

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



GEÓFONO DIGITAL BASADO EN ACELERÓMETROS CAPACITIVOS

Trabajo Especial de Grado presentado por
Claudia José Sánchez Quintero
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: Licenciada en Física
Con la tutoría de: Msc. Levi García.
Dr. Gerardo Jaimes

Octubre - 2015
Caracas - Venezuela.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



GEÓFONO DIGITAL BASADO EN ACELERÓMETROS CAPACITIVOS

Trabajo Especial de Grado presentado por
Claudia José Sánchez Quintero
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: Licenciada en Física
Con la tutoría de: Msc. Levi García.
Dr. Gerardo Jaimes

Octubre - 2015
Caracas - Venezuela.



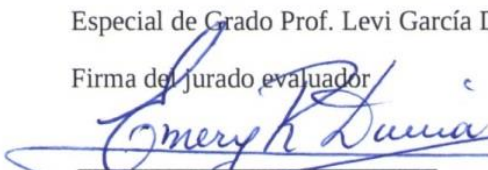
VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por **Claudia José Sánchez Quintero**, Cédula de Identidad **V-20794911**, bajo el título **“Geófono Digital Basado en Acelerómetros Capacitivos”**, a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de **Licenciada en Física**, dejan constancia de lo siguiente:


1. Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del Jurado, éste fijó el día 22 de octubre de 2015, a las 10:00 am, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la Sala de Seminarios Guillermo Ruggeri de la Escuela de Física, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado; todo ello conforme a los artículos 20, 21, 22, 25, 26 y 28 de la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente.
2. Finalizada la defensa pública del trabajo, el jurado decidió declararlo aprobado por considerar que se ajusta a lo dispuesto y exigido en la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente en sus artículos 1, 5 y 6.

Se levanta la presente acta a los 22 días del mes de octubre de 2015, dejándose también constancia de que, conforme a la normativa jurídica vigente, actuó como coordinador del jurado el tutor del Trabajo Especial de Grado Prof. Levi García Domínguez.

Firma del jurado evaluador


Prof. Emery Richard Dunia
Amair
V-3184527
UCV




Prof. Levi García Domínguez
V-81093009
UCV


Prof. José Gregorio Jorge
Alvarez
V-6165560
UCV

A mis Padres, todo esto ha sido por ustedes.

*“El tamaño de tu éxito será del tamaño de tu esfuerzo”
Francisco de Miranda*

Agradecimientos

Agradezco al profesor Levi García, por su paciencia infinita, su sabiduría y porque más que tutor, ha sido mi amigo.

A mis padres, por su apoyo incondicional, por ser mi luz en la oscuridad.

A mi hermana Tania Villar, por ser mi soporte, consejera y guía, por estar en las malas y en las peores.

A mis amigos, quienes han estado ahí cuando más los necesito y me han ayudado a ser mejor persona.

Gracias infinitas a ti, Josh, que has sabido escuchar y soportar.

Agradezco a Dios, por darme la fuerza para levantarme una y otra vez.

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito el diseño de un geófono digital que emplee acelerómetros capacitivos como elementos sensores. Este proyecto toma como iniciativa la necesidad de desarrollar dicho dispositivo con componentes electrónicos presentes en el mercado nacional. El sistema digital diseñado está basado en el microcontrolador PIC18F4550, el cual permite la comunicación con el computador vía USB, a través de la implementación de un puerto serial virtual. Además, dispone del integrado ADXL335, un acelerómetro capacitivo capaz de medir las aceleraciones, dinámicas y estáticas, de tres ejes ortogonales en un rango de $\pm 3g$. Las señales que proporciona dicho integrado, son digitalizadas utilizando el conversor análogo-digital interno del microcontrolador, los datos obtenidos pueden ser almacenados en una memoria microSD respetando el sistema de archivos FAT16. Para el etiquetado temporal de los datos se utilizó un reloj de tiempo real DS1302.

Índice de Contenido

Índice de Figuras	15
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO 1	17
ESTUDIO DE SUELOS.....	17
1.1. Método Sísmico.....	17
1.1.1. Método Sísmico de Reflexión.....	18
1.1.1. Método Sísmico de Refracción.....	18
1.2. Ondas Sísmicas	19
1.3. Geófonos	21
1.3.1. Electromagnéticos.....	22
1.3.1. Capacitivos	23
1.3.2. Piezoeléctricos.....	23
1.4. Acelerómetros.....	23
CAPÍTULO 2	25
DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.....	25
2.1. Microcontrolador PIC18F4550	25
2.1.1. Convertor Análogo-Digital	27
2.1.2. Módulo MSSP	29
2.1.1. Universal Serial Bus	30
2.2. Reloj de Tiempo Real DS1302	34
2.3. Memoria SD.....	37
2.3.1. Protocolo de comunicación SPI.....	38
2.3.2. Protocolo SPI en el PIC18F4550	39
2.3.3. Protocolo SPI en la Memoria SD.....	41
2.3.4. Comunicación entre el Microcontrolador y la Memoria SD	45
2.3.5. Sistemas de Archivos FAT.....	46
2.4. Acelerómetro ADXL335.....	47
CAPÍTULO 3	51
DISEÑO DEL HARDWARE	51

3.1.	Regulador discreto de 3V	51
3.2.	Reloj de Tiempo Real DS1302.....	53
3.3.	Memoria microSD.....	53
3.4.	Acelerómetro ADXL335	54
3.5.	Circuito Impreso	54
CAPÍTULO 4.....		57
DISEÑO DEL SOFTWARE		57
4.1.	Software del Computador	57
4.2.	Archivos Contenedores	61
4.3.	Firmware del Microcontrolador	62
4.3.1.	Configuración del USB	63
4.3.1.	Configuración del Módulo de Conversión.....	63
4.3.2.	Configuración del RTC	64
4.3.3.	Configuración de la Memoria microSD	64
CAPÍTULO 5.....		67
RESULTADOS		67
CONCLUSIONES		71
RECOMENDACIONES		72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		73
TRABAJOS CITADOS.....		73
APÉNDICES.....		76

Índice de Figuras

Figura 1: Método Sísmico	17
Figura 2: Método Sísmico de Reflexión.....	19
Figura 3: Método Sísmico de Refracción	19
Figura 4: Onda Sísmica tipo P [5]	20
Figura 5: Onda Sísmica tipo S [5]	20
Figura 6: Ondas Sísmicas tipo Love y Rayleigh [5].....	21
Figura 7: Geófono GS – 11D [8].....	22
Figura 8: Geófono Electromagnético	22
Figura 9: Geófono Capacitivo	23
Figura 10: Geófono Piezoeléctrico	24
Figura 11: Acelerómetro Capacitivo [9].....	24
Figura 12: PIC18F4550 [10].....	25
Figura 13: Diagrama de bloques del PIC18F4550 [10].....	26
Figura 14: Justificación del Resultado de la Conversión [10].....	28
Figura 15: Diagrama de Bloques del Conversor Análogo-Digital [10]	28
Figura 16: Diagrama del Módulo MSSP para el protocolo SPI [10].....	30
Figura 17: Módulo del USB [10].....	31
Figura 18: Pines del USB [10].....	31
Figura 19: RTC DS1302 [15].....	34
Figura 20: Formato de Comando para el RTC [15].....	35
Figura 21: Operación de Lectura y Escritura [16]	35
Figura 22: Registros de Configuración [15].....	36
Figura 23: Configuración del Registro Trickle-Charge [15]	36
Figura 24: Memoria SD [8]	37
Figura 25: Diferentes Presentaciones de las Memorias SD [17].....	37
Figura 26: Memorias SD, SDHC y SDXC [18]	38
Figura 27: Protocolo de comunicación SPI	39
Figura 28: Protocolo SPI en el PIC18F4550 [10].....	39
Figura 29: Pulsos de Reloj en Modo SPI [10].....	40

Figura 30: Memoria SD [8].....	41
Figura 31: Estructura de los Comandos [18].....	42
Figura 32: Formato de la Respuesta R1 [8].....	42
Figura 33: Estructura del CMD0 [18]	43
Figura 34: Operación de Lectura en las Memorias SD	43
Figura 35: Formato de “Data Error Token” [18].....	44
Figura 36: Operación de Escritura en la Memoria SD	44
Figura 37: Formato de “Data Response Token” [18].....	45
Figura 38: Comunicación PIC-Memoria SD [19].....	46
Figura 39: Sensor del Integrado ADXL335 [22]	48
Figura 40: Circuito del Acelerómetro ADXL335 [22].....	48
Figura 41: Aceleración en los ejes X e Y [22]	49
Figura 42: Aceleración en el eje Z [22].....	50
Figura 43: Diagrama del Sistema	52
Figura 44: Regulador Discreto de 3V	52
Figura 45: Conexión del RTC	53
Figura 46: Conexión de la microSD.....	54
Figura 47: Conexión ADXL335.....	55
Figura 48: Cara de Serigrafía	56
Figura 49: Cara de Soldadura.....	56
Figura 50: Menú de la Interfaz Gráfica.....	57
Figura 51: Ventana RTC	58
Figura 52: Ventana del Sector.....	59
Figura 53: Señales del ADXL335	60
Figura 54: Señales del ADXL335 (2)	60
Figura 55: Estructura de Archivos Contenedores	61
Figura 56: Archivo CONTENTS.TXT.....	62
Figura 57: Archivo Contenedor.....	62
Figura 58: Tarjeta de Desarrollo	67
Figura 59: Tarjeta de Desarrollo (2).....	68
Figura 60: Tiempo de Escritura en la microSD.....	69

Figura 61: Tiempo de Escritura en la microSD (2)	69
Figura 62: Manual Memoria SD [23].....	76
Figura 63: Manual PIC18F4550 [10]	77
Figura 64: Manual DS1302 [15].....	78
Figura 65: Manual ADXL335 [22].....	79

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se concibe como una primera fase de un proyecto de desarrollo de un geófono digital basado en el uso de acelerómetros capacitivos.

Este proyecto surge como una necesidad de la industria petrolera PDVSA, la cual, a través de la Gerencia de Geofísica de Oriente, solicitó el estudio de factibilidad del desarrollo de estos dispositivos con componentes electrónicos presentes en el mercado nacional.

Como antecedentes a este proyecto se tiene el trabajo [1], en el cual se estudia a profundidad la estructura y el comportamiento del acelerómetro capacitivo ADXL330 y se interpretan las señales provenientes de este. También se tiene [2], en el cual se desarrolla una interfaz gráfica que se comunica con la unidad sísmica SR04 y los datos provenientes de esta son almacenados en una memoria SD.

Para este fin se diseñó un sistema digital basado en el microcontrolador PIC18F4550, el cual permite la implementación de un puerto serial virtual sobre una conexión USB. Se utilizó un acelerómetro de tipo capacitivo ADXL335, que permite registrar la aceleración de tres ejes ortogonales. Este dispositivo puede medir aceleraciones estáticas y dinámicas, en un rango de $\pm 3g$. Para la digitalización de las señales, provenientes del acelerómetro, se emplea el conversor análogo-digital, incorporado en el PIC, el cual tiene una resolución de 10 bits. Los datos obtenidos al ser enviados a través del USB, pueden visualizarse en el computador en tiempo real, con una tasa máxima de 200 muestras por segundo, entendiéndose como muestra los valores de la aceleración de los tres ejes. Los datos también pueden ser almacenados en una memoria microSD, utilizando archivos previamente creados, respetando el sistema de archivos FAT16. Se podrían guardar en la microSD, en promedio, hasta 380 muestras por segundo, pero de manera pulsada, debido al tiempo de escritura en la memoria.

A este sistema digital, se le incorporó un reloj de tiempo real DS1302 para marcar temporalmente los datos adquiridos. Este dispositivo utiliza un protocolo de comunicación de 3 hilos, para el cual no existe soporte en el hardware del microcontrolador, razón por la cual se implementó el protocolo a nivel de software, es decir, se desarrolló una librería, denominada DS1302.h/c, que tiene las funciones de configuración, lectura y escritura del reloj de tiempo real. El tiempo en el cual se toman los datos, es almacenado dentro de un archivo destinado para este fin; de manera tal, que se puede conocer el momento en que inicio la captura de las señales y el instante en el que finalizó.

Para el manejo del USB se utilizó la librería MCHPUSB, para el acceso a la tarjeta microSD, se emplean las funciones del archivo SD-SPI.h, de la librería MDD File System y para el uso del conversor análogo-digital se utiliza el archivo ADC.h, perteneciente a la librería común del compilador MPLAB C18. Tanto el compilador, como las librerías son

desarrollados por Microchip. Adicionalmente, se desarrollaron dos librería más, una complementaria para el manejo del conversor y la otra relacionada con el acceso a la microSD.

El software para el computador, desarrollado en Visual BASIC, cuenta con tres gráficas (una para cada eje), donde se visualizan los datos provenientes del acelerómetro. También, dispone de una función que permite leer cualquier sector de la memoria microSD y otra para tener acceso al reloj de tiempo real DS1302.

El desarrollo de este proyecto será presentado en cinco capítulos. El primer capítulo, contiene conceptos fundamentales de geofísica, tales como: el estudio de los suelos, el método sísmico, los tipos de ondas sísmicas y los sensores que se utilizan para el estudio de estas ondas. El segundo capítulo explica en detalle los dispositivos electrónicos que se emplearon para la construcción del sistema digital: el microcontrolador PIC18F4550, el acelerómetro ADXL335, la memoria SD y el reloj de tiempo real DS1302. El tercer capítulo trata sobre el diseño del hardware. En el cuarto capítulo se explica el diseño del software, las librerías implementadas para el funcionamiento del sistema y la interfaz gráfica creada. Finalmente, en el capítulo cinco se muestran los resultados obtenidos.

Los objetivos de este trabajo son:

Objetivo General

Diseñar un geófono digital que utilice acelerómetros capacitivos como elementos sensores.

Objetivos Específicos

1. Construir un sistema digital basado en el microcontrolador PIC18F4550 para experimentación en el laboratorio.
2. Emplear el integrado ADXL335 para la detección de la aceleración en tres ejes ortogonales.
3. Utilizar una memoria microSD para almacenar la información, empleando el módulo MSSP del microcontrolador, con el protocolo de comunicación SPI.
4. Incorporar un reloj de tiempo real DS1302 e implementar, a nivel de software, el protocolo de comunicación de tres hilos que este utiliza.
5. Implementar comunicación vía USB entre la tarjeta de desarrollo y el computador.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO DE SUELOS

El estudio de los suelos se realiza para obtener información confiable sobre un área específica. Son diversas las metodologías que se emplean para esto, desde el estudio geológico de las formaciones rocosas, hasta la observación indirecta; en la cual se emplean instrumentos y técnicas de exploración para lograr hacer mapas del subsuelo. Estos mapas son importantes porque muestran la geometría y posición de una capa de roca en el subsuelo y es posible realizarlos empleando el método sísmico. [3]

1.1. Método Sísmico

El método sísmico se basa en observar el tiempo de propagación de las ondas sísmicas en el suelo. Estas ondas no son más que ondas elásticas, que se propagan por el medio sin deformarlo permanentemente. En este método existen dos variantes, el método sísmico de reflexión y el método sísmico de refracción; los cuales se rigen por el principio de Huygens y por la Ley de Snell.

Independientemente de cuál método sísmico se desee usar, la técnica consiste en hacer penetrar energía al suelo, ya sea por medio de detonaciones, camiones vibradores o mediante el golpeo con martillos, lo cual genera un frente de ondas elásticas que se refractan, o se reflejan, cada vez que hay un cambio en el medio.

