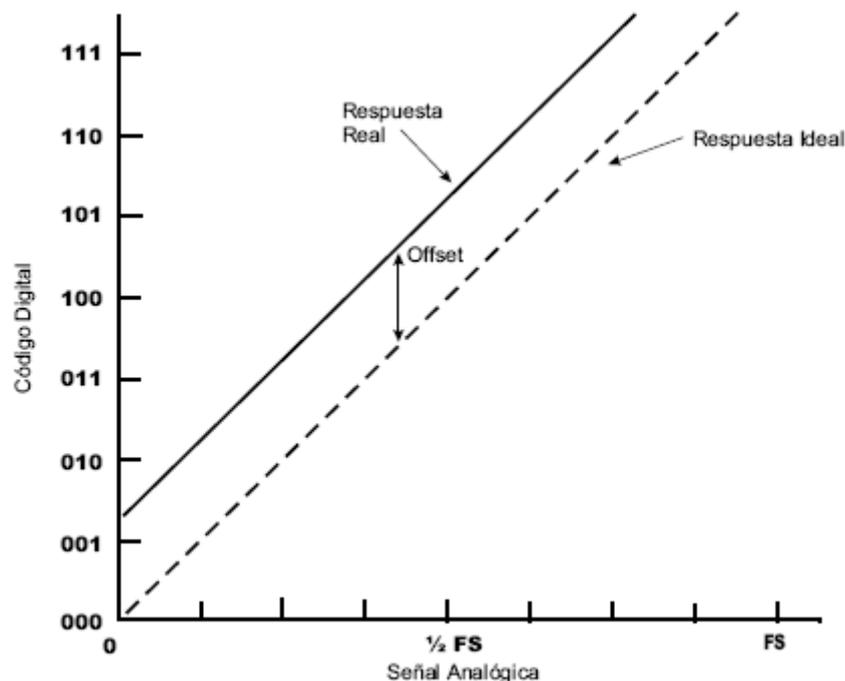


Figura 4.23: Error de offset.

Error de Ganancia: Corresponde a un corrimiento de la respuesta real a la ideal, por una constante multiplicativa. Dicho corrimiento puede ser arreglado por el producto con una constante.

Error de no linealidad diferencial (DNL): Cuantifica la no uniformidad del tamaño de los pasos de cuantización en el convertidor, usualmente se especifica como una fracción de LSB.

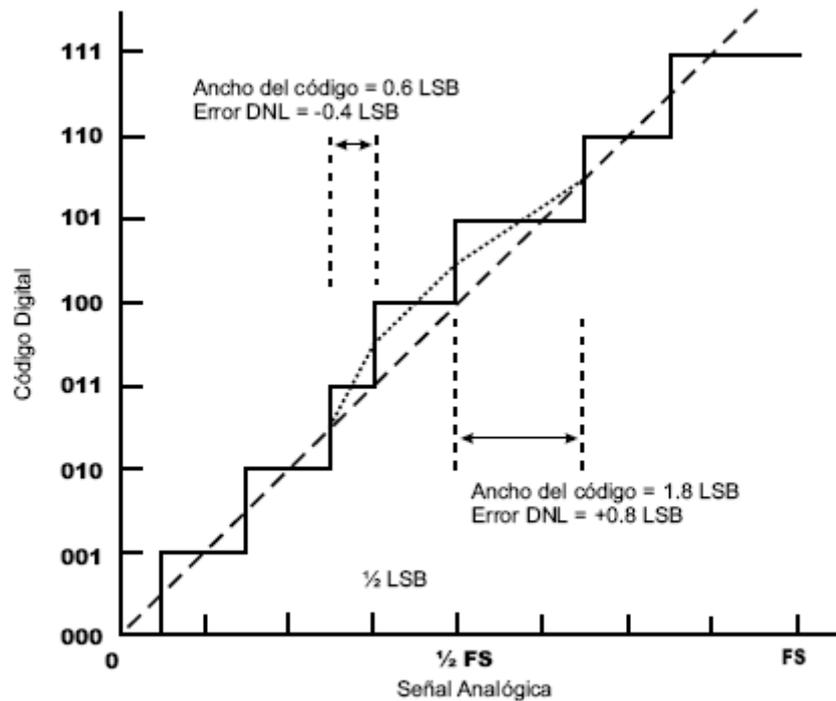


Figura 4.26: Error de no linealidad diferencial.

4.3.4 El convertidor analógico-digital LTC 1273BCN.

De entre los distintos convertidores A/D, la primera opción que se tuvo en cuenta fue la utilización del propio convertidor 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 convertidor de 8 bits permite 2^8 ó 256 valores distintos mientras que uno de, por ejemplo 12 bits, permite 2^{12} , o lo que es lo mismo, 4096 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 convertidor 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 convertidor externo que se adecuara a las necesidades requeridas. De entre ellos se eligió el convertidor A/D LTC 1273BCN. Se trata de un convertidor de excelentes prestaciones, con un tiempo de conversión realmente bajo ($2.7 \mu\text{s}$), y más si se compara con el del convertidor 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.

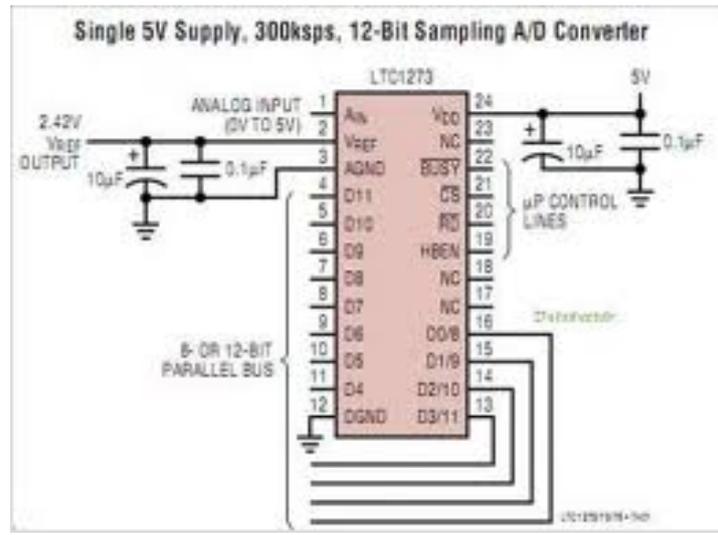


Figura 4.27: Esquema de funcionamiento del convertidor LTC1273BCN

4.4 Conversor digital-analógico.

4.4.1 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 conversor.

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 4.27 muestra la característica de transferencia de un convertor D/A ideal de 2 bits. Obsérvese que el número de valores posibles a la salida del convertor es 2^N , siendo N el número de bits del convertor. 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).

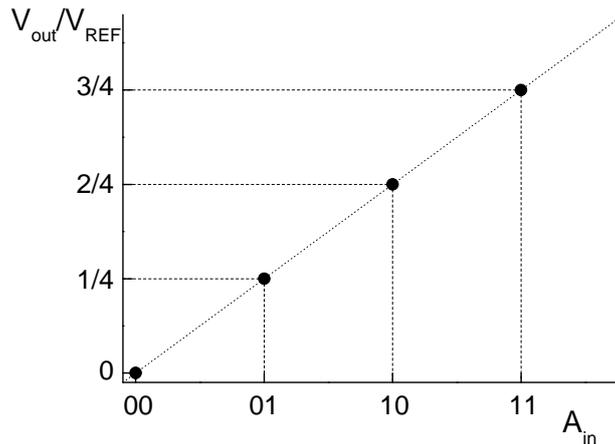


Figura 4.28: Convertor D/A ideal de 2 bits.

4.4.2 Tipos

Los tipos más comunes de la DAC electrónico son:

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

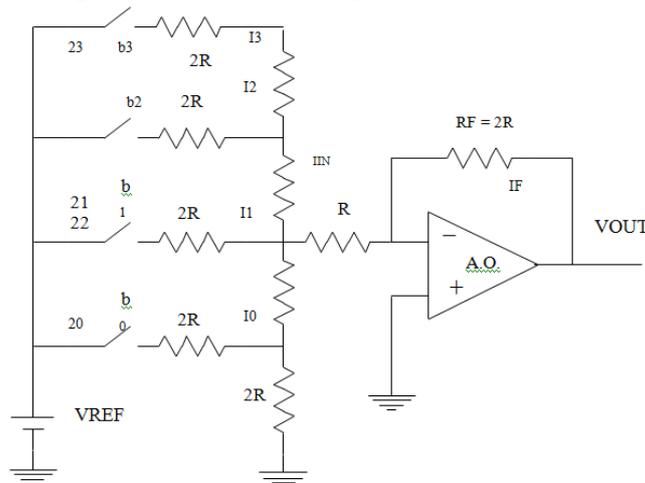


Figura 4.29: Esquema de un convertidor en escalera

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

Convertidor con ponderación binaria

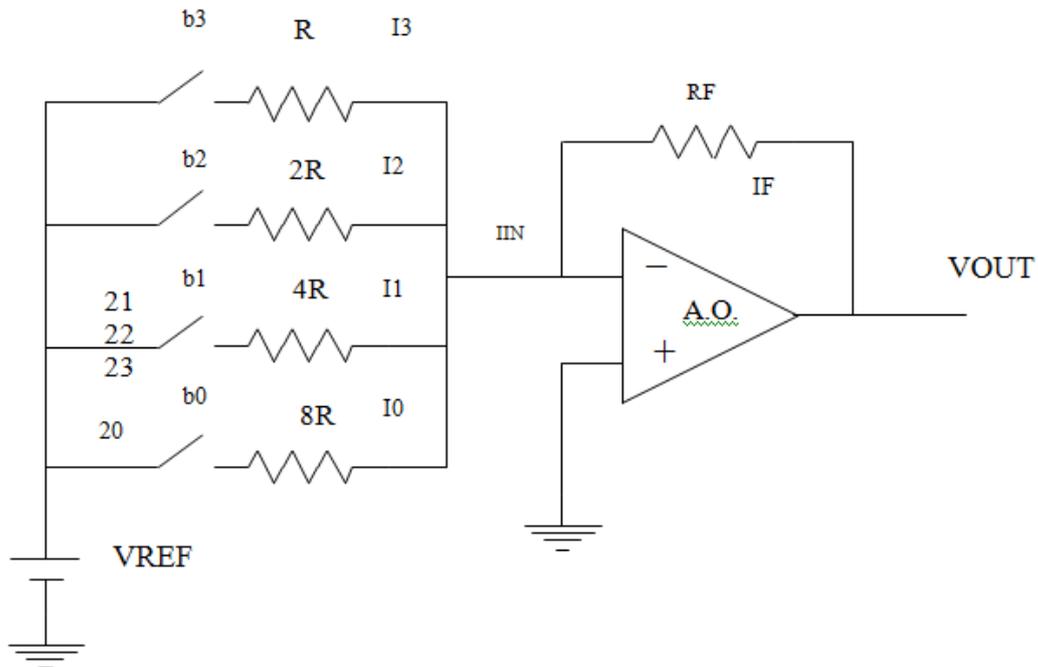


Figura 4.30: Esquema de un convertidor con ponderación binaria

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

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 $512R$, con una muy baja tolerancia para poder mantener la precisión del convertidor.

4.4.3 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 (E_{GAIN}):

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 conversor 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 conversor.

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 conversor con $V_{REF} = 4$ V y que la máxima desviación entre los valores reales y los ideales es: $\Delta V = 11$ mV.

Para calcular N_{eff} tendríamos:

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

La precisión absoluta expresada como número efectivo de bits se conoce como número absoluto de bits del conversor 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 monótonico 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 *monótonico*. No obstante, el convertor puede ser monótonico sin cumplir las condiciones anteriores.

4.4.4 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. Recuerdese 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

4.4.5 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 ± 1 LSB, con formato paralelo de ingreso de datos y que puede operar con una tensión de ± 5 V. 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 la figura 4.31 que se acompaña a continuación se puede observar el aspecto exterior que presenta este convertidor.



Figura 4.31: 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 5.26.