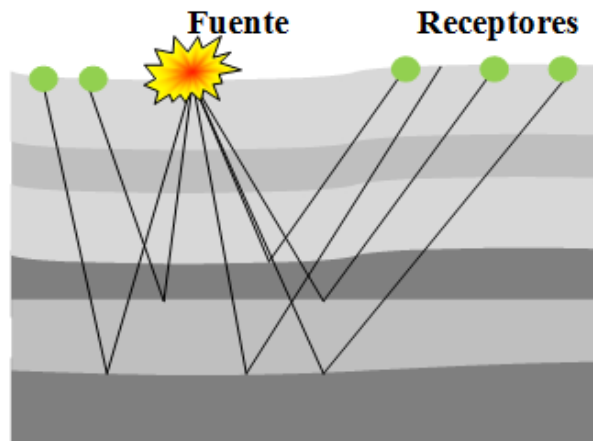


Figura 1: Método Sísmico

1.1.1. Método Sísmico de Reflexión

En este método la fuente y los sensores detectores se encuentran en la superficie o muy cerca de ella, con el método sísmico de reflexión se obtiene información sobre las principales estructuras geológicas del subsuelo; como lo son los pliegues, fallas o patrones de sedimentación. La información obtenida se revela por las ondas que se reflejan en medios con propiedades elásticas diferentes. [4]

Es posible medir el tiempo transcurrido entre el momento en el cual ocurre la detonación y la llegada de las ondas y con esto precisar tanto la posición de los estratos como su profundidad. [3]

La adquisición, el procesamiento y la interpretación de los datos son más costosos y complejos por este método; sin embargo se considera el mejor método de exploración geofísica del subsuelo. [4]

1.1.1. Método Sísmico de Refracción

En el método sísmico de refracción los sensores se encuentran en la superficie y permite determinar la geometría de los estratos rocosos en el subsuelo y las velocidades de los medios presentes e interpretar estructuras geológicas en el área de interés. [5]

La principal aplicación del método es explorar el subsuelo con fines mineros, además es un método sencillo; pues las ondas que se registran son las primeras en llegar a los detectores, así que identificarlas y medir el tiempo en el que llegan no es complicado. [4]

La diferencia entre estos métodos se debe a la geometría del tendido utilizado, la forma de adquirir los datos y el tipo de onda que es grabada. [5]

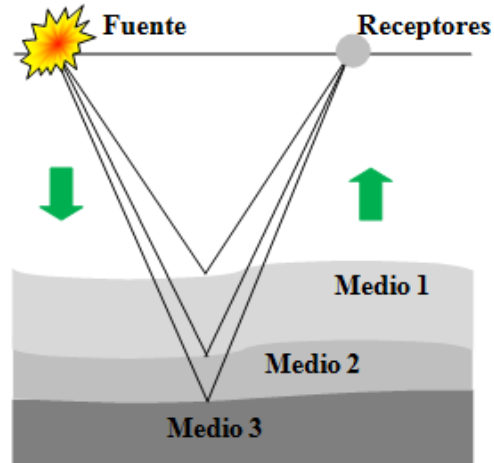


Figura 2: Método Sísmico de Reflexión

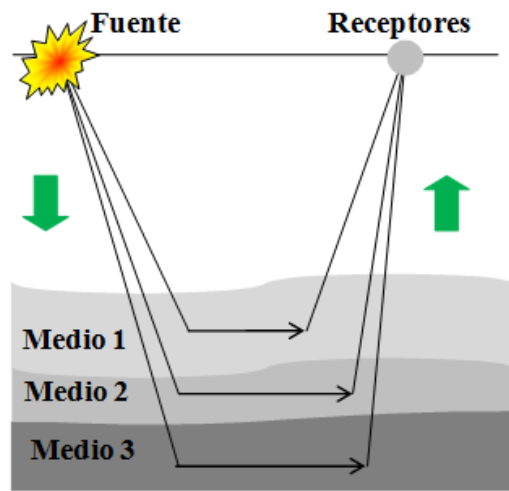


Figura 3: Método Sísmico de Refracción

1.2. Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas se dividen en ondas internas y superficiales. Entre las ondas internas se tienen las ondas P o primarias, que son de tipo compresivo; es decir que el material se comprime y se dilata en la dirección en la cual se propaga la onda, además son las más rápidas; pues viajan a una velocidad entre 4 Km/s y 7 Km/s y pueden viajar a través de cualquier material. Esta onda es similar a las ondas sonoras. [6]

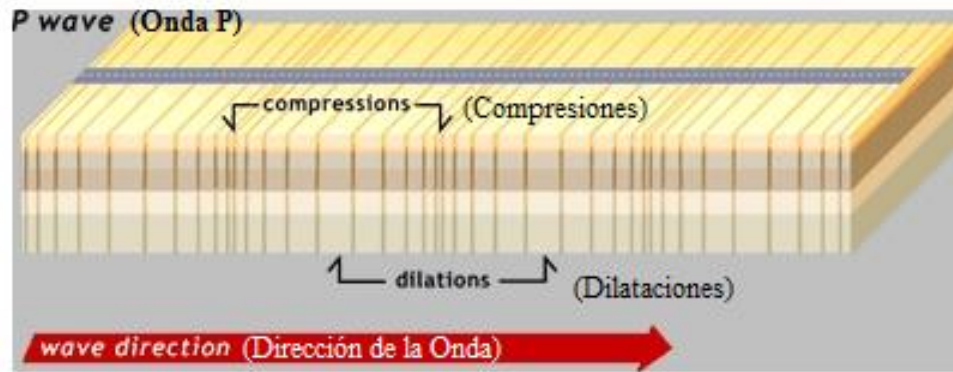


Figura 4: Onda Sísmica tipo P [7]

Las ondas S o secundarias oscilan perpendiculares a la dirección de propagación, viajan a una velocidad entre 2Km/s y 5Km/s, casi a la mitad de las primarias y sólo se desplazan en un medio sólido. Las ondas secundarias son similares a una onda que viaja a lo largo de una cuerda. [6]

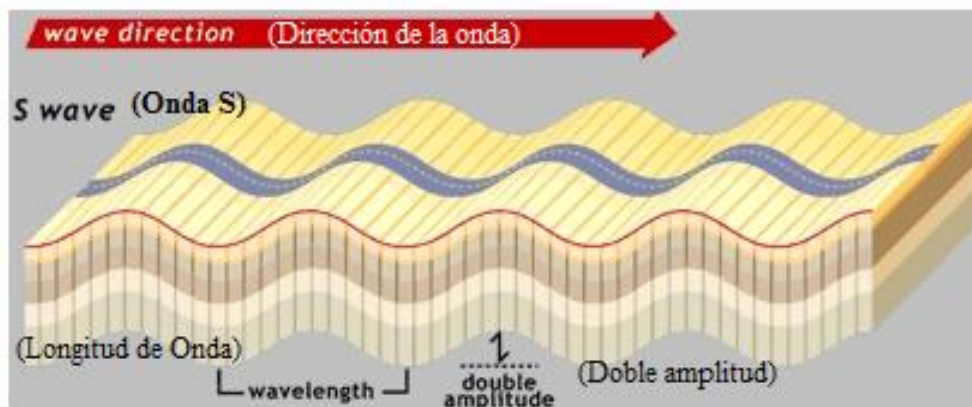


Figura 5: Onda Sísmica tipo S [7]

Cuando las ondas internas llegan a la superficie se da lugar a las ondas superficiales, las cuales se propagan por la superficie y son más lentas que las internas; pues se desplazan a una velocidad de 2Km/s y 3Km/s. Estas son ondas transversales y se dividen en Love, que provocan un movimiento horizontal perpendicular a la dirección en la que viaja la onda y para su propagación se requiere de la existencia de un medio superficial de velocidad menor en comparación a las capas subyacentes y en ondas Rayleigh que causan un movimiento circular, similar a las olas del mar, son resultado de la interferencia de las ondas primarias y

secundarias y experimentan su máxima amplitud en la superficie, la cual va decreciendo con la profundidad. [6] [8]

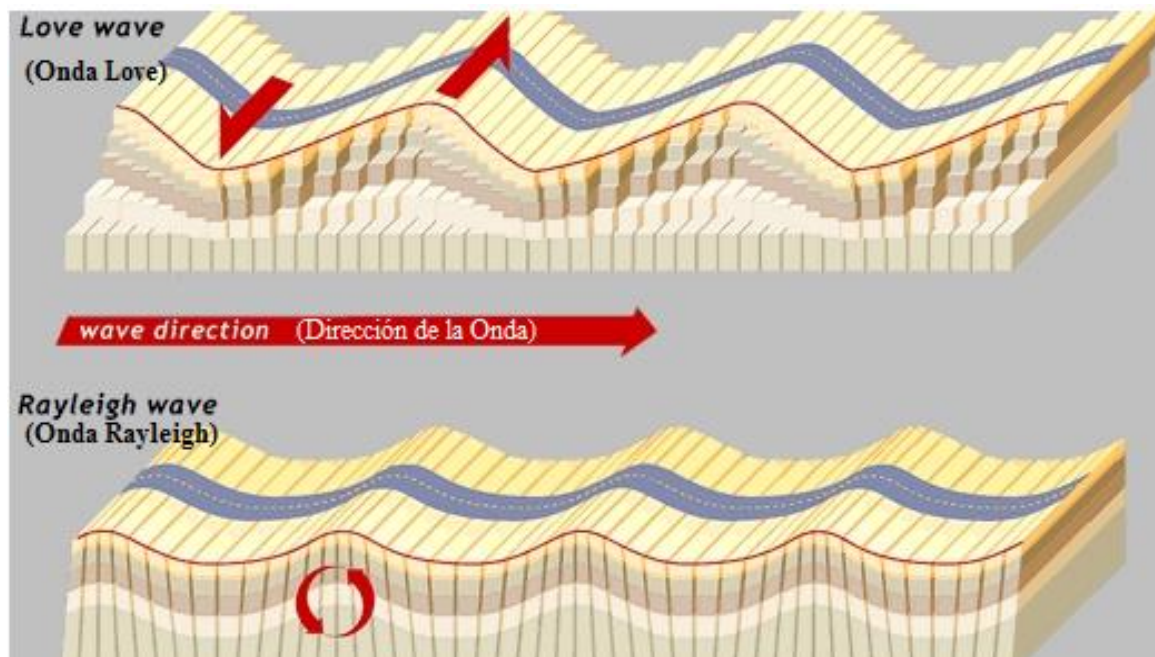


Figura 6: Ondas Sísmicas tipo Love y Rayleigh [7]

La reflexión o refracción de estas ondas es captada por medio de geófonos, los cuales están unidos entre sí mediante cables y conectados a una estación receptora; en la cual se interpreta la información recibida y mediante equipos especiales de cómputo, se dibuja el interior de la tierra. La distribución y cantidad de geófonos que se emplean en el tendido, depende del método sísmico que se escoja. [3]

1.3. Geófonos

Un geófono es un sensor que permite medir el movimiento del suelo cuando su estabilidad ha sido perturbada. Este instrumento debe suministrar una variable física relacionada con el movimiento del suelo; bien sea desplazamiento, velocidad o aceleración. [9]

Los tipos de geófonos son los siguientes:

1.3.1. Electromagnéticos

Los geófonos electromagnéticos están constituidos básicamente por una bobina y un imán permanente. La bobina, que cuelga de un resorte, rodea al imán que permanece fijo al suelo. Cuando ocurre una perturbación sísmica, el imán se mueve al compás del movimiento del suelo; mientras que la bobina permanece relativamente inmóvil. Este movimiento relativo entre la bobina y el imán ocasiona una fuerza electromotriz entre los terminales de la bobina y el voltaje medido será proporcional a la velocidad del movimiento.

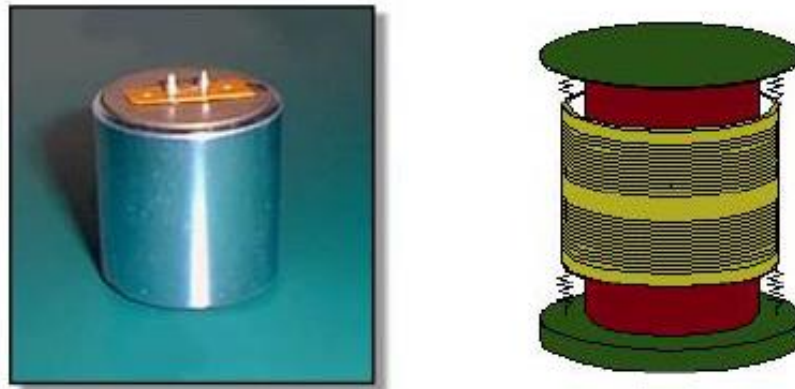


Figura 7: Geófono GS – 11D [2]

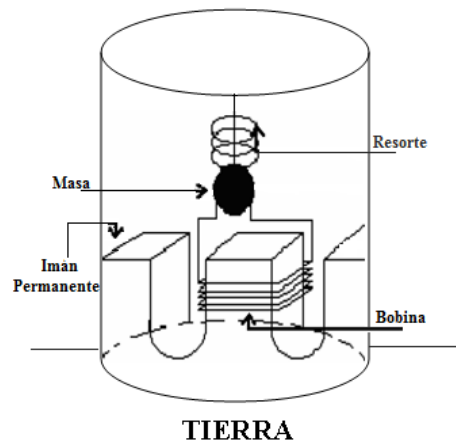


Figura 8: Geófono Electromagnético

1.3.1. Capacitivos

Los geófonos capacitivos, tienen un principio de funcionamiento que se basa en la variación de la capacidad de un condensador por modificación de la separación entre sus placas. Una de las placas se encuentra rígidamente unida al suelo, mientras que la otra está ligada a un sistema masa-resorte.

El cambio en la capacitancia altera la frecuencia de resonancia de un circuito oscilador, produciendo una salida que es proporcional al desplazamiento.

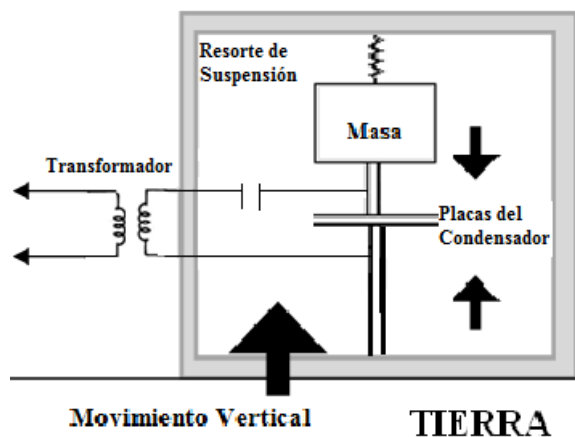


Figura 9: Geófono Capacitivo

1.3.2. Piezoeléctricos

Un geófono piezoeléctrico consta de una masa que reposa sobre un apilamiento de placas hechas de material piezoeléctrico; el cual produce una diferencia de potencial cuando es sometido a tensiones mecánicas. Así, en el instante que ocurre una aceleración en la dirección de la vertical, el peso aparente de la masa se modifica, lo que genera un cambio en la presión del material, que induce variaciones de voltajes proporcionales a dicha aceleración.

1.4. Acelerómetros

Un acelerómetro, es un sensor que entrega una señal eléctrica proporcional a la aceleración o vibración. Son empleados en diversas áreas, entre ellas la sísmica, en la cual existe una tendencia a reemplazar a los geófonos convencionales por estos dispositivos, ya que el costo de adquisición es relativamente bajo, son resistentes a grandes impactos y realizan mediciones en los tres ejes.

Por lo general, estos acelerómetros son de tipo capacitivo. Se forman dos condensadores con dos conjuntos de placas fijas y otro conjunto de placas móvil, el cual se encuentra unido a una masa. Por ende, en el instante en que se aplica una fuerza mecánica al sistema, la masa se mueve relativamente en sentido opuesto, provocando que una de las capacidades aumente y la otra disminuya. Estas variaciones de capacidad son utilizadas por un circuito eléctrico, que genera una frecuencia o voltaje proporcional a la aceleración.

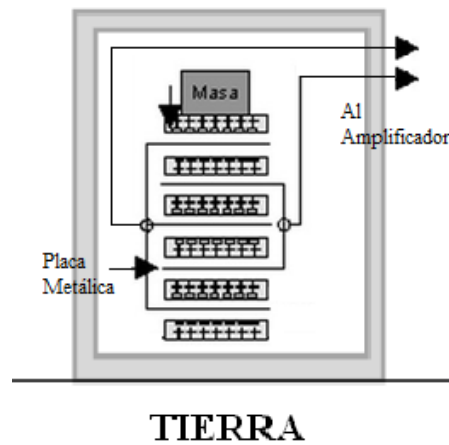


Figura 10: Geófono Piezoeléctrico

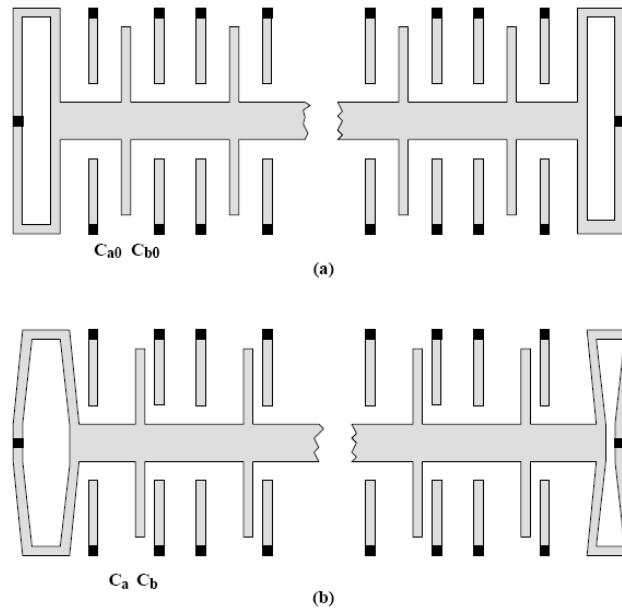


Figura 11: Acelerómetro Capacitivo [10]

CAPÍTULO 2

DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

2.1. Microcontrolador PIC18F4550

El microcontrolador PIC18F4550, opera en un rango de 2,0V a 5,5V y con una frecuencia máxima de 48MHz. Posee 40 pines, de los cuales 35 están disponibles como entradas/salidas, tiene 2048 bytes de memoria RAM y 32KB de memoria de programa, que permite albergar hasta 16384 instrucciones.

Este PIC cuenta con un conversor análogo-digital de 10 bits, 4 temporizadores, dos módulos para comparación, captura y modulación de ancho de pulso, un puerto de transmisión de datos en paralelo SPP, un módulo MSSP que permite implementar los protocolos de comunicación I²C y SPI, un puerto serial EUSART y USB 2.0.