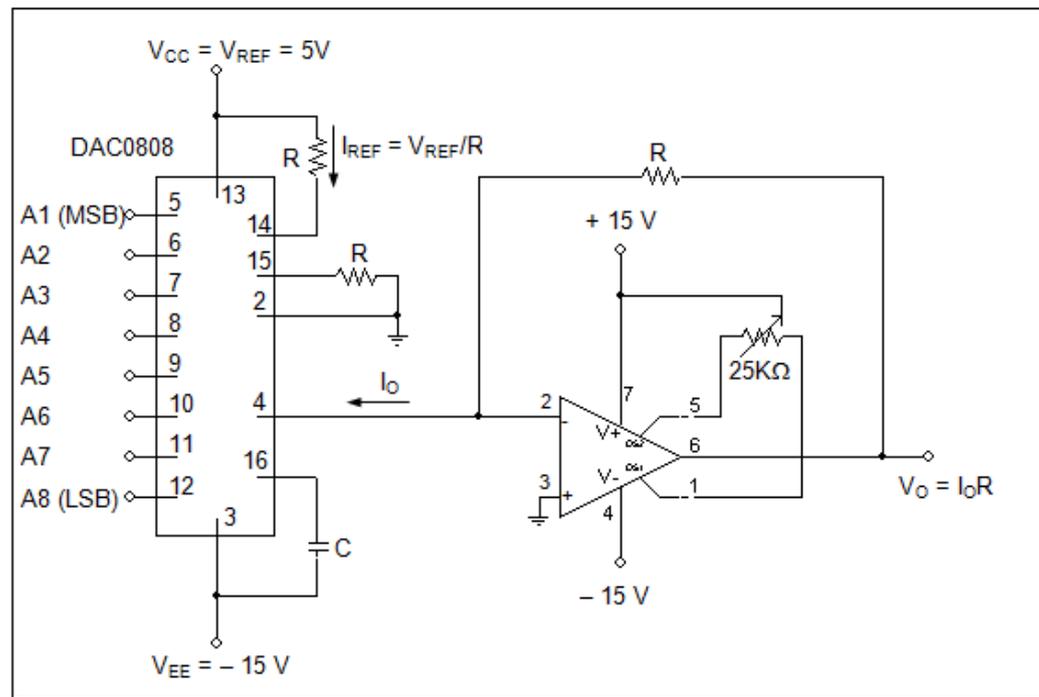


Figura 4.32: Conexión del LF356 al DAC0808 para obtener una salida de tensión de entre 0 y 5V

4.5 Construcción de un ICSP

4.5.1 Introducción

Los microcontroladores PIC se graban mediante un método llamado ICSP (*in circuit serial programming*), que 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 se utilizan 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.

4.5.2 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 4.33 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.

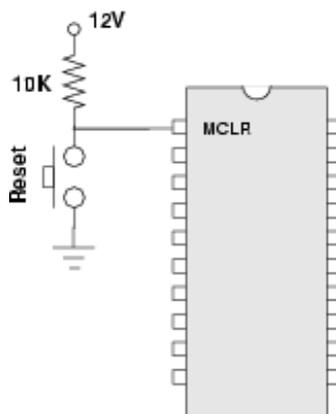


Figura 4.33: Activación de la patilla MCLR para entrar en modo monitor

4.5.3 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 4.34: Capas de los niveles físico y nivel de comandos del protocolo ICSP.

4.5.3.1 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).

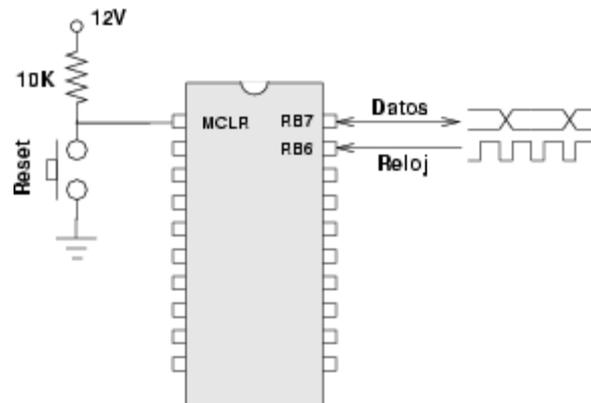


Figura 4.35: Patilla MCLR a activar y funcionamiento de las patillas RB7 Y RB6 donde se pueden observar los distintos tipos de señal que circulan por ellas.

Después de mucho buscar y experimentar con diferentes métodos de construcción de un ICSP se dio con el siguiente modelo que proporciona MICROCHIP con una herramienta.



Figura 4.36: 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

4.5.4 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
- Un convertor de voltaje de 9V a 5V
- Clavija con 5 pines
- Cristal de cuarzo de 11,50 MHz

Algunas fotos de nuestro circuito ICSP en un modelo primitivo:

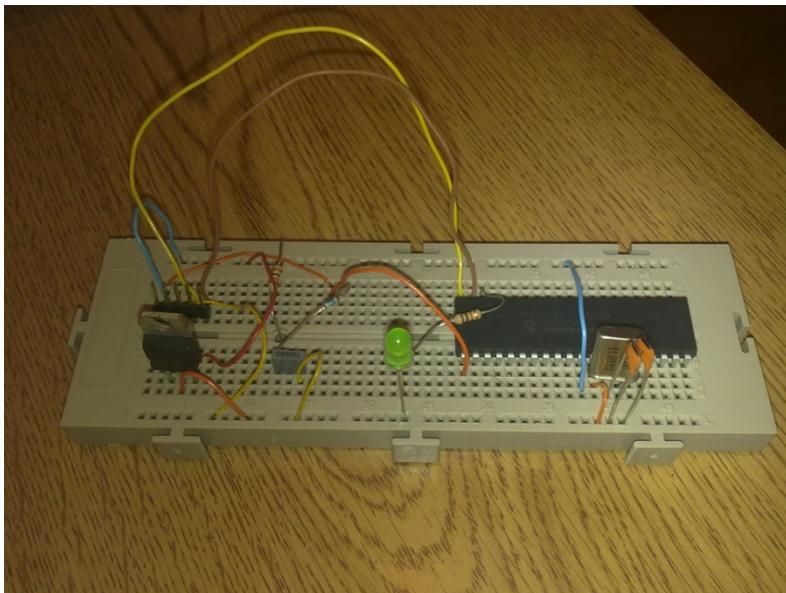


Figura 4.39: A modo de pruebas la construcción del ICSP se llevo a cabo a base de una protoboard, donde se pueden apreciar las diferentes conexiones.