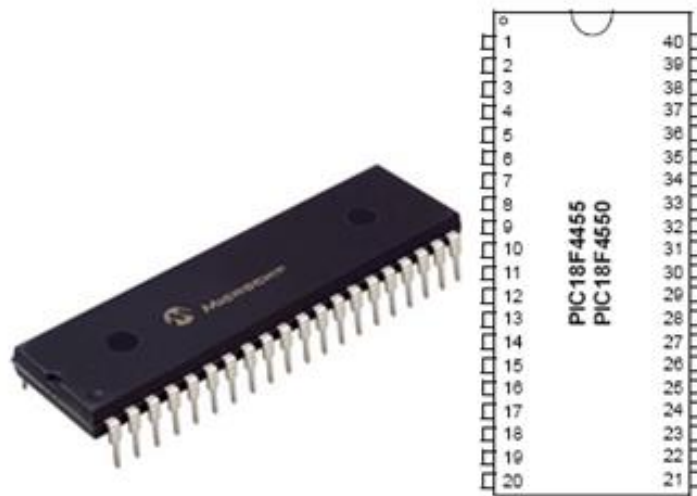


Figura 12: PIC18F4550 [11]

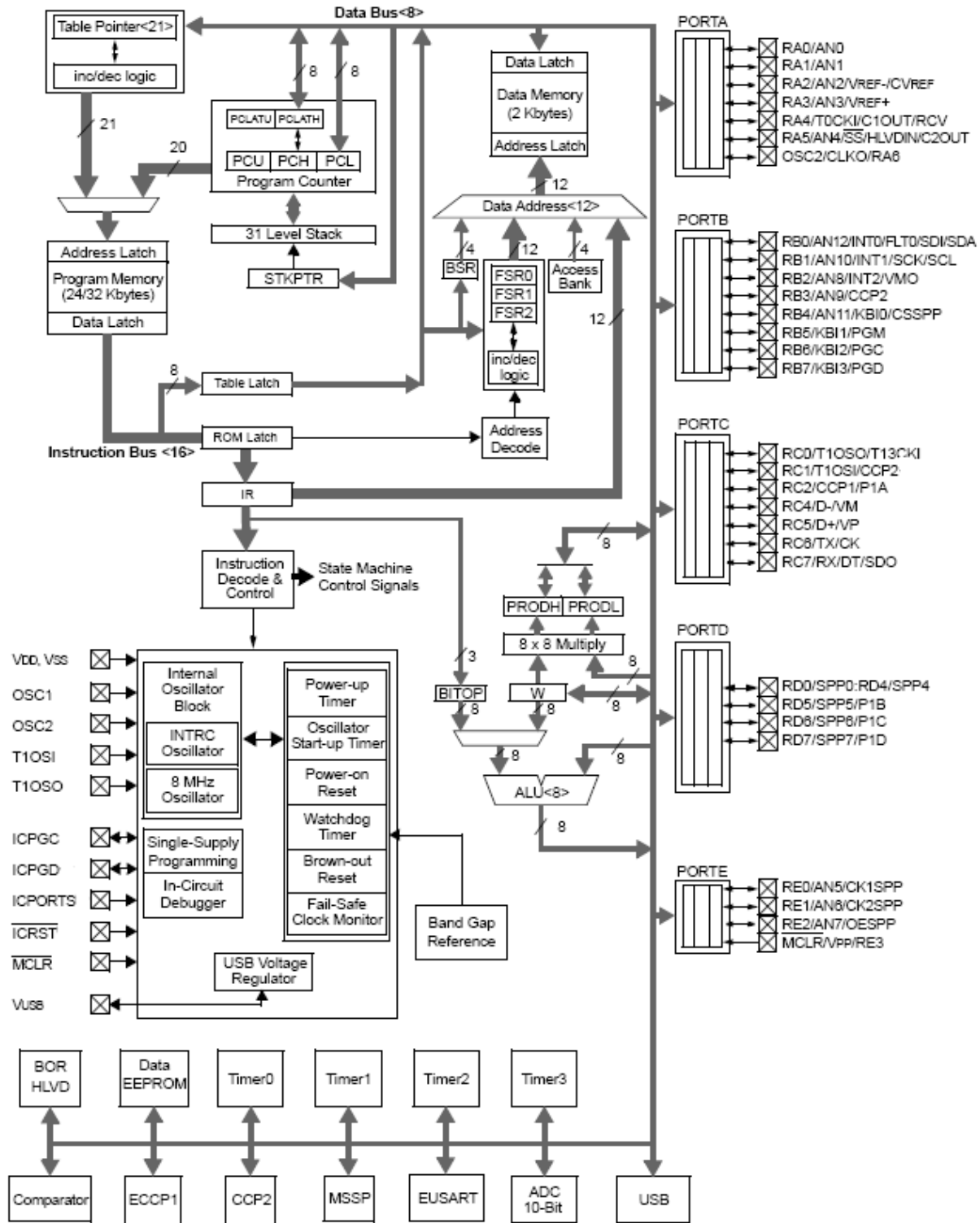


Figura 13: Diagrama de bloques del PIC18F4550 [11]

2.1.1. Conversor Análogo-Digital

El PIC posee un módulo de conversión análogo-digital, el cual permite convertir una señal analógica a digital, con una resolución de 10 bits a través de 13 canales de entrada multiplexados.

El microcontrolador, cuenta con tres registros para configurar este módulo: ADCON0, ADCON1 y ADCON2. El primero de estos registros permite seleccionar el canal con el cual se desea trabajar, habilitar o deshabilitar el módulo y un bit que indica el estado de la conversión, llamado GO/DONE, el cual permanece en uno mientras la conversión se encuentre en proceso. Una vez finalizada el bit se coloca en “0”.

En el registro ADCON1 se escogen las entradas analógicas y se configuran los voltajes de referencia; se tiene el bit VCFG0 para la positiva y el bit VCFG1 para la referencia negativa. En el último registro, el ADCON2, se elige si se quiere el resultado alineado a la izquierda o a la derecha, se selecciona el tiempo de adquisición y la frecuencia de la señal de reloj para la conversión.

Dado que la conversión no puede efectuarse inmediatamente después de activado el módulo, se requiere esperar un tiempo para cargar el condensador C_{HOLD} ; este tiempo es llamado tiempo de adquisición, T_{ACQ} , y su valor se encuentra entre 1,25 y 2,45 μ s para temperaturas entre 25°C y 85°C, es decir, que al encender el módulo o seleccionar un nuevo canal de entrada se debe esperar como mínimo este tiempo antes de iniciar la conversión.

Otro factor que se debe tener en consideración es el tiempo de conversión por bit, T_{AD} . El PIC18F4550 necesita de 11 T_{AD} para una conversión de 10 bits y existen 7 opciones: $T_{OSC}^1 \times 2$, $T_{OSC} \times 4$, $T_{OSC} \times 8$, $T_{OSC} \times 16$, $T_{OSC} \times 32$, $T_{OSC} \times 64$ y el reloj proveniente del oscilador interno RC. Para una conversión correcta el T_{AD} debe ser lo más corto posible; pero no inferior a 0,8 μ s.

Una vez terminada la conversión, el resultado se almacena en los registros ADRESH Y ADRESL, dependiendo de la justificación.

¹ Periodo de un ciclo de reloj.

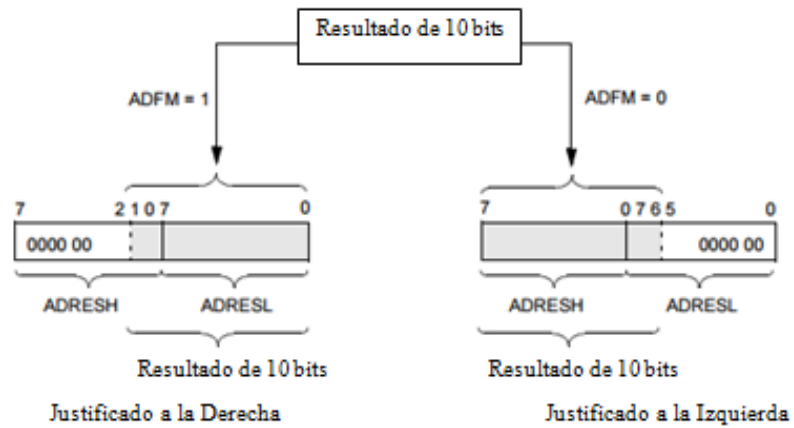


Figura 14: Justificación del Resultado de la Conversión [11]

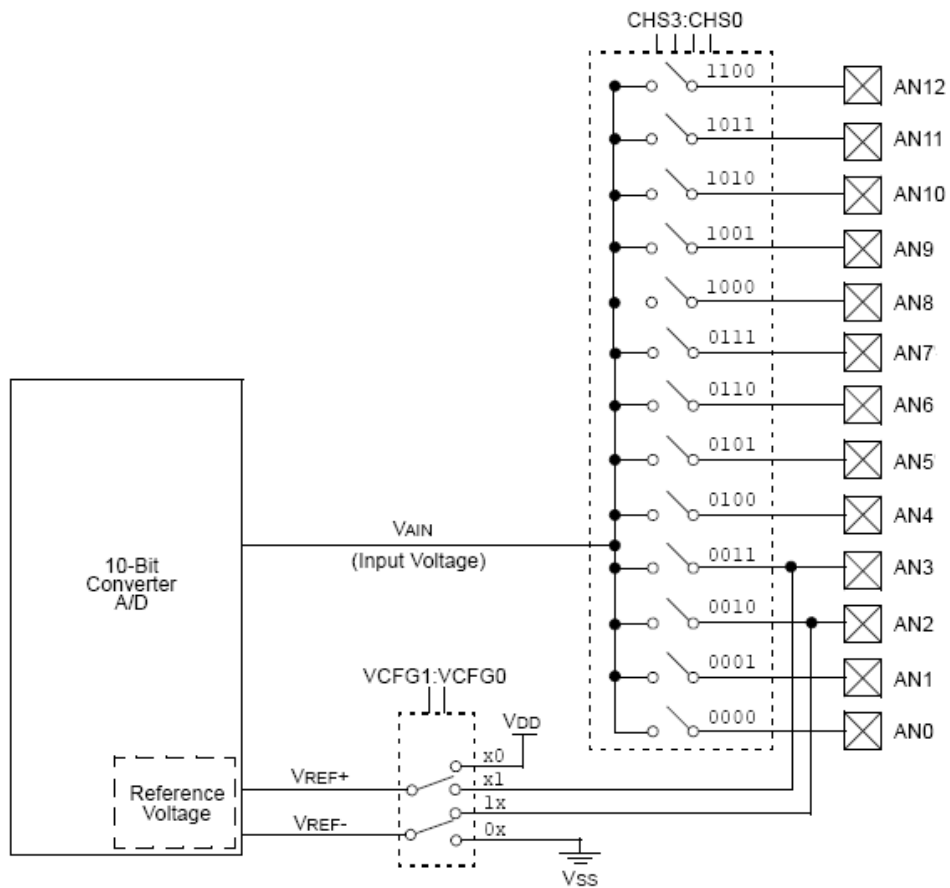


Figura 15: Diagrama de Bloques del Conversor Análogo-Digital [11]

2.1.2. Módulo MSSP

El Módulo del Puerto Serial Síncrono Maestro (Master Synchronous Serial Port - MSSP), es una interfaz serial utilizada para la comunicación con otros microcontroladores o periféricos. Este módulo se comunica utilizando el protocolo Interfaz Serial de Periféricos (Serial Peripheral Interface - SPI) o el protocolo de Circuitos Inter – Integrados (Inter – Integrated Circuit - I²C).

Se emplean tres registros para la configuración del módulo: SSPSTAT, SSPCON1, SSPCON2; la configuración de estos depende del protocolo que se escoja. El registro SSPSTAT indica el estado del módulo; mientras que los otros dos, son registros de control.

Para la recepción y el envío de los datos se utilizan los registros: SSPBUF, el cual actúa como buffer cuando la información se recibe o se transmite y SSPSR que es un registro de desplazamiento.

Durante la recepción, los bits entran al registro SSPSR y se van desplazando, cuando este se llena, es decir, en el momento en que se han recibido 8 bits de datos, la información pasa al SSPBUF y se puede leer su contenido, mientras que en la transmisión se carga un byte en el SSPBUF y automáticamente la información contenida en este registro pasa al SSPSR, cuya función es desplazar bit a bit el contenido del registro. Si durante la transmisión se escribe un nuevo dato en el registro SSPBUF será ignorado y se activará el bit de las colisiones del registro SSPCON, llamado WCOL, el cual debe ser atendido y borrado por software. [12] [13]

Por otro lado, el registro SSPADD controla las operaciones de direccionamiento cuando se utiliza el protocolo de comunicación I²C.

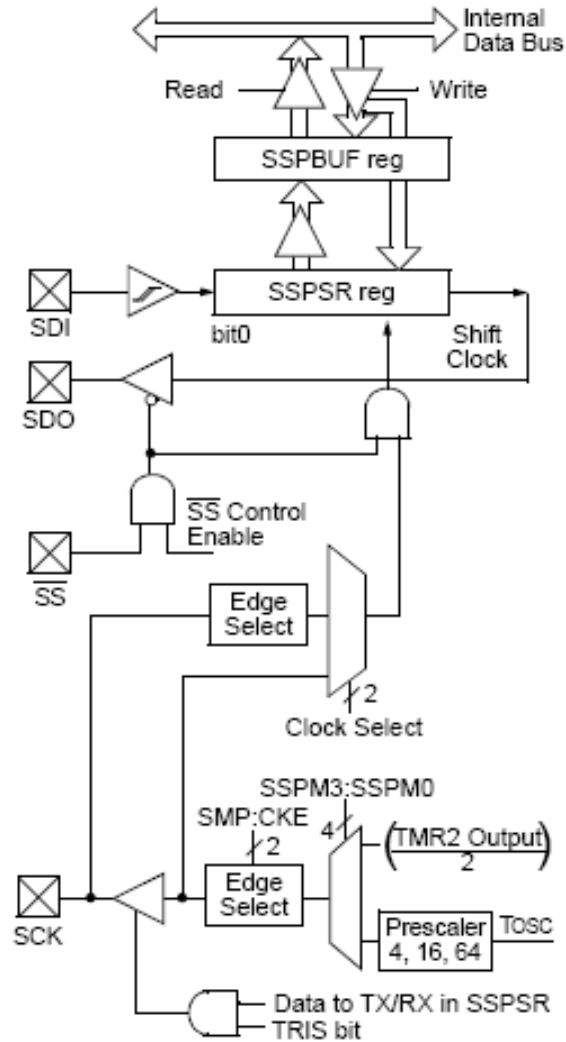


Figura 16: Diagrama del Módulo MSSP para el protocolo SPI [11]

2.1.1. Universal Serial Bus

El PIC18F4550 cuenta con un Bus Serial Universal (Universal Serial Bus – USB) versión 2.0, el cual dispone de cuatro líneas: dos para la alimentación (V_{CC} y GND) y dos para las señales de datos, que se denotan D+ y D-. El bus puede transferir información a baja velocidad (Low Speed), con el reloj a una frecuencia de 6MHz o a alta velocidad (Full Speed), con una frecuencia de 48Mhz. Internamente, el USB cuenta con resistencias de pull-up que permiten seleccionar la frecuencia de operación; así, si se desea trabajar a baja velocidad, la resistencia utilizada sería la conectada a D-, mientras que para operar a alta velocidad, se utilizaría la resistencia conectada a D+. El módulo permite que se trabaje con resistencias de pull-up externas, siempre que se deshabiliten, previamente, las internas.

Dado que el USB trabaja con un voltaje máximo de 3,3V, el módulo del bus tiene incorporado un regulador que puede suministrar este voltaje al transceptor interno, esto para aplicaciones en las que el microcontrolador opera con 5V. Si el regulador está deshabilitado, se debe alimentar con 3,3V el pin V_{USB} .

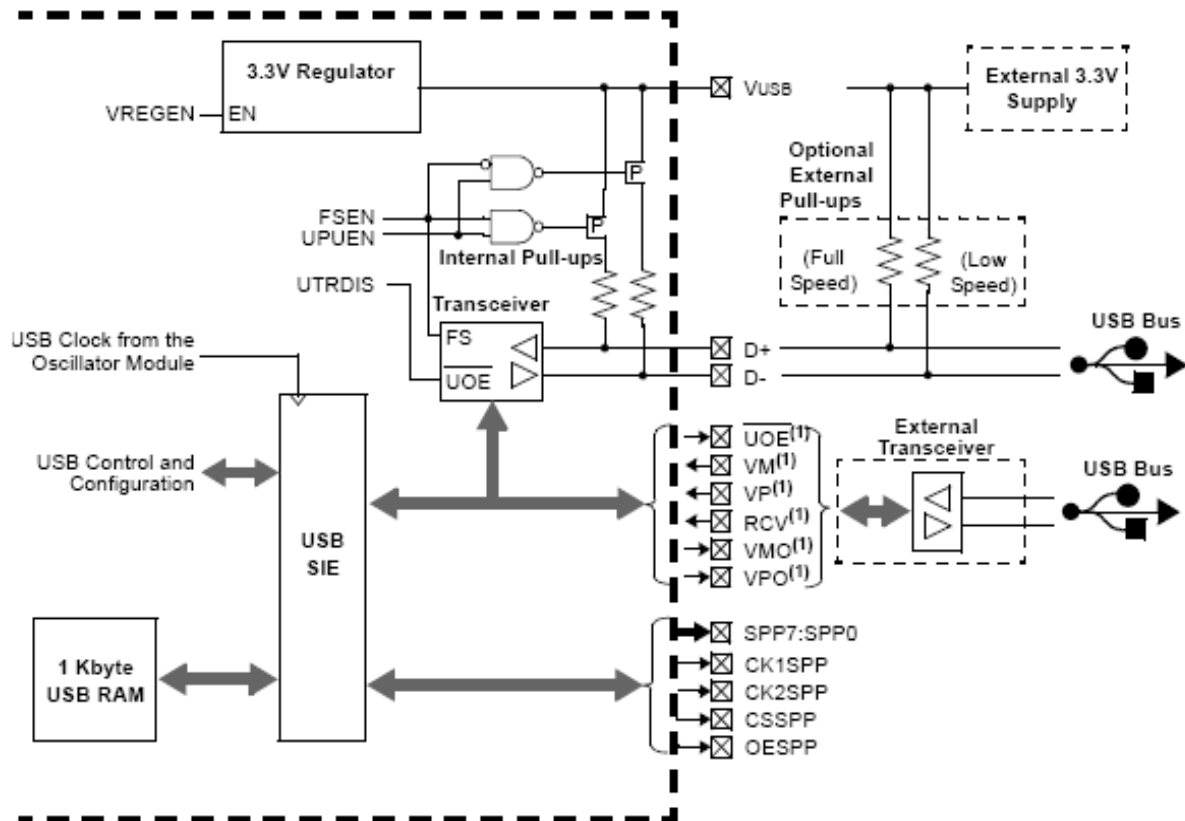


Figura 17: Módulo del USB [11]

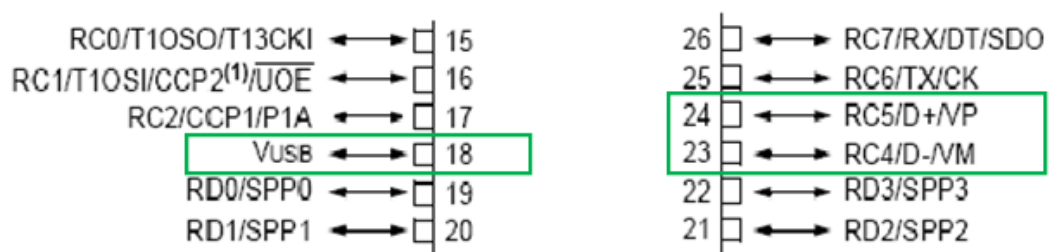


Figura 18: Pines del USB [11]

Dentro del protocolo de comunicación del USB, se define un dispositivo maestro y uno o varios dispositivos esclavos. El maestro se conoce como “Host”, este se encarga del envío y recepción de los datos, de la enumeración y de la detección de errores. Cuando una unidad USB se conecta al bus, el Host realiza un proceso llamado enumeración, en el cual se asigna una nueva dirección al dispositivo que se ha conectado y se recoge información sobre este, a fin de establecer la comunicación. Para lograr este proceso, el dispositivo debe ser reiniciado, direccionado y configurado.

El módulo del USB consta de una Máquina de Interfaz Serial (Serial Interface Engine – SIE), la cual se encarga de sincronizar las señales D+ y D-, generar los bits de chequeo de errores y permite la correcta comunicación entre cualquier dispositivo Host y el PIC. La Máquina de Interfaz Serial puede conectarse directamente al USB, a través el transceptor interno o utilizando un transceptor externo.

Es importante resaltar que un paquete es la unidad básica para el flujo de datos en los dispositivos USB. Los paquetes se agrupan para dar lugar a las transacciones y estas, a su vez, se agrupan para formar las transferencias.

El USB del PIC18F4550 maneja cuatro tipos de transferencias: la transferencia isócrona, bulk, interrupción y control. La transferencia isócrona es indicada para transmitir grandes cantidades de información de forma periódica; sin embargo, es posible que se generen pequeñas pérdidas de datos. Por su parte, la transferencia tipo bulk también permite el envío de grandes cantidades de datos, pero lo hace de forma asíncrona y garantiza la integridad de los datos.

En la transferencia de interrupción se envían, a baja frecuencia, pequeñas cantidades de datos y se garantiza su integridad. Finalmente, la transferencia tipo control permite configurar y controlar los dispositivos conectados al bus. Cuando el USB opera a baja velocidad, sólo es posible utilizar las transferencias de tipo interrupción y control.

En este tipo de comunicación se distinguen los “endpoints” o puntos terminales, los cuales son búferes donde se almacena la información. Los datos almacenados en estos, son datos recibidos o datos que están esperando a ser transmitidos. Los endpoints son unidireccionales y se direccionan por un número que los identifica y por el sentido en el que transmiten la información, es decir, serán endpoints de entrada, si transfieren información al sistema y endpoints de salida, si transmiten información hacia el dispositivo. El Host inicia o finaliza la comunicación entre cualquier aplicación y los endpoints de un dispositivo por medio de unos caminos lógicos de transferencias de datos denominados “pipes” o tuberías. [14] [15]

Para configurar y manejar el USB se tienen 22 registros: UCFG, UCON, USTAT, UADDR, UFRMH, UFRML y 16 registros UEPN que activan los endpoints. El primer registro configura la velocidad del USB con el bit FSEN y activa o desactiva las resistencias de pull-up internas, con el bit UPEN. También, habilita el uso del búfer “ping-pong”. Este

búfer es útil cuando se tienen dos sistemas de entradas de búferes descriptores, se tiene un sistema para las transferencias pares y otro para las impares, de forma tal que el CPU procesa un búfer descriptor, mientras que el SIE procesa el otro. Emplear el doble búfer permite un máximo rendimiento del USB. [11]

Con respecto al búfer ping-pong, el módulo USB permite escoger entre cuatro opciones, las cuales son: búfer ping-pong desactivado, búfer ping-pong en todos los endpoints, buffer ping-pong sólo para los endpoints de salida 0 y búfer ping-pong en todos los endpoints, excepto el en el 0. Estas opciones se pueden escoger en los bits PPB1 y PPB0 del registro UCFG. El registro UCFG debe ser configurado antes de habilitar el módulo.

Por su parte, la función de los búferes descriptores es describir los búferes que se utilizarán, es decir, se define su tamaño y dirección en la memoria RAM. Cabe destacar que es uno de los procesos más complicados al momento de configurar el USB.

El segundo registro (UCON), es un registro de control, el cual permite activar o desactivar el módulo mediante el bit USBEN, este bit también se encarga de activar las resistencias de pull-up y el regulador interno, en el caso de que se deseen utilizar y estén previamente configurados.

El registro USTAT permite conocer el estado de la transferencia dentro del SIE. En el momento en el que el SIE detecta una interrupción de transferencia, es necesario leer este registro para determinar en cual estado se encuentra. Este registro contiene la información del endpoint de la transferencia, la dirección y el valor del puntero del búfer ping-pong, en el caso de que se esté utilizando. [14]

Por su parte, UADDR es un registro de dirección, el cual contiene la única dirección del USB que el periférico reconocerá cuando está activo.

Los registros UFRMH y UFRML contienen los 11 bits del número del “frame” del USB [11]. Los bits menos significativos (bit0:bit7) se encuentran en el UFRML, mientras que los 3 bits más significativos están en el UFRMH. Por lo general, este número es usado cuando se tienen transferencias síncronas.

Finalmente, se tienen los registros UEPn, donde “n” representa el número del endpoint. Estos son 16 registros que permiten activar cada uno de los endpoints del módulo USB y configurarlos como entradas o salidas.

En líneas generales, la configuración y manejo del USB es un trabajo complicado; además, una vez configurado en el PIC, es necesario crear el driver del sistema que sea compatible con el sistema operativo utilizado.

2.2. Reloj de Tiempo Real DS1302

El integrado DS1302 es un Reloj de Tiempo Real (Real Time Clock – RTC), que se encarga de mantener y proporcionar la fecha y hora, tanto con formato de 12 horas (con indicador de AM/PM) como de 24. El dispositivo requiere de un cristal de 32,768kHz para lograr marcar el paso de los segundos y actualizar de forma automática el tiempo en sus registros internos. Dispone de 9 registros para la configuración y puesta en hora y 7 registros para la lectura de la fecha y hora. Además, cuenta con una memoria interna de 31 bytes, donde se pueden almacenar datos de propósito general.

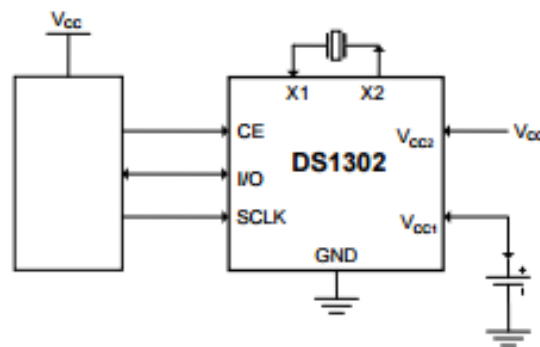


Figura 19: RTC DS1302 [16]

El voltaje de operación puede estar entre 2,0V y 5,5V, para un voltaje menor a 2,0V, el dispositivo deja de funcionar; pero mantiene la información contenida en los registros.

Posee dos fuentes de alimentación: la fuente de alimentación primaria, V_{CC2} , que operará siempre que ésta sea 0,2V mayor a la fuente de alimentación secundaria V_{CC1} . En caso contrario, operará V_{CC1} ; la cual sólo se encargará de mantener las funciones de fecha y hora, en este modo no es posible comunicarse con el RTC.

La comunicación es síncrona de 3 hilos, es decir, se utiliza la línea de datos I/O, la línea de señal de reloj SCLK y una línea de habilitación CE. Para establecer comunicación es necesario habilitar el dispositivo, colocando a nivel alto la línea CE. Luego, se envía por la línea de datos, y sincronizados con la línea de reloj, 8 bits que corresponden a un comando que sigue el siguiente formato:

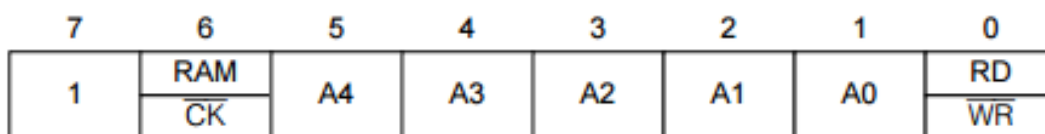


Figura 20: Formato de Comando para el RTC [16]

El bit 7 siempre se encuentra en uno, el bit 6 indica si los datos se guardarán en un registro de configuración o si se guardarán en la memoria RAM, dependiendo si su valor es “0” o “1”, respectivamente. En los siguientes 5 bits se indica la dirección del registro y el último bit indica el tipo de operación, “0” para escritura y “1” para lectura. El comando se envía comenzando por el bit menos significativo (LSB).

Seguidamente, y dependiendo del tipo de operación que se realice, será necesario enviar 8 bits adicionales, que conforman el dato en una operación de escritura, o leer los 8 bits que entregará el dispositivo en una operación de lectura. Finalmente, se coloca un “0” en la línea CE para terminar la comunicación. La transmisión se realiza con un flanco de subida en la línea de reloj, mientras que la recepción ocurre con un flanco de bajada.

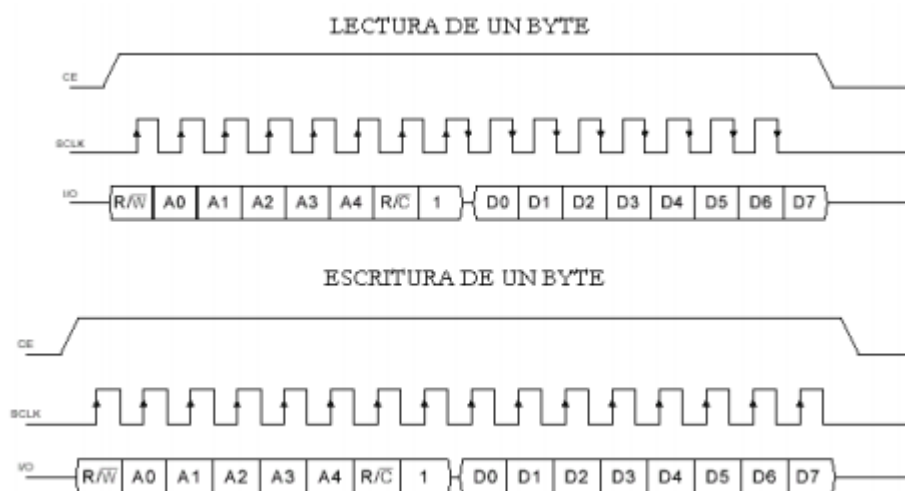


Figura 21: Operación de Lectura y Escritura [17]

En cuanto a la configuración, se tienen registros para escribir los segundos, los minutos, la hora, el día, el mes, el día de la semana y el año. El bit CH, que corresponde al séptimo bit del registro “0x80”, activa o detiene el reloj; si su valor es “0”, el reloj opera normalmente y se detendrá si este bit se coloca en “1”. También, es posible proteger la información de los

registros bloqueando las operaciones de escritura, esto ocurre con el bit WP del registro “0x8E”.

READ	WRITE	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0	RANGE
81h	80h	CH	10 Seconds			Seconds				00–59
83h	82h		10 Minutes			Minutes				00–59
85h	84h	12/24	0	10 AM/PM	Hour	Hour				1–12/0–23
87h	86h	0	0	10 Date		Date				1–31
89h	88h	0	0	0	10 Month	Month				1–12
8Bh	8Ah	0	0	0	0	Day				1–7
8Dh	8Ch	10 Year				Year				00–99
8Fh	8Eh	WP	0	0	0	0	0	0	0	—
91h	90h	TCS	TCS	TCS	TCS	DS	DS	RS	RS	—

Figura 22: Registros de Configuración [16]

El registro “0x90” corresponde al registro de control del circuito “Trickle-Charge”, utilizado para recargar la fuente secundaria. Se puede activar o desactivar, seleccionar la diferencia de potencial entre la fuente primaria y secundaria y el valor de la resistencia limitadora de corriente. A fin de evitar que se active accidentalmente, la única configuración que lo habilita es colocar “1010” en los últimos cuatro bits de este registro (bit7:bit4). En los bits DS (bit2:bit3), se selecciona si la corriente pasa a través de uno o dos diodos y en los dos bit menos significativos se escoge una de las tres resistencias disponibles (2kΩ, 4kΩ, 8kΩ).

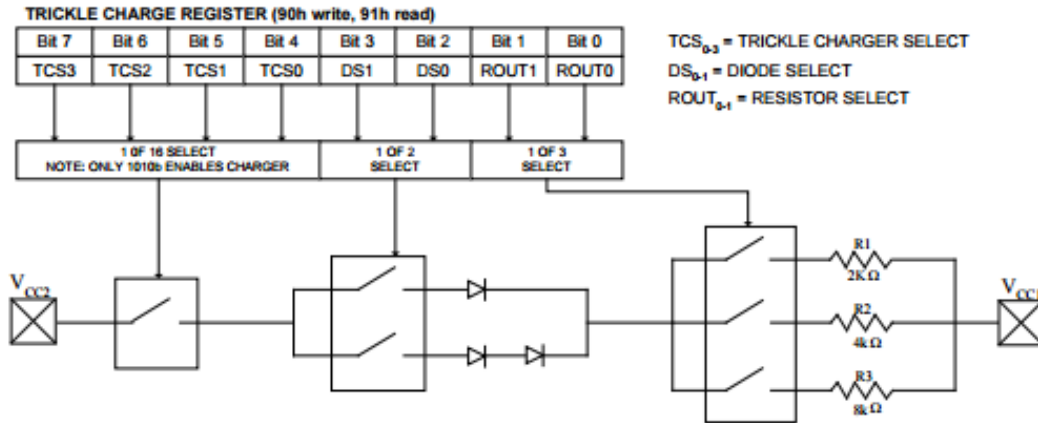


Figura 23: Configuración del Registro Trickle-Charge [16]

2.3. Memoria SD

Una memoria SD (Secure Digital Memory), es una memoria EEPROM tipo Flash, es decir, una memoria no volátil que puede borrarse eléctricamente, en la que es posible escribir y leer múltiples posiciones de memoria (por bloques) en una única operación. Debido a su alto grado de integración, pueden fabricarse de gran capacidad y es por esto que son empleadas en diversas aplicaciones, donde es necesario el almacenamiento masivo de datos.



Figura 24: Memoria SD [2]

Las memorias SD están disponibles en tres presentaciones: SD estándar, miniSD y microSD. También, existen diferentes versiones en relación a su capacidad de almacenamiento; así, se tienen las SD (Standar Capacity), que pueden almacenar hasta 2GB y las SDHC (High Capacity), las cuales pueden llegar hasta 32GB. Recientemente, se han desarrollado las SDXC (Extend Capacity), memorias de capacidad extendida que alcanzan hasta los 128GB de almacenamiento.

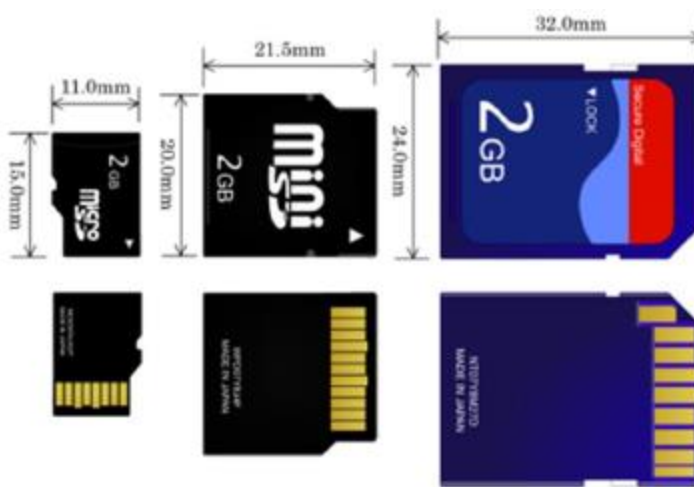


Figura 25: Diferentes Presentaciones de las Memorias SD [18]



Figura 26: Memorias SD, SDHC y SDXC [19]

Las memorias SD pueden utilizar dos protocolos de comunicación: el SD Bus, que es propio de las memorias SD y es el más rápido, puesto que emplea cuatro líneas para el envío y recepción de los datos. El otro protocolo es el SPI, que aunque es más lento, su uso es mucho más frecuente, debido a su simplicidad y a que la mayoría de los microcontroladores disponen de hardware para su implementación.