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.

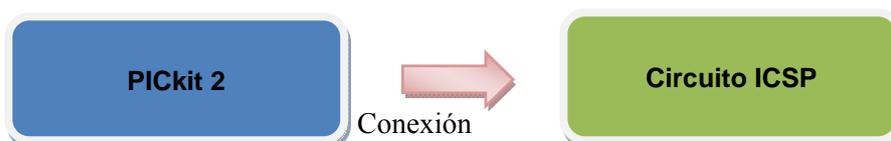


Figura 4.40: Esquema del ICSP, donde se pueden apreciar las distintas partes del mismo.

CAPÍTULO 5

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 objeto de implementación en el programa que se elabore. Posteriormente, se elaborará un diagrama de flujo, que ayudará a la implementación y finalmente se mostrará el programa de control finalmente implementado y explicado al detalle.

5.1 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 candidatas.

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.

5.2 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 le llamamos 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 el programador 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 sí 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.

5.3 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

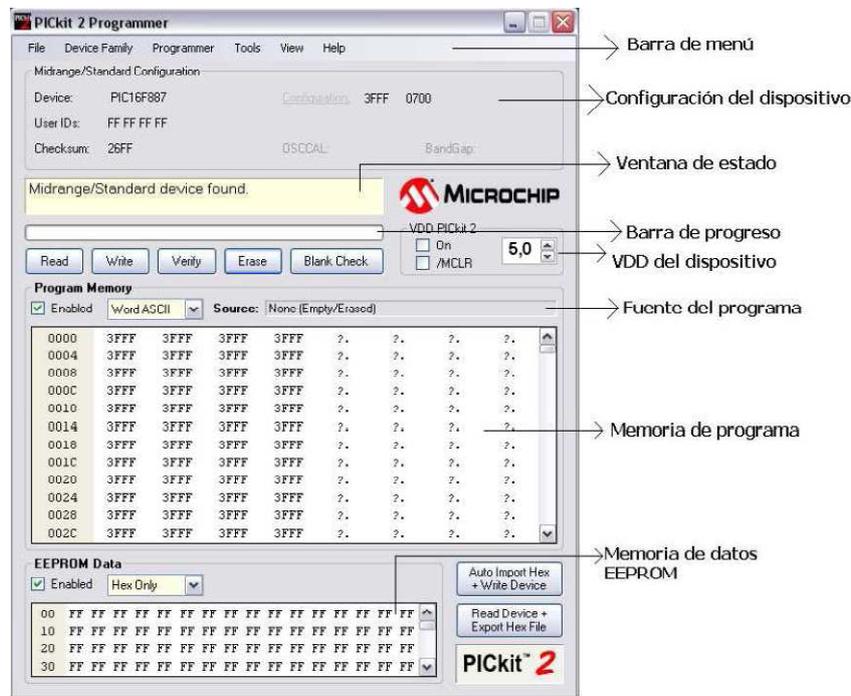


Figura 5.1: Aspecto del software PICkit2

5.4 El programa de control

A continuación se indicará el proceso de obtención de la función del PID, posteriormente se presentará el diagrama de flujo que ayudará al entendimiento del programa y por último su implementación en lenguaje de programación C adecuado al PIC.

5.4.1 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 control 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

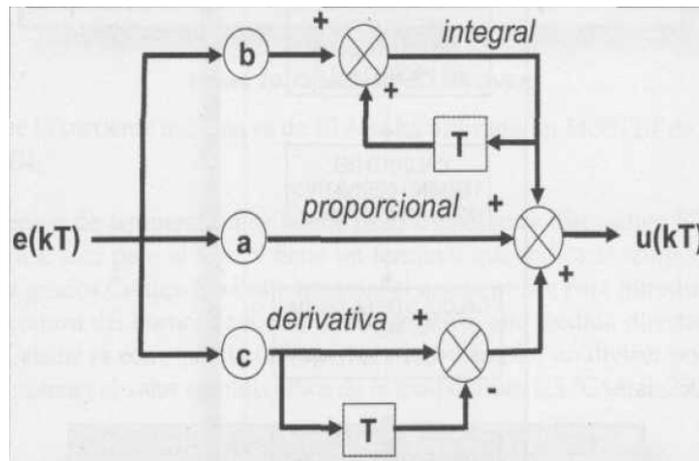


Figura 5.2: Representación del sistema en diagrama de bloques.