La información dentro de la memoria se organiza en sectores, cuyo tamaño es de 512 bytes.

2.3.1. Protocolo de comunicación SPI

El protocolo SPI utiliza cuatro líneas para establecer la comunicación: una que le permite seleccionar el dispositivo esclavo, una línea para la sincronización de los datos o línea de reloj, una línea para el envío de información y otra para la recepción de datos; por lo tanto trabaja en modo full dúplex, es decir que el envío de los datos es bidireccional de forma simultánea. La transmisión de los datos ocurre en bloques de 8 bits.

En esta comunicación se establece un dispositivo maestro, quien es el encargado de seleccionar a uno de los dispositivos esclavos presentes en el sistema, es el responsable de generar la señal de reloj y de la transferencia de información entre ambos dispositivos.

En el protocolo SPI, la información se envía bit a bit, uno por cada ciclo de reloj, comenzando por el más significativo hasta finalizar con el menos significativo.

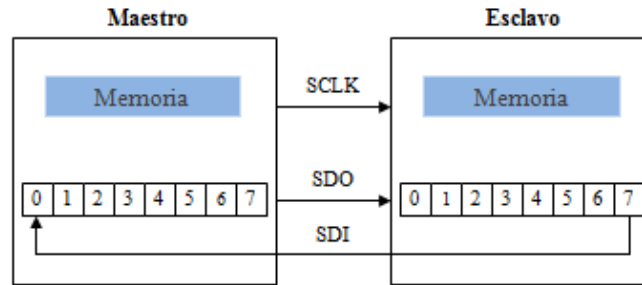


Figura 27: Protocolo de comunicación SPI

2.3.2. Protocolo SPI en el PIC18F4550

Para implementar la comunicación SPI en el PIC18F4550, se debe utilizar el módulo MSSP, que cuenta con un registro de control llamado SSPCON1, otro registro que indica el estado del módulo, que es el registro SSPSTAT y dos registros más, los cuales son: SSPBUF y SSPSR. El primero actúa como búfer y el segundo es un registro de desplazamiento que se encarga de enviar y recibir cada uno de los bits que conforman el dato.

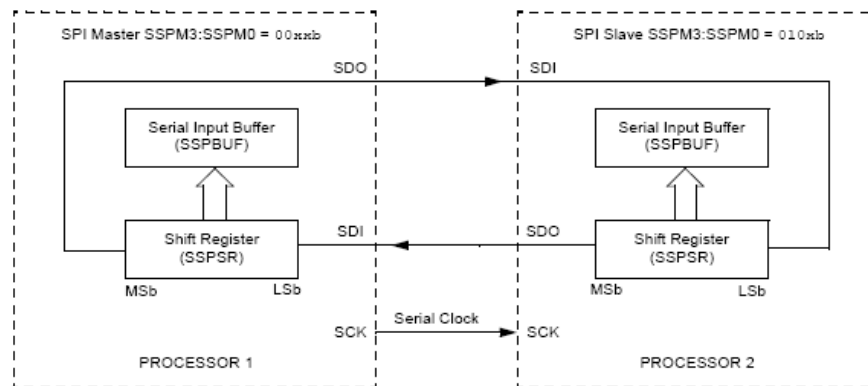


Figura 28: Protocolo SPI en el PIC18F4550 [11]

En el registro SSPCON1 se activa o desactiva el protocolo SPI. Al colocar a "1" el bit SSPEN, los pines SCK, SDO y SDI se configuran como parte de este protocolo y no pueden ser utilizados para otro propósito. También, es aquí donde se escoge la polaridad de la señal del reloj mediante el bit CKP, es decir, si en el estado inactivo la línea de reloj se encuentra a un nivel alto o bajo; para esto, CKP debe valer "1" y "0" respectivamente.

Además, se puede escoger si el PIC actuará como maestro o como esclavo y la frecuencia del reloj. En modo maestro, se tienen cuatro posibilidades para dicha frecuencia: $F_{osc}^2/4$, $F_{osc}/16$, $F_{osc}/64$ o la salida del segundo temporizador TMR2.

En el registro SSPSTAT se selecciona, por medio del bit CKE, si la transmisión ocurre en la transición entre el estado activo y el inactivo de la línea de reloj (CKE=1) o en la transición entre el estado inactivo y el activo (CKE=0).

Para adaptarse a diferentes requerimientos, el módulo MSSP es capaz de generar cuatro formas de pulsos de reloj, que se escogen configurando los bits CKP y CKE.

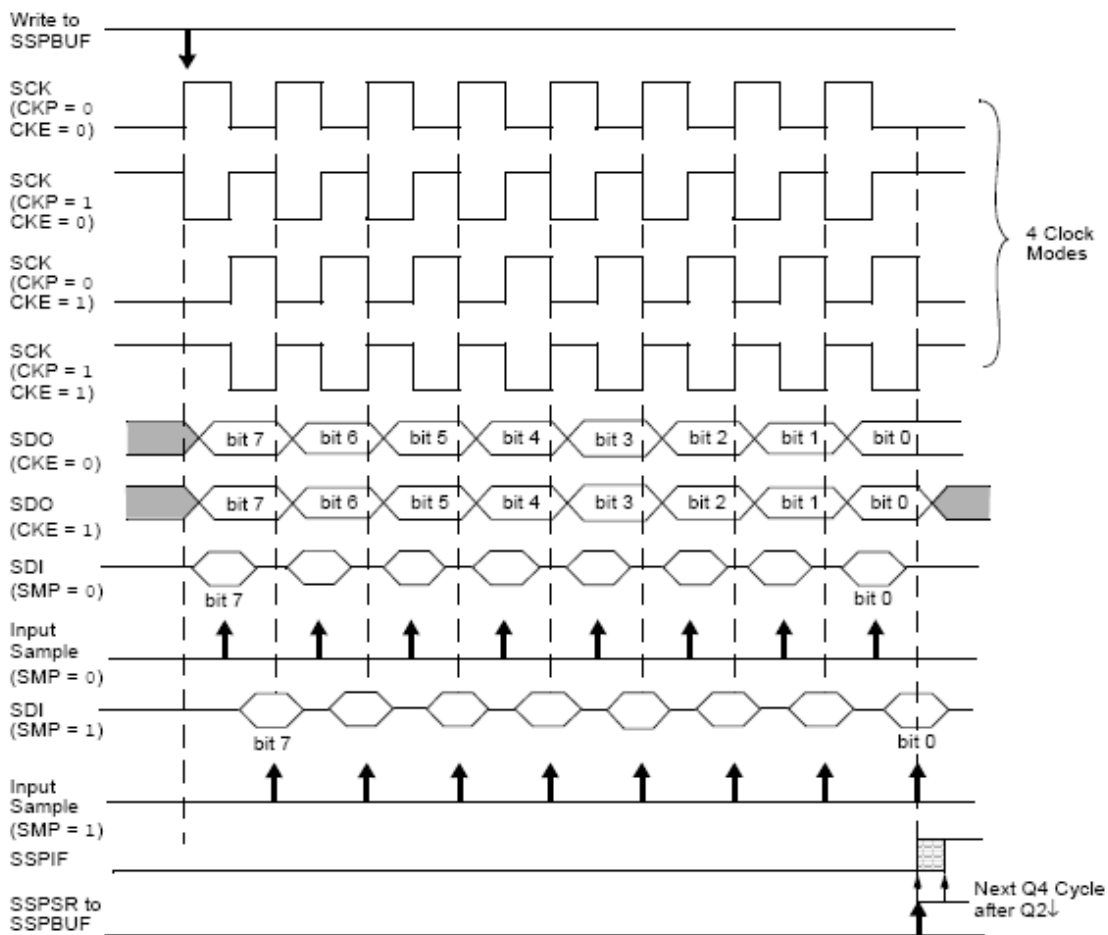


Figura 29: Pulsos de Reloj en Modo SPI [11]

² Frecuencia de Oscilación

2.3.3. Protocolo SPI en la Memoria SD

El protocolo nativo de la memoria SD es el SD bus, sin embargo, dispone de un modo compatible con la comunicación SPI, que aunque es más lenta, le permite comunicarse con una gama mucho mayor de dispositivos.

En el modo SPI, se emplean siete de los nueve pines de la memoria, tres destinados a la alimentación, una línea de reloj, una línea de selección que activa la tarjeta, una línea para el envío de los datos y otra para la recepción de estos. Los otros dos pines permanecen inactivos.

Para que la memoria inicie en el modo SPI, es necesario enviar una secuencia de comandos específicos. Una vez iniciada, es posible escribir y leer datos de ella.

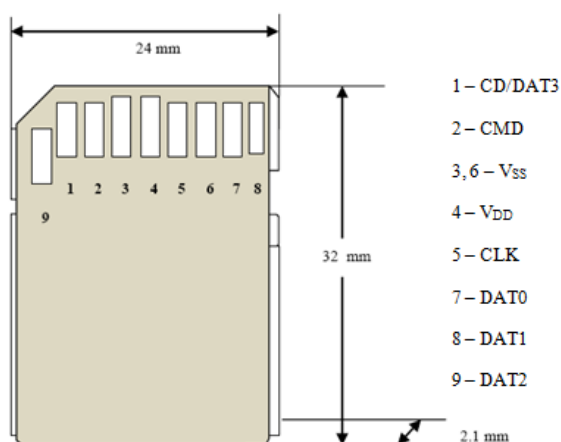


Figura 30: Memoria SD [2]

2.3.3.1. Comandos de la Memoria

La memoria SD cuenta con 64 comandos estándar, de los cuales, 33 son utilizados en el modo SPI. Asimismo, tiene 25 comandos de aplicaciones específicas, sólo 11 de ellos se emplean en el protocolo SPI. Sin embargo, los más importantes son los relacionados con la inicialización de la memoria SD y los que permiten la lectura y escritura.

Todos los comandos tienen una longitud de 6 bytes y la misma estructura. Los comandos se envían comenzando por el byte más significativo (Byte 6), que contiene el número del comando. En los siguientes 4 bytes, se envía el argumento del comando y en el último byte se envía el CRC³, que en el modo SPI es ignorado.

³ Verificador de Redundancia Cíclica

El CRC se emplea para garantizar la integridad de los datos, detectando posibles errores al momento de recibirlos.



Figura 31: Estructura de los Comandos [19]

Una vez enviado el comando, la memoria emite una respuesta indicando si este fue recibido o si ocurrió algún error. En general, la memoria remite una respuesta de tipo R1, la cual tiene un byte de longitud y cumple con el siguiente formato:

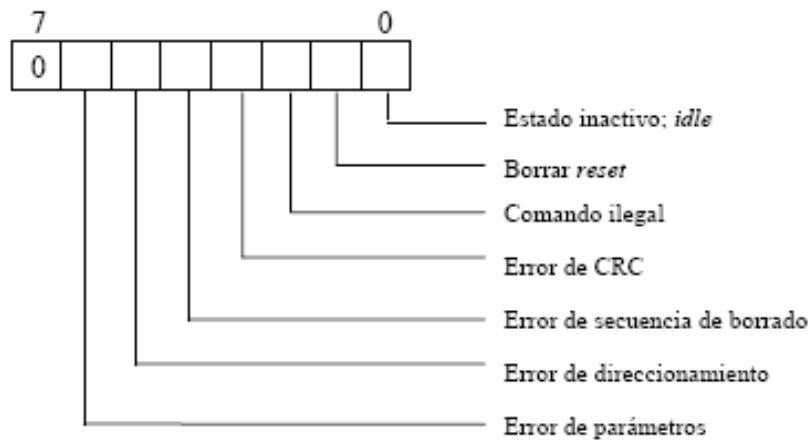


Figura 32: Formato de la Respuesta R1 [2]

El bit más significativo siempre permanece en cero, mientras que si el resto de los bits permanecen en cero, no hubo ningún error. Pero, si en alguno de los bits aparece un uno, este indicará cuál es el error.

2.3.3.2. Comando CMD0

El comando cero es el primero que se envía cuando se desea iniciar el protocolo SPI y es el encargado de reiniciar la memoria. Una vez enviado el comando, la memoria remite una respuesta tipo R1, con el bit 0 igual a “1”, indicando que se encuentra en estado inactivo.

Este comando no necesita argumento, por lo que en los 4 bytes que siguen al comando, se envían solo ceros. Es importante resaltar, que en este caso, el valor del CRC debe ser igual a: “0x95”, ya que aún no se ha entrado en el modo SPI y el CRC no será ignorado.

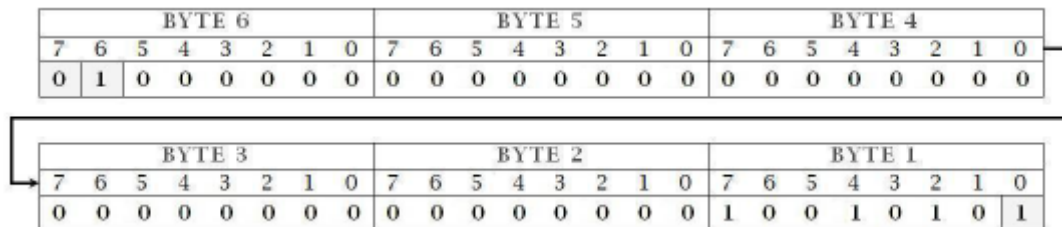


Figura 33: Estructura del CMD0 [19]

2.3.3.3. Comando CMD17

El comando 17 se envía cuando se quiere leer un solo sector de la memoria. En el argumento de este, se envía la dirección de inicio de lectura. El CRC, aunque será ignorado, debe ser enviado con cualquier valor.

Si el comando es aceptado, la memoria enviará una respuesta R1 con ceros y, transcurrido un tiempo, enviará un byte denominado “Start Block Token”, el cual vendrá seguido por el bloque de datos solicitado. Una vez finalizada la lectura, la memoria estará lista para recibir otro comando. Cabe destacar que el valor del Start Block Token es “0xFE”.

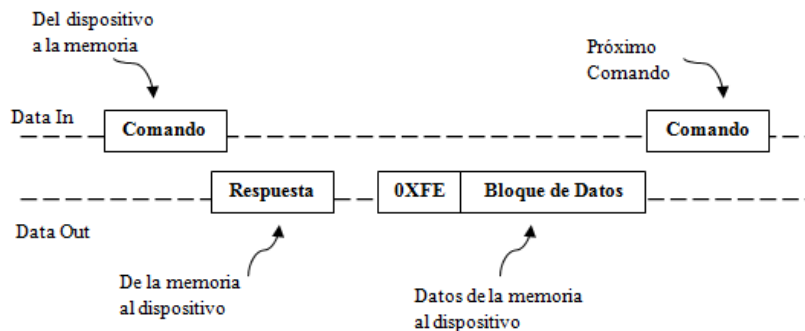


Figura 34: Operación de Lectura en las Memorias SD

2.3.3.4. Comando CMD18

El comando 18 se envía cuando se desea leer múltiples bloques. En este caso, la memoria enviará continuamente los datos de sectores contiguos, precedidos, cada uno, por un Start Block Token. La transmisión se detendrá cuando se envíe el comando 12 (CMD12).

En caso de que ocurra un error, la memoria transmite un byte denominado “Data Error Token”, que indica la causa del error y detiene la transmisión.

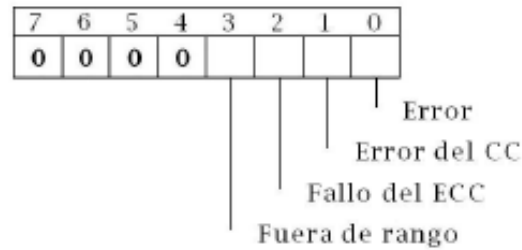


Figura 35: Formato de “Data Error Token” [19]

2.3.3.5. Comando CMD24

El comando 24 es usado para la escritura de un sector de la memoria, por ello en el argumento se envía la dirección donde se desea escribir. Luego, se debe esperar la respuesta R1 antes de enviar el bloque de información, el cual debe estar precedido por el Start Block Token. Una vez recibidos los datos, la memoria envía un “Data Response Token”, con el cual se determina si estos fueron aceptados o si ocurrió un error.

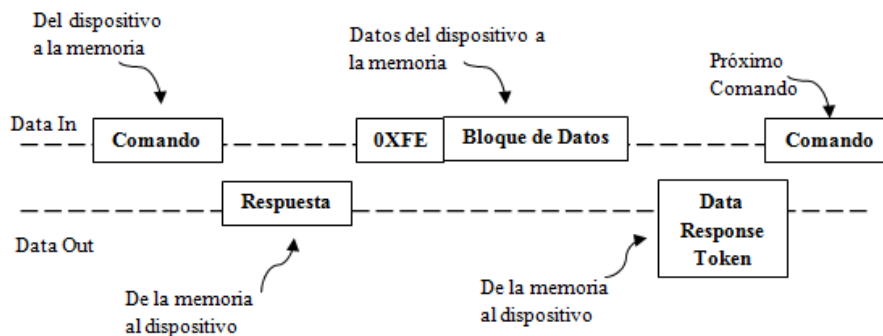


Figura 36: Operación de Escritura en la Memoria SD

7	6	5	4	3	2	1	0
X	X	X	0	Estatus		1	

Figura 37: Formato de “Data Response Token” [19]

Es importante señalar que un “010” en los bits del estatus, significa que los datos fueron aceptados. Si se tiene un “110”, significa que los datos han sido rechazados por error en la escritura.