5.4.2 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.

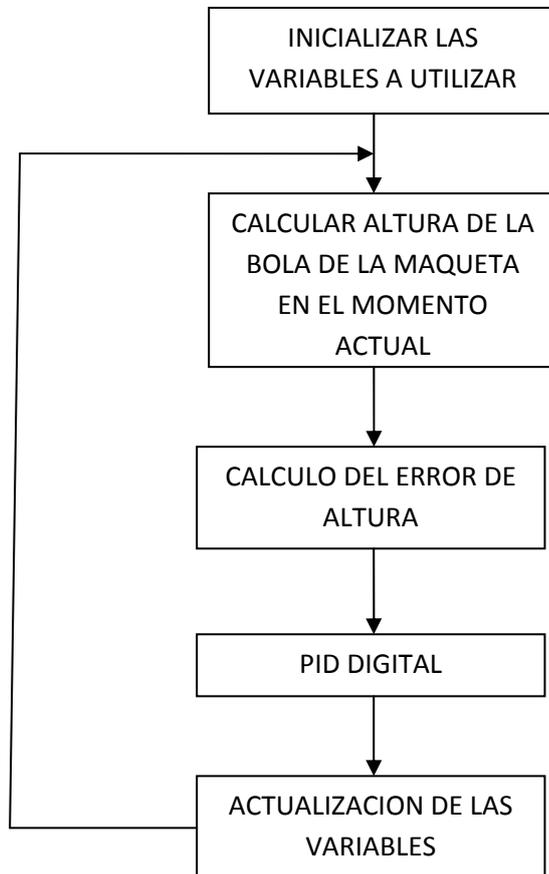


Figura 5.3: Diagrama de flujo del programa de control.

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 sigue con la implementación, de la expresión del PID digital, actuando la salida de éste 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 y determinándose una vez que se tienen actualizados los valores de las distintas variables que forman parte de la expresión del PID, el valor de salida correspondiente.

5.4.3 Implementación.

Se va a presentar la implementación del programa de control del PID que irá calculando la altura de la bola.

Primero se incluirá las librerías que serán necesarias.

```
#include"C:\Users\Daybi\proyecto_final_carrera_9-11-10\A_entregar\codigos_programacion\control_PID.h"  
  
#include "Math.h"  
  
#include <stdio.h>  
  
#include <stdlib.h>
```

En segundo lugar se declaran las variables que vamos 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.

```
short signo;  
  
long int aux,aux2,aux3,aux4=0;  
  
long int usen; //Dónde vamos aguardar lo recibido por el ADC  
  
float uref=2.5; //Altura deseada por el usuario  
  
float ek;  
  
float uk;  
  
float uk_1=0; //Se guardará el valor de tensión anterior , necesaria para la ecuación del PID.  
  
float ek_1=0;  
  
float ek_2=0;  
  
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 tenemos el método principal o método main () dónde irá la ecuación del PID:

```
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);

//-----
```

En cuarto lugar se tendrá que configurar los puertos de entrada y salida, al optar por un lenguaje de alto nivel, no se tendrá que acceder a ningún registro por utilizar funciones que ya se encargan de ello.

```
// 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 sólo entiende en formato digital, por lo que de alguna manera se tendrá 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 nos dé 8 bits y el otro los 4 bits restantes, sumando ambos resultados tenemos los 12 bits guardados en una variable a la que posteriormente se 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
    aux2=input_a();    //Se guarda en aux2 lo que recibimos del ADC
    aux2=aux2<<8;
    usen=aux+aux2;     // Se suman ambos valores para tener el resultado
                    // convertido a digital (12 bits)
    usenf=(float)usen; //Se hace un casting a float para poder trabajar con el comodamente
    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 implementa la ecuación del PID. A continuación se actualizan los errores, el error dos veces anterior pasará a ser el anterior y el anterior pasará a ser el actual, de tal manera que se encuentren perfectamente actualizados para la siguiente iteración del bucle while.

```
ek= usenf-uref;    //Se calcula el error de posición de la bola

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
```