2.3.3.6. Comando CMD25

Si se desea la escritura de múltiples bloques, se debe enviar el comando 25, el proceso es similar al del CMD24, pero en este caso, se envía continuamente la información de bloques contiguos. La transmisión finaliza al enviar el CMD12.

2.3.3.7. Comando ACMD41

El comando de aplicación específica 41, es usado para conocer si la inicialización ha terminado. Antes de enviar este comando es necesario enviar el comando 55 (CMD55), cuya función es notificarle a la tarjeta que será enviado un comando de aplicación específica.

Al enviarlo, la memoria remite la respuesta R1, si el bit 0 se encuentra en “1”, el proceso de inicialización no ha concluido. Por el contrario, si se tiene un “0”, indica que la inicialización está completa.

2.3.4. Comunicación entre el Microcontrolador y la Memoria SD

En la comunicación entre el PIC18F4550 y la memoria SD, el microcontrolador es el maestro y la memoria es el dispositivo esclavo. El maestro establece comunicación con el módulo MSSP y emplea cuatro pines para esto: el pin SDI, usado para la recepción de los datos y el pin SDO, empleado para la transmisión de la información. Además, un pin para la señal de reloj SCK y una línea de habilitación.

A fin de inicializar la memoria, el módulo MSSP del microcontrolador debe ajustarse a una frecuencia que no debe exceder los 400kHz. Una vez completada la inicialización, puede aumentarse la frecuencia hasta unos 25MHz. Además, la línea de habilitación debe mantenerse

activada desde antes de iniciar la comunicación; así antes de enviar algún comando a la memoria, esta línea debe colocarse a nivel bajo.

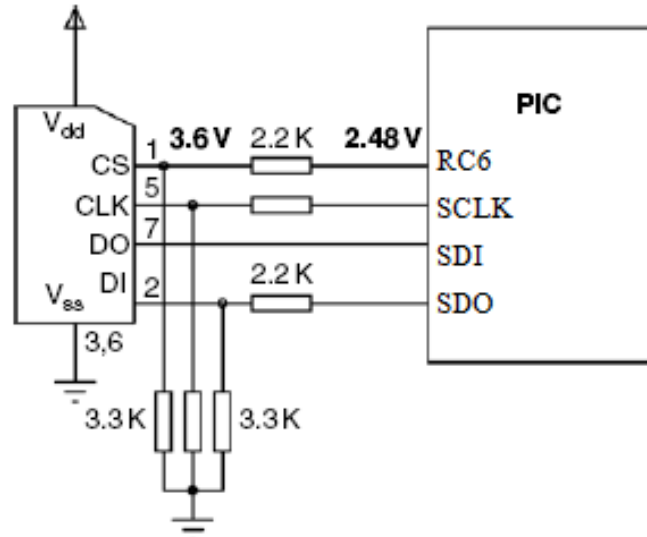


Figura 38: Comunicación PIC-Memoria SD [20]

Si el voltaje de operación del PIC supera al de la memoria, es necesario añadir divisores de tensión a tres de los cuatro pines de comunicación. De esta forma, se evita que la memoria sufra daños.

2.3.5. Sistemas de Archivos FAT

Un sistema de archivos es un conjunto de normas, procedimientos y estructuras de datos, que utiliza el sistema operativo para almacenar la información en el disco. Todos los sistemas operativos tienen su propio sistema de archivos. [21]

Entre los más usados, se encuentra la Tabla de Asignación de Archivos (File Allocation Table - FAT), desarrollado por Microsoft en 1980. Esta tabla indica donde se encuentran los archivos en el disco. Parte de su éxito, se debe a que posee un formato sencillo de implementar y es compatible con casi todos los sistemas operativos. [18]

En una unidad de almacenamiento, el primer sector físico, denominado sector cero físico, corresponde al Sector de Arranque Maestro (Master Boot Record – MBR), el cual contiene información sobre las particiones de la unidad y dispone del código para iniciar el programa de arranque. En el primer sector lógico, llamado sector cero lógico, se tiene sector de arranque

de la partición, es aquí donde se guarda información sobre el disco y su formato. Seguidamente, se tiene la tabla FAT, en la cual se encuentra la información de cada clúster⁴ del disco, su dirección y si este se encuentra disponible. A fin de evitar errores, la tabla FAT se encuentra duplicada en el disco.

Luego, está el directorio raíz y el espacio de los datos. El directorio raíz guarda información sobre los archivos, como su nombre, dirección y extensión. Finalmente, la región de datos es el lugar donde se almacena el contenido de los archivos, por lo cual ocupa la mayor parte del espacio del dispositivo de almacenamiento.

2.4. Acelerómetro ADXL335

El acelerómetro ADXL335 es un integrado que está formado por una superficie micromecanizada de aproximadamente 4mm^2 . Contiene un sensor de aceleración de tipo capacitivo, con el cual se puede medir la aceleración en tres ejes ortogonales con un solo circuito. [1]

Este dispositivo puede medir aceleraciones estáticas, lo que le permite ser usado como un sensor de inclinación. También, puede medir aceleraciones dinámicas, como choques o vibraciones, en un rango de $\pm 3g$.

En este circuito integrado se tiene un elemento sensor, una sección de amplificación de las señales alternas provenientes de este, una etapa de demodulación y luego la amplificación de salida.

Básicamente, el sensor es un condensador de tres terminales, equivalente a dos condensadores en serie en donde el terminal intermedio puede desplazarse y variar la capacidad de ambos condensadores.

Los extremos de las placas fijas son alimentados por un generador de onda con señal cuadrada, es decir, que ambos terminales tienen una señal cuadrada pero desfasada 180° entre sí. La salida es a través de la placa intermedia, en el que se suman ambas señales; pero sus contribuciones dependen de las capacidades presentes para un determinado desplazamiento.

Seguidamente, la señal se pasa por un seguidor de tensión que funciona como acoplador de impedancia. Posteriormente, un circuito demodulador se encarga de forma sincronizada con el oscilador, de eliminar la naturaleza alterna de la señal, obteniendo como resultado las variaciones de amplitud que están relacionadas con la magnitud y dirección de la aceleración.

⁴ Conjunto de sectores que conforman la unidad básica para almacenamiento de archivos

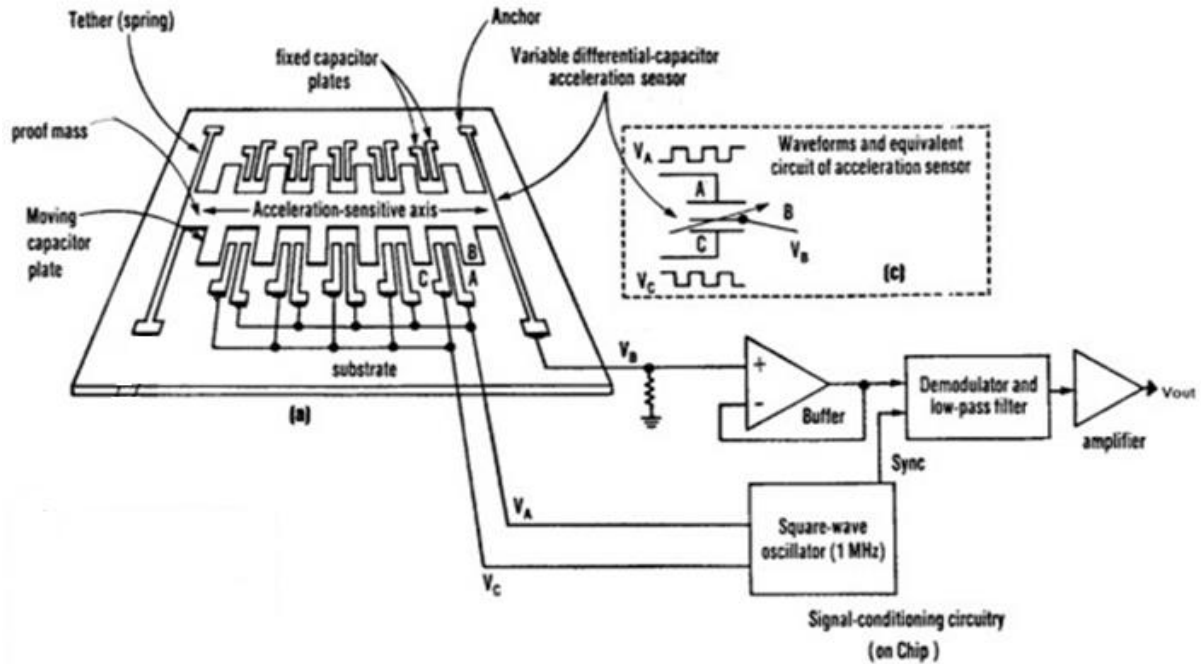


Figura 39: Sensor del Integrado ADXL335 [22]

Finalmente, la amplitud de la señal es acondicionada a través de un amplificador, a cada una de las salidas X_{out} , Y_{out} y Z_{out} se les coloca un condensador, que junto con la resistencia de 32KOhms, se encargan de filtrar la señal y ajustar el ancho de banda. El ruido tiene las características de ruido blanco Gaussiano, es decir, que se presenta en todas las frecuencias posibles. [1]

El ADXL335 opera en un rango de temperatura de -40°C a 85°C y el voltaje de alimentación cubre el rango de 1.8V a 3.6V. Es recomendable añadir un condensador de $0.1\mu\text{F}$, para evitar que el ruido proveniente de la alimentación afecte las medidas.

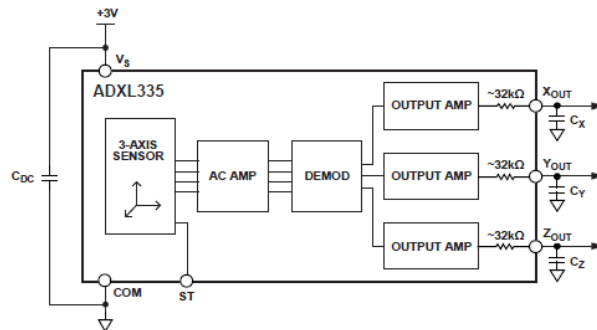


Figura 40: Circuito del Acelerómetro ADXL335 [22]

En cuanto a la sensibilidad, esta varía con la alimentación; así que para el voltaje máximo de 3.6V, la sensibilidad será de 360mV/g, mientras que para 2V, será de 195mV/g.

La corriente de alimentación decrece conforme lo hace el voltaje. El consumo de corriente típico para un voltaje de 3.6V es de 375 μ A, mientras que para 2V es de 200 μ A.

La frecuencia de resonancia es de 5.5KHz y el rango en el cual se pueden realizar mediciones apropiadamente no es igual para los tres ejes. Así, se tiene que tanto para el eje X como para el Y, el rango se extiende de 0.5 Hz a 1600 Hz y para el eje Z de 0.5 Hz a 550 Hz.

El ADXL335 cuenta con 6 pines, de los cuales 2 están destinados para la alimentación, 3 para las salidas de cada eje y uno para la prueba de funcionamiento, llamado “Self Test” o ST. Al colocar este pin al voltaje V_S , se da lugar a una fuerza electrostática desplazando la masa en el acelerómetro. Este movimiento ocasiona una salida de -150mV en el eje X, 150mV en el eje Y, y -200mV en el Z. El voltaje en el pin ST no debe superar el voltaje V_S . [1]

Los voltajes a las salidas X_{out} , Y_{out} y Z_{out} , durante la prueba de funcionamiento, también resultan modificados por el voltaje de alimentación V_S ; pues al suministrar un voltaje de 3.6V el eje X tendrá una salida de -560mV, 560mV para el eje Y, y 950mV para el eje Z. En cambio, si el voltaje es 2V, se tendrán -96mV para el eje X, 96mV para el eje Y, y -163 para el Z.

Dependiendo de la posición en la que se coloque el integrado, se registrarán diferentes valores de aceleración estática.

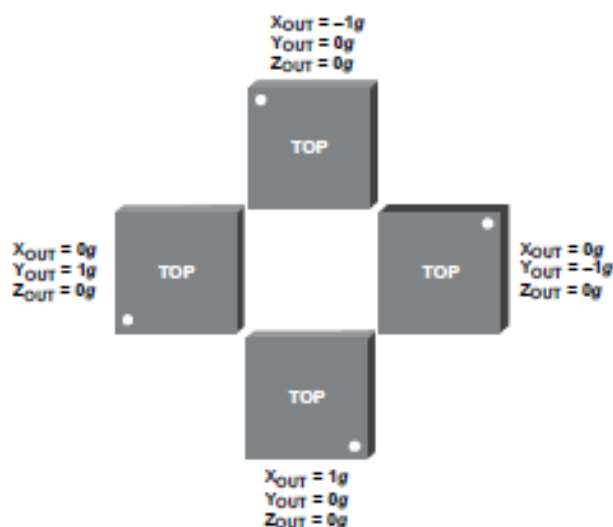


Figura 41: Aceleración en los ejes X e Y [22]



Figura 42: Aceleración en el eje Z [22]

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL HARDWARE

Para el desarrollo del sistema digital se escogió el microcontrolador PIC18F4550, el cual dispone de comunicación USB, además de contar con una capacidad importante de memoria de programa y memoria RAM, y un conversor análogo-digital de 10bits. Este microcontrolador puede trabajar con un voltaje de alimentación de 2.0V a 5.5V, siendo el voltaje de operación del sistema de 3V, a fin de mantener compatibilidad con la memoria microSD.

Se incorporó un reloj de tiempo real DS1302, que puede operar con el voltaje del sistema y, aunque el protocolo de comunicación de este no es soportado a nivel de hardware por el microcontrolador, puede ser implementado por medio de software.

Para el registro de los datos se utilizó una memoria microSD por su alta capacidad de almacenamiento, costos relativamente bajos y porque pueden ser leídas directamente desde cualquier computador.

El acelerómetro ADXL335 permite medir la aceleración, tanto estática como dinámica, en tres ejes ortogonales y en un rango de $\pm 3g$. Este dispositivo soporta grandes impactos y opera en un rango de voltaje que lo hace adecuado para este sistema.

Cabe destacar que todos estos componentes se encuentran con facilidad en el mercado nacional.

El sistema cuenta con cinco conectores: uno para el USB de tipo B, empleado para la comunicación y alimentación del sistema, otro para la conexión del programador PIC Kit 3 de Microchip, dos para los acelerómetros y el último que se corresponde pin a pin con el microcontrolador, de manera de poder usarlo para extender las capacidades del sistema.

3.1. Regulador discreto de 3V

Para mantener compatibilidad con el voltaje de operación de la microSD, se escogió para el sistema un voltaje de funcionamiento de 3V, lo cual posibilita, además, la utilización de baterías de litio.

El USB suministra un voltaje de 5V, el cual se regula a 3V a través de un circuito discreto, que utiliza un diodo Zener de 3.6V como referencia y un transistor PN100 que entrega el

voltaje de salida. Tiene una resistencia para limitar la corriente de salida a 120mA y cuatro diodos en serie, conectados entre la salida y tierra, que impiden que el voltaje supere los 3.2V, en caso de fallar la regulación.

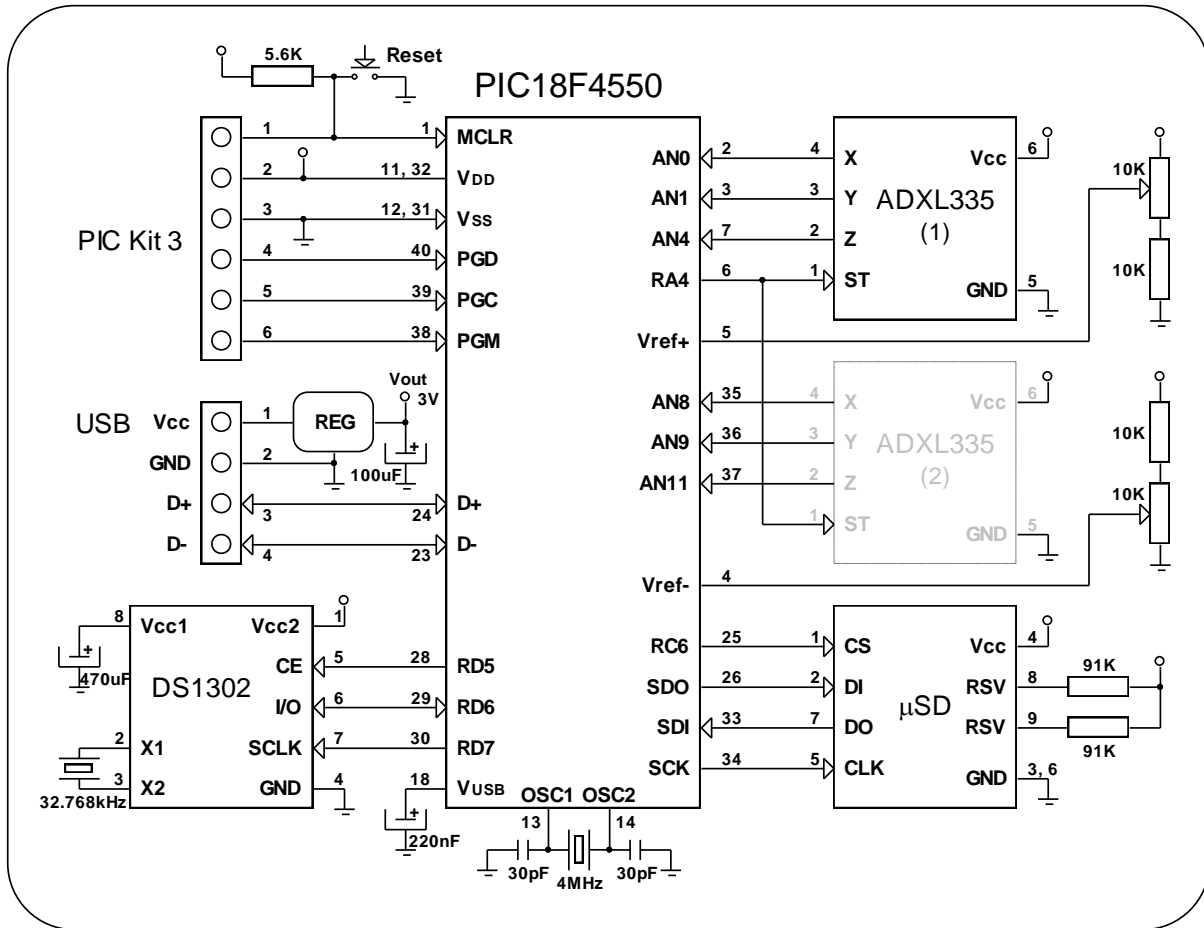


Figura 43: Diagrama del Sistema

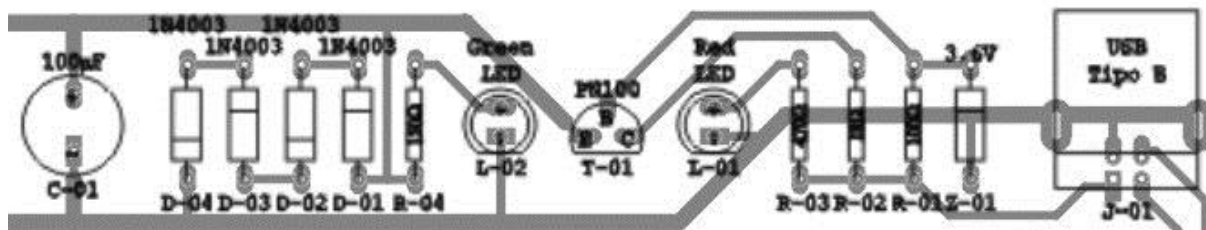


Figura 44: Regulador Discreto de 3V

3.2. Reloj de Tiempo Real DS1302

El Reloj de Tiempo Real DS1302 utiliza dos fuentes de alimentación, la primaria está conectada a la alimentación del sistema y la secundaria, que actúa cuando deja de estar presente la primaria, sirve para mantener en funcionamiento el reloj y proteger el contenido de sus registros. Generalmente, se emplea para la fuente secundaria, una batería de litio; pero para evitar su uso, se ha sustituido por un condensador de $470\mu\text{F}$ que adquiere carga a través de un circuito interno denominado Trickle - Charger.

Para su funcionamiento, el RTC necesita un cristal de 32.768kHz y emplea 3 líneas para el protocolo de comunicación: CE, I/O y SCLK.

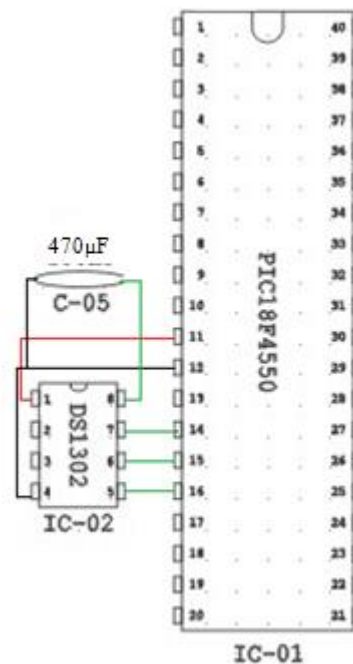


Figura 45: Conexión del RTC

3.3. Memoria microSD

La memoria microSD en el modo SPI utiliza 7 de sus 9 pines: 3 para la alimentación y 4 para comunicación. Los pines 8 y 9 no se utilizan en este protocolo y están conectados al voltaje de alimentación por medio de resistencias de pull-up de $91\text{K}\Omega$.

Se utilizó un adaptador de microSD a SD como conector para la memoria, de manera de poder removerla del sistema y exportar los datos almacenados.

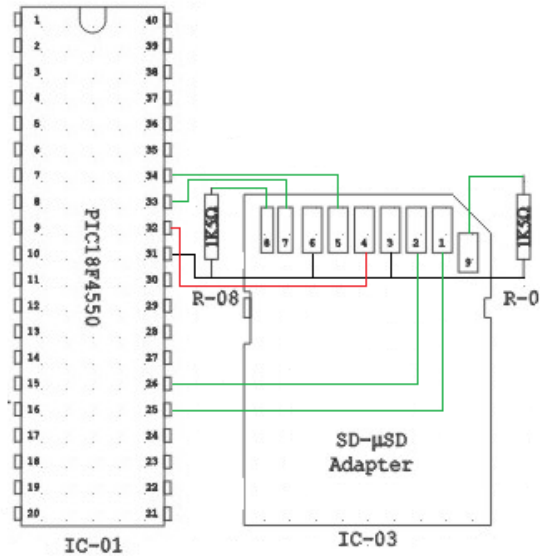


Figura 46: Conexión de la microSD

3.4. Acelerómetro ADXL335

El acelerómetro ADXL335 utiliza dos líneas para la alimentación, una línea de activación del Self Test y tres que son las salidas analógicas correspondientes a los ejes X, Y, Z. Para su instalación y remoción en el sistema, se dispone de 2 conectores de 6 pines.

Se incorporaron dos divisores de tensión, conformados por resistencias y potenciómetros de $10K\Omega$, a manera de obtener los voltajes de referencia externa para el conversor análogo digital del microcontrolador. Estos voltajes quedan así limitados a un rango de 0V a 1.5V para el voltaje de referencia negativo y de 1.5V a 3V para el positivo.

Los voltajes de referencia son importantes porque con ellos se puede seleccionar el rango dentro del cual se desea hacer la conversión.

3.5. Circuito Impreso

Para el diseño del circuito impreso se utilizó un programa de dibujo vectorial de propósito general denominado Corel Draw, en lugar de utilizar un programa específico para circuitos impresos; esto debido a que la tarjeta se elaboraría de manera artesanal y dichos programas imponían ciertas dificultades para el diseño del circuito al hacerlo de esta manera.

El método artesanal al que se hace referencia, consiste en plasmar sobre el cobre el dibujo de las pistas, aplicando calor a través de una plancha sobre el papel en el que ha sido impreso.

Posteriormente, la placa con el papel se sumerge en agua y se espera a que se humedezca completamente el papel. Luego, este es removido por fricción, quedando adherido al cobre, el tóner usado para la impresión.

Una vez realizado este proceso, la placa se sumerge en cloruro férrico por unos 20 minutos, de forma tal que se corree el cobre que no se encuentra protegido por el tóner. A continuación, se realizan las perforaciones y se procede a soldar los componentes. Finalmente, se procede a limpiar la cara de soldadura y a proteger las pistas con una capa de silicón en aerosol.

En el programa de dibujo se realizaron esquemas para la cara de serigrafía, en la cual se encuentran todos los componentes de la tarjeta, y para la cara de soldadura, que muestra las conexiones entre estos componentes; es decir, las pistas.

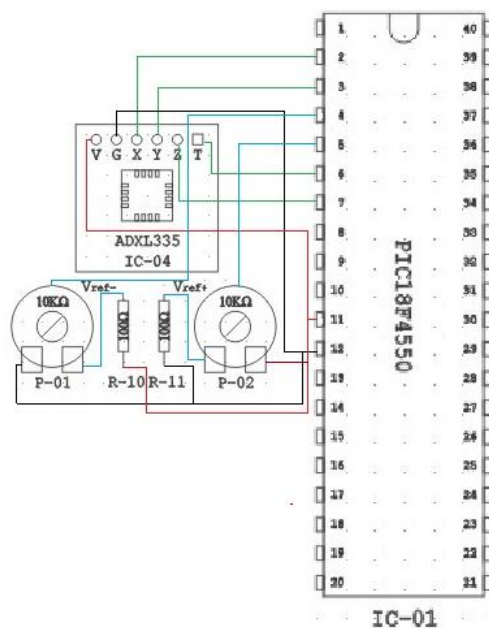


Figura 47: Conexión ADXL335

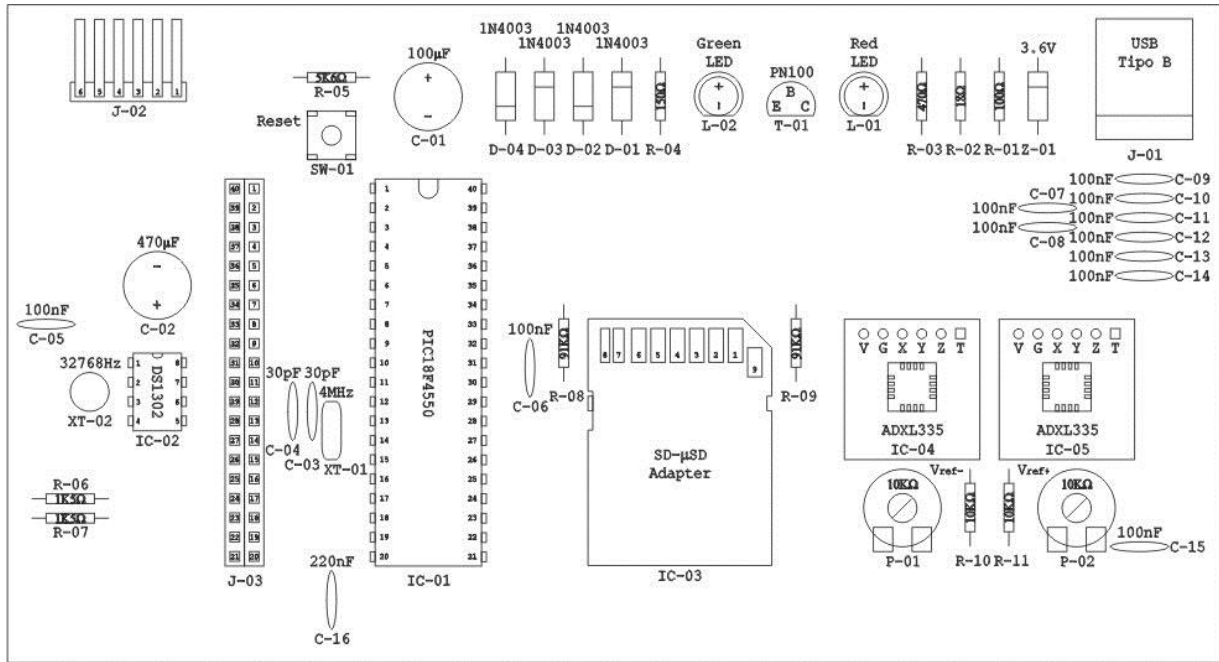


Figura 48: Cara de Serigrafía

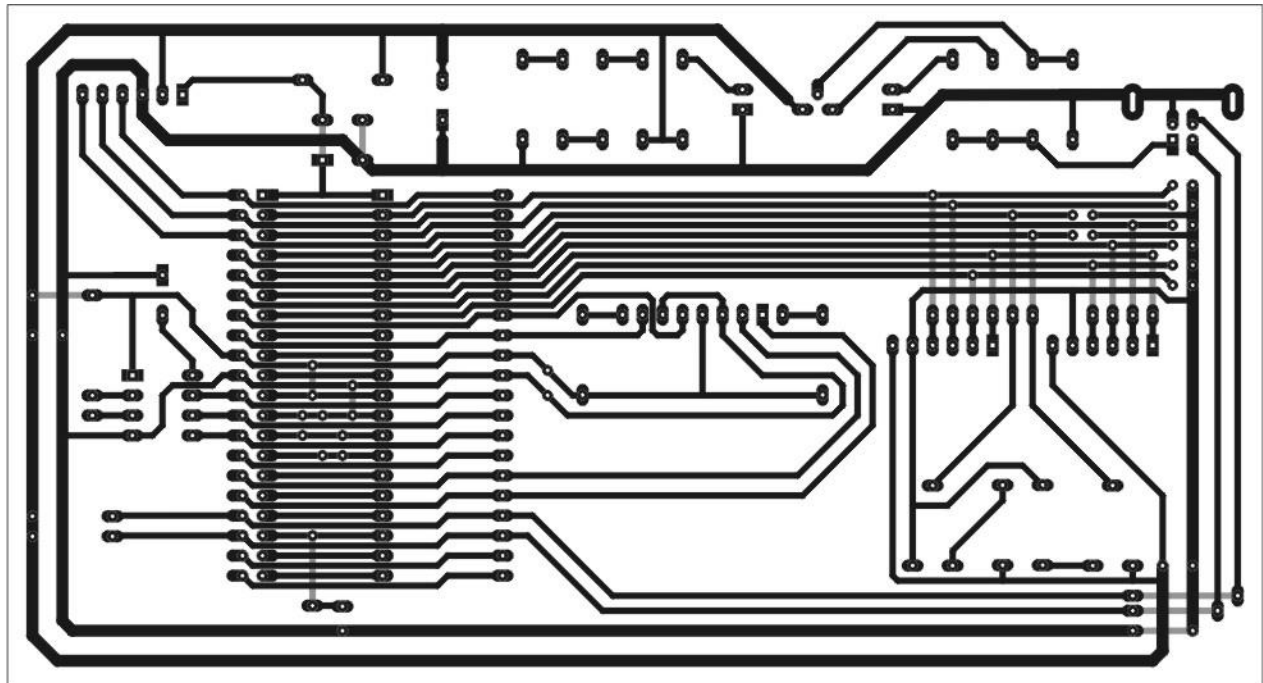


Figura 49: Cara de Soldadura

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SOFTWARE

Para la configuración y el manejo del sistema se desarrolló el software necesario, tanto para el microcontrolador como para el computador. El software del microcontrolador, también llamado “firmware”, configura e inicializa el sistema y responde a comandos enviados desde el computador. Por su parte, el software de este último, se encarga del envío de los comandos para la realización de tareas específicas, tales como: actualizar o leer la información del reloj, leer un determinado sector de la memoria microSD, iniciar la adquisición de datos y su visualización en pantalla, a través de gráficas independientes para cada uno de los ejes del acelerómetro.

Los comandos están conformados por una secuencia de bytes: el primero o byte de inicio, es un código que indica la operación que se desea realizar. Seguidamente, se envía un número variable de bytes, que corresponde al argumento del comando, y finalmente, un byte que termina la secuencia. El microcontrolador responde a estos comandos realizando alguna tarea o devolviendo los datos que hayan sido solicitados.

Para el programa del PIC, se utilizó el lenguaje de programación C, en el compilador MPLAB IDE C18, mientras que para el software de la computadora, se usó el lenguaje Visual Basic, en el entorno de programación Visual Studio.

4.1. Software del Computador

El software del computador cuenta con una interfaz gráfica, que permite la interacción con el usuario. Al iniciar el programa, se llama a una rutina de reconocimiento automático del puerto serial virtual que se utilizará como canal de comunicación con el sistema y como indicativo de que ha sido reconocido, en la barra de título se muestra el número del puerto donde se ha conectado.

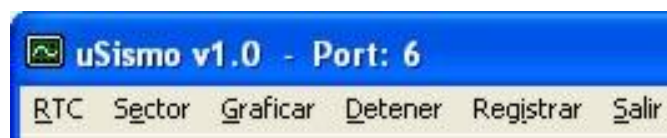


Figura 50: Menú de la Interfaz Gráfica

La interfaz cuenta con una barra de menú con las siguientes opciones: RTC, Sector, Graficar, Detener, Registrar y Salir. La opción RTC hace uso de una ventana donde es posible leer la hora y fecha proporcionada por el integrado DS1302, además, permite actualizar la información contenida en este dispositivo. Esta ventana dispone de 6 cajas de texto que fueron programadas para sólo aceptar caracteres numéricos.

En las cajas de texto de los segundos y minutos el rango se extiende desde 0 a 59, mientras que en la de la hora es de 0 a 23. Para los días del mes, el rango va de 1 a 31, mientras que el de los meses se extiende de 1 a 12 y en los años es de 2000 a 2099. Se cuenta con correcciones para los años bisiestos y para meses con menos de 31 días.

También, se puede seleccionar el día de la semana utilizando una lista de selección.

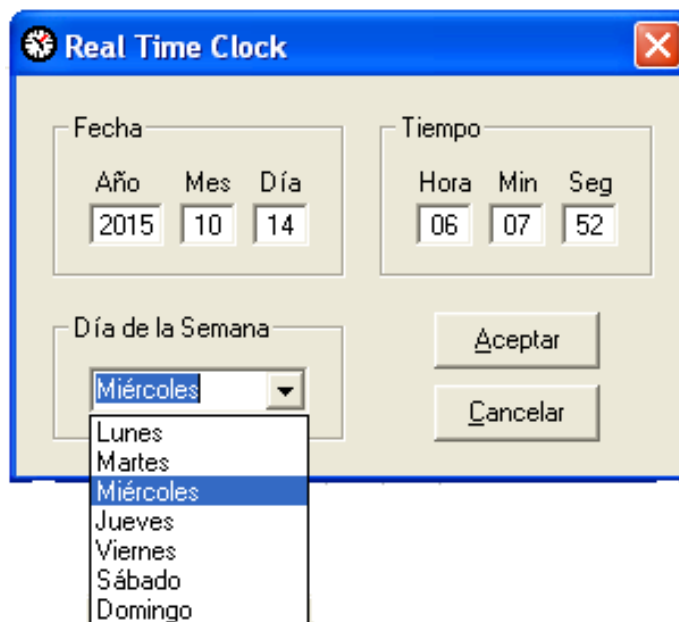


Figura 51: Ventana RTC

La opción Sector, también hace uso de una ventana donde se puede seleccionar el sector de la memoria que se desea leer. Para ello, cuenta con una caja de texto que permite ingresar su número, una vez aceptada la información, se invoca una ventana en la cual se muestran, en hexadecimal, los 512 bytes de datos en un arreglo de 32x16. A su derecha se encuentra una columna que contiene los caracteres correspondientes.