Aunque no es estrictamente necesario para hacer el sistema lo más fiable posible, se deberá tener en cuenta los valores de tensión de salida. Los valores de tensión deben estar siempre comprendidos entre 0 y 5 V y al trabajar en lógica positiva, deben ser valores mayores que 0 ya que aunque la tensión a sacar real siempre será lógicamente mayor que cero, se habrá de tener en cuenta para la próxima iteración en la implementación de la ecuación del PID si el valor de la salida anterior es positivo o negativo.

```
// Por precaución el voltaje de salida no puede ser mayor que 5 V así que

// lo tenemos en cuenta

if(uk>5){

    uk=5;uk_1=uk;

}else{

    uk_1=uk;

}

//De la misma manera el voltaje de salida no puede ser menor que 0 al estar en

//lógica positiva

if(uk<0){ signo=1;}

else{

    signo=0;

}

if(signo==1){    //La tensión es negativa

    uk_1=-uk;

    uk=abs(uk); //Ponemos la salida a positivo

}

else{

    uk_1=uk;

}
```

Por último una vez calculado el valor de la altura de la bola se debe sacar ese valor por la salida del PIC que estará conectado al DAC, para ello hay que dividir el resultado por una constante, al igual que antes se había multiplicado por esa misma constante para trabajar en la escala de los 5V. En caso de que el valor de salida sea mayor a 12 bits se satura con el valor máximo que es de 4095. Restará ya separar en dos variables los 12 bits y mostrar los valores de cada una de estas variables en los correspondientes puertos de salida. Se ha realizado una operación “AND” con el valor decimal 4080 que permite obtener en la variable “aux4” los 8 bits más significativos que serán trasladados al DAC a través de la puerta D y, una operación “AND” con el valor decimal 15, para obtener en “aux3” los cuatro menos significativos que serán trasladados al DAC a través de las cuatro líneas de menos peso del puerto C (puerto C0 a puerto C3).

```

uk=uk/0.00122; //Al igual que antes multiplicamos la entrada por la
                // constante a la salida dividimos por esa misma
                // constante para tener el valor de salida controlado
                // entre 0 y 5 V

if(uk>4095) uk=4095; //Si fuera mayor a 4095

uk=ceil(uk);
aux3=(long)uk;

                // Operacion and para sacar los 8 MSB
aux4=aux3&4080; // 4080= b'0000111111110000';

output_c(aux3&15); // Se sacan los 4 LSB
output_d(aux4>>4); // Se sacan los 8 MSB

                //Se muestra en la salida los 12 bits que trasladamos a
                // la entrada del DAC a traves de las puertas C y D
    } // Fin while
} // Fin main

```

CAPÍTULO 6

PRESUPUESTO Y PLANIFICACIÓN PARA EL DESARROLLO COMERCIAL

En este capítulo se tratará en un primer lugar de dar un presupuesto de los materiales utilizados en la implementación del ICSP y de la fuente de intensidad, 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.

6.1 Presupuesto.

A continuación se muestra el coste de la fuente de alimentación, del ICSP y de la placa de control de la maqueta. 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.

El presupuesto de la fuente de alimentación es el siguiente:

PRESUPUESTO FUENTE DE ALIMENTACIÓN

REFERENCIA	PRECIO/UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
Amplificador Operacional LM675	6.74	1	6.74
Condensador electrolítico 0.1 μ F	0.15	2	0.30
Resistencia 20 K Ω	0.10	2	0.20
Resistencia 1 K Ω	0.10	2	0.20
Protoboard	9.50	1	9.50

TOTAL PRESUPUESTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

16.94 €

IVA 18 %

3.04 €

TOTAL PRESUPUESTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN FINAL

19.98 €

El presupuesto de la placa de control es el siguiente:

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 18 %

7.40 €

TOTAL PRESUPUESTO DE LA PLACA DE CONTROL FINAL

48.52 €

El presupuesto del programador ICSP es el siguiente:

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 18 %

3.88 €

TOTAL PRESUPUESTO DEL PROGRAMADOR ICSP FINAL

25.47 €

A modo de resumen, una vez calculados los presupuestos de la placa de control, del programador ICSP y de la fuente de alimentación se procede al presupuesto total de la revisión del proyecto:

PRESUPUESTO DE LA REVISIÓN DEL PROYECTO

REFERENCIA	PRECIO TOTAL
Total presupuesto Placa de control	48.52
Total presupuesto Programador ICSP	25.47
Total presupuesto Fuente de alimentación	19.98

TOTAL PRESUPUESTO DE LA REVISION DEL PROYECTO FINAL

93.97 €

6.2 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.

6.2.1 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.

Una tarea inicial con dos subtareas para familiarizarse con el proyecto que se pretende desarrollar. En esta fase se leerá la propuesta de un proyecto anterior y se buscaran nuevos objetivos para desarrollar el nuevo proyecto:

+ Fase Inicial	20h*
Leer el proyecto	18h
Búsqueda de objetivos	2h

(*)Los tiempos son estimados

Una vez los objetivos han sido encontrados, el director de proyecto y el autor del mismo deberán planificar como abordar el proyecto. Esta tarea es una de las más importantes para el éxito del proyecto, puesto que una buena planificación será un seguro de éxito:

Planificación del proyecto	4h
-----------------------------------	-----------

Una búsqueda de documentación por diferentes medios, tanto internet como en libros de bibliotecas o libros electrónicos:

+Búsqueda de documentación	50h
Estado del arte de la levitación...	12h
Electroimanes	6h
Sensores	3h
Arquitectura hardware	19h
Arquitectura software	10h

Una vez recopilada toda la información necesaria se procede a la búsqueda y posterior compra de los materiales:

Recopilación de información	2h
Búsqueda de materiales	1h
Compra de materiales	1h

La duración de esta tarea es de 0h al ser un hito, una tarea especial la cual hasta que no se cumpla, el proyecto no puede avanzar:

❖ Recibir materiales	0h
-----------------------------	-----------

Se buscará el software para la simulación, programación y posterior compilado y grabación del código en el PIC, pero primero el autor del proyecto deberá familiarizarse con el entorno del software que utilizará:

Búsqueda del software necesario	4h
Familiarizarse con el software a utilizar	4h

A continuación y una vez adquiridos los materiales se procede a la construcción del programador ICSP:

+Construcción del ICSP	23h
Búsqueda de diseños	4h
Diseño del circuito final	5h
Montaje del circuito	6h
Pruebas con el ICSP	6h
Verificar el ICSP	2h

De la misma forma se procede al diseño de la fuente de intensidad:

+Diseño de la fuente de intensidad	13h
Búsqueda de diseños	7h
Diseño del circuito final	6h

De la misma forma la construcción de la placa de control:

+Construcción placa de control	14h
Diseño del circuito	6h
Montaje del circuito	8h

Ahora aparece una de las partes más importantes del proyecto, redactar la memoria que conlleva un gran peso del desarrollo del mismo:

+Redactar memoria	85h
Capítulo 1	4h
Capítulo 2	28h
Capítulo 3	11h
Capítulo 4	19h
Capítulo 5	10h
Capítulo 6	11h
Índice	2h

La programación del PIC para la posterior grabación del código fuente en el mismo:

+Programación del PIC	33h
Escritura del código fuente	7h
Compilación del código	2h

Una serie de reuniones periódicas cada dos semanas aproximadamente entre el director de proyecto y autor para ir siguiendo el buen desarrollo del mismo:

+Reuniones periódicas	24h
Reuniones periódicas 1	2h
Reuniones periódicas 2	2h
Reuniones periódicas 3	2h
Reuniones periódicas 4	2h
Reuniones periódicas 5	2h
Reuniones periódicas 6	2h
Reuniones periódicas 7	2h
Reuniones periódicas 8	2h
Reuniones periódicas 9	2h
Reuniones periódicas 10	2h
Reuniones periódicas 11	2h
Reuniones periódicas 12	2h
Reuniones periódicas 13	2h
Reuniones periódicas 14	2h
Reuniones periódicas 15	2h
Reuniones periódicas 16	2h
Reuniones periódicas 17	2h
Reuniones periódicas 18	2h
Reuniones periódicas 19	2h
Reuniones periódicas 20	2h

6.2.2 Uso de recursos.

De 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 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 €
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 €

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 €

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 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 Ingeniero técnico en 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. 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.

7.2 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.

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:

Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones. Segunda parte: PIC 16F87X”, J.Mª. Angulo, Susana Romero e Ignacio Angulo, Editorial Mc Graw Hill, 2000.

“Máquinas Eléctricas”, Jesús Fraile Mora, Editorial Mc Graw Hill, 2008.

“Ingeniería de Control Moderna”, Katsuhiko Ogata, Editorial Prentice Hall, 2006.

“Tratamiento digital de señales. Principios, algoritmos y aplicaciones”, John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis, Editorial Prentice Hall, 2003.

FRIES, Bruce y FRIES, Marty. *Audio digital práctico*. Ed. Anaya Multimedia. 2005. ISBN 84-415-1892-0

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 convertor 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/