Sector: 0x0000218 - (536)																	
Dir	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	Caracteres
0000	46	49	4C	45	4E	41	4D	45	20	20	20	20	09	53	54	41	FILENAME.....STA
0010	52	54	20	20	20	09	20	20	20	20	20	20	20	09	53		RT.....S
0020	54	4F	50	20	20	20	20	09	20	20	20	20	20	20	20	20	TOP.....
0030	09	23	20	53	41	4D	50	09	53	2F	73	20	20	20	0D	0A	.#.SAMP.S/s.....
0040	46	49	4C	45	30	30	30	30	2E	54	58	54	09	31	34	2F	FILE0000.TXT.14/
0050	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	31	37	3A	30	34	09	31	10/15.00:17:04.1
0060	34	2F	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	32	32	3A	32	38	4/10/15.00:22:28
0070	09	32	36	32	31	34	34	09	2D	2D	2D	2D	2D	2D	0D	0A	.262144.-----..
0080	46	49	4C	45	30	30	30	31	2E	54	58	54	09	31	34	2F	FILE0001.TXT.14/
0090	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	32	32	3A	32	38	09	31	10/15.00:22:28.1
00A0	34	2F	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	33	34	3A	31	30	4/10/15.00:34:10
00B0	09	32	36	32	31	34	34	09	2D	2D	2D	2D	2D	2D	0D	0A	.262144.-----..
00C0	46	49	4C	45	30	30	30	32	2E	54	58	54	09	31	34	2F	FILE0002.TXT.14/
00D0	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	33	34	3A	31	30	09	31	10/15.00:34:10.1
00E0	34	2F	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	34	35	3A	33	37	4/10/15.00:45:37
00F0	09	32	36	32	31	34	34	09	2D	2D	2D	2D	2D	2D	0D	0A	.262144.-----..
0100	46	49	4C	45	30	30	30	33	2E	54	58	54	09	31	34	2F	FILE0003.TXT.14/
0110	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	34	35	3A	33	37	09	31	10/15.00:45:37.1
0120	34	2F	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	35	36	3A	35	32	4/10/15.00:56:52
0130	09	32	36	32	31	34	34	09	2D	2D	2D	2D	2D	2D	0D	0A	.262144.-----..
0140	46	49	4C	45	30	30	30	34	2E	54	58	54	09	31	34	2F	FILE0004.TXT.14/
0150	31	30	2F	31	35	09	30	30	3A	35	36	3A	35	32	09	31	10/15.00:56:52.1
0160	34	2F	31	30	2F	31	35	09	30	31	3A	30	38	3A	33	32	4/10/15.01:08:32
0170	09	32	36	32	31	34	34	09	2D	2D	2D	2D	2D	2D	0D	0A	.262144.-----..
0180	46	49	4C	45	30	30	30	35	2E	54	58	54	09	31	34	2F	FILE0005.TXT.14/
0190	31	30	2F	31	35	09	30	31	3A	30	38	3A	33	32	09	31	10/15.01:08:32.1
01A0	34	2F	31	30	2F	31	35	09	30	31	3A	31	39	3A	35	38	4/10/15.01:19:58
01B0	09	32	36	32	31	34	34	09	2D	2D	2D	2D	2D	2D	0D	0A	.262144.-----..
01C0	46	49	4C	45	30	30	30	36	2E	54	58	54	09	31	34	2F	FILE0006.TXT.14/
01D0	31	30	2F	31	35	09	30	31	3A	31	39	3A	35	38	09	31	10/15.01:19:58.1
01E0	34	2F	31	30	2F	31	35	09	30	31	3A	33	31	3A	31	32	4/10/15.01:31:12
01F0	09	32	36	32	31	34	34	09	2D	2D	2D	2D	2D	2D	0D	0A	.262144.-----..

Figura 52: Ventana del Sector

En la opción Graficar se habilitan tres gráficos para visualizar las diferentes señales provenientes del acelerómetro (X, Y, Z). A petición del programa del PC, el microcontrolador digitaliza estas tres señales y envía los datos a través del USB. Al escoger la opción Detener, se finaliza el proceso de digitalización y envío de datos.

La opción Registrar se encarga de iniciar el proceso de adquisición y almacenamiento de los datos en la microSD, en una cantidad determinada de archivos, que han sido previamente creados. Para esto, se habilita la digitalización de las señales y se almacenan, temporalmente, los datos en un búfer de 512 bytes y luego son transferidos a la memoria.

Finalmente, la opción Salir permite terminar la comunicación PIC - USB y cerrar la interfaz gráfica.

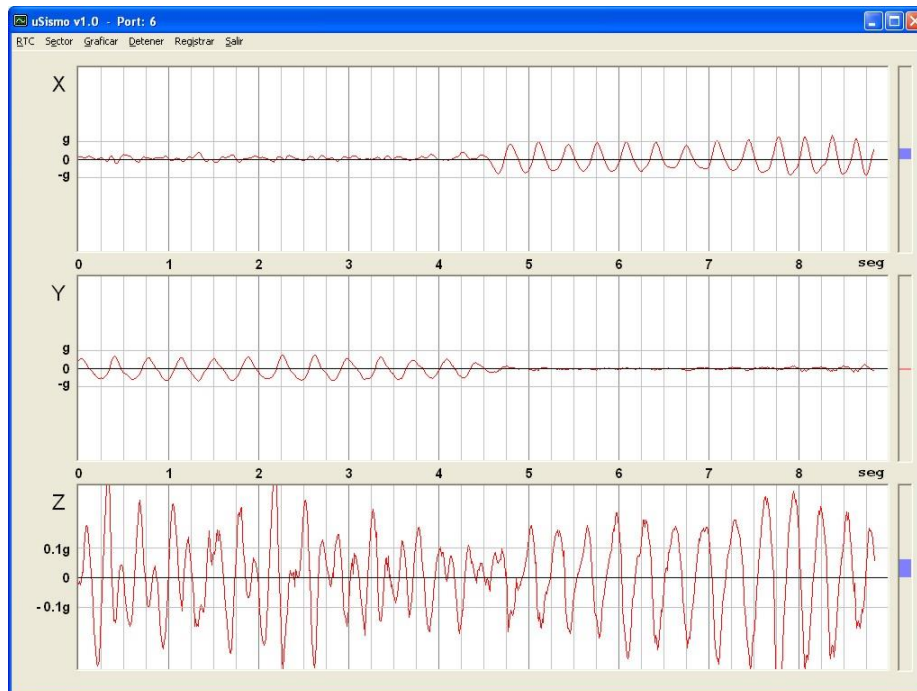


Figura 53: Señales del ADXL335

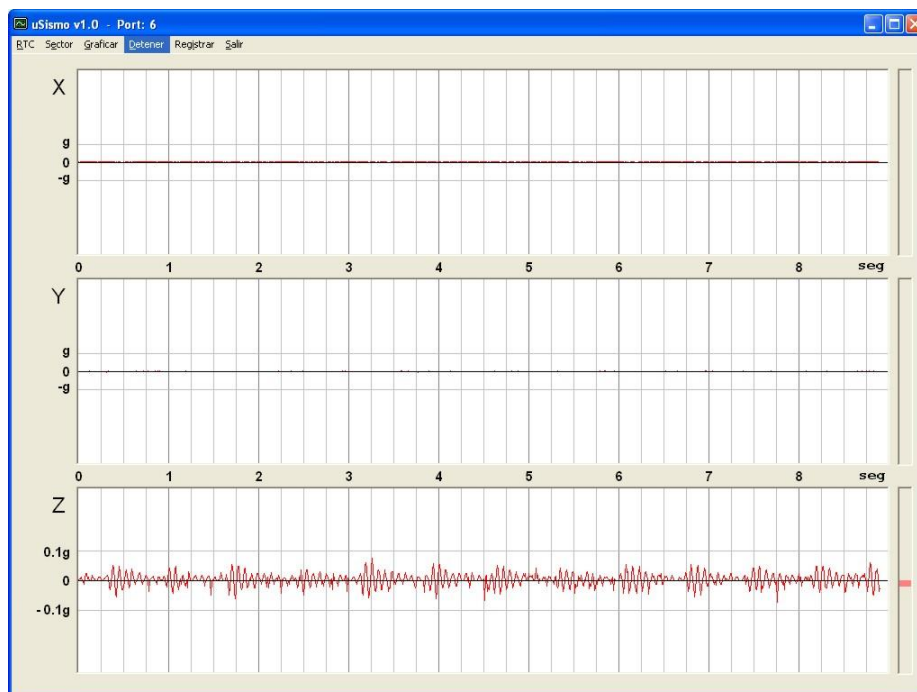


Figura 54: Señales del ADXL335 (2)

4.2. Archivos Contenedores

Para poder leer la información en cualquier computador, se han creado 468 archivos de 4 MBytes cada uno, en los cuales el microcontrolador almacena los datos derivados de la digitalización. Además, se tiene un archivo donde se guarda, para cada uno de los anteriores, el instante en el cual se inició el registro y el momento en el que finaliza, también el número de datos que contiene y la tasa de muestreo.

Al momento de escribir en la memoria microSD, el PIC no reconoce la estructura de archivos, tan solo se limita a modificar el contenido de los sectores de memoria reservados para los archivos contenedores. Por su parte, el computador sí reconoce esta estructura y puede recuperar la información que ha sido almacenada en los archivos contenedores. Estos pueden albergar hasta 262144 muestras, entendiéndose como muestra los valores de la aceleración de los tres ejes.

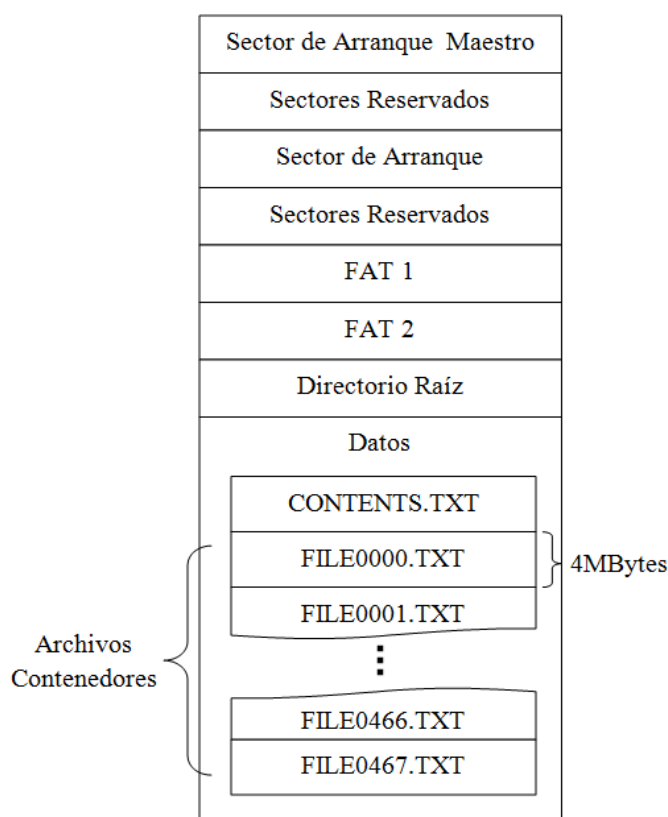
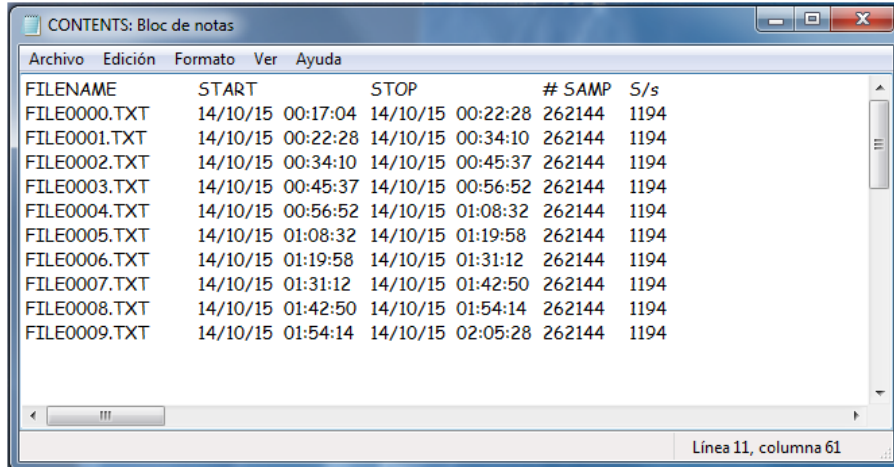


Figura 55: Estructura de Archivos Contenedores

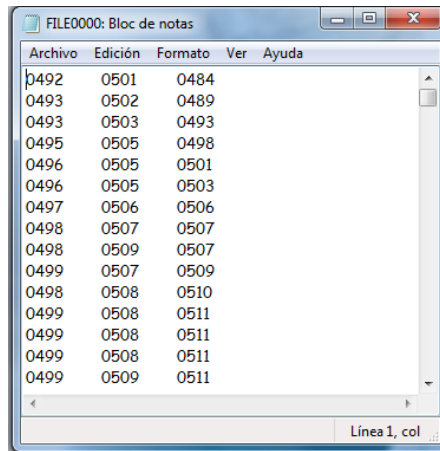
En esta pequeña memoria de 2GB, se tienen más de 4 millones de sectores. Los archivos contenedores ocupan 4MBytes, equivalentes a 8192 sectores de la memoria y en cada sector, se pueden almacenar 32 datos del vector aceleración, de manera que en cada archivo se almacenan 262144.

Los datos se guardan en formato de texto en tres columnas, separadas por tabulaciones, que contienen los valores de X, Y, Z.



FILENAME	START	STOP	# SAMP	S/s
FILE0000.TXT	14/10/15 00:17:04	14/10/15 00:22:28	262144	1194
FILE0001.TXT	14/10/15 00:22:28	14/10/15 00:34:10	262144	1194
FILE0002.TXT	14/10/15 00:34:10	14/10/15 00:45:37	262144	1194
FILE0003.TXT	14/10/15 00:45:37	14/10/15 00:56:52	262144	1194
FILE0004.TXT	14/10/15 00:56:52	14/10/15 01:08:32	262144	1194
FILE0005.TXT	14/10/15 01:08:32	14/10/15 01:19:58	262144	1194
FILE0006.TXT	14/10/15 01:19:58	14/10/15 01:31:12	262144	1194
FILE0007.TXT	14/10/15 01:31:12	14/10/15 01:42:50	262144	1194
FILE0008.TXT	14/10/15 01:42:50	14/10/15 01:54:14	262144	1194
FILE0009.TXT	14/10/15 01:54:14	14/10/15 02:05:28	262144	1194

Figura 56: Archivo CONTENTS.TXT



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0492	0501	0484		
0493	0502	0489		
0493	0503	0493		
0495	0505	0498		
0496	0505	0501		
0496	0505	0503		
0497	0506	0506		
0498	0507	0507		
0498	0509	0507		
0499	0507	0509		
0498	0508	0510		
0499	0508	0511		
0499	0508	0511		
0499	0508	0511		
0499	0509	0511		

Figura 57: Archivo Contenedor

4.3. Firmware del Microcontrolador

El firmware del microcontrolador es el encargado de configurar y poner en marcha el sistema, es decir, que configura los módulos MSSP, USB y el módulo del convertor análogo-digital a fin de poder realizar las funciones que le solicita el computador. Algunas de estas funciones son manejadas a través de las interrupciones del PIC, es decir, que al producirse el evento, el PIC deja de ejecutar momentáneamente las tareas que venía realizando para atender la interrupción; pues se le da prioridad.

Para su implementación, se hace uso de un grupo de librerías desarrolladas por Microchip y tres librerías más: ADXL335.h/c, microSD.h/c y DS1302.h/c, elaboradas como parte de este trabajo.

La implementación del firmware del sistema, implica la generación 11942 instrucciones a nivel de assembler y la utilización 1319 registros de la memoria RAM, es decir, el 73% de la memoria de programa y 65% de la memoria de datos del microcontrolador.

4.3.1. Configuración del USB

Cuando se inicia el sistema, el programa del microcontrolador se encarga de habilitar el módulo para el USB, esto es, configura el regulador interno y las resistencias de pull-up, la frecuencia del reloj, endpoints, descriptores y transferencias. Todo esto se logra haciendo uso de la librería MCHPUSB, la cual contiene diversos recursos; entre los que se encuentra una herramienta denominada CDC (Communication Device Class), que permite establecer una comunicación con una velocidad máxima de 80KBytes por segundo y opera con las transferencias tipo Bulk e Interrupción. Además, cuenta con un driver estándar para el sistema operativo del computador.

De esta herramienta se tomó el programa Demo Basic CDC, el cual se adaptó al PIC18F4550, puesto que este programa era utilizado para un conjunto de tarjetas de Microchip. Luego se depuró y se organizó para que sirviera como aplicación base para el resto del programa.

Al usar esta herramienta se crea, a través de la conexión USB, un puerto serial virtual, lo cual permite que la comunicación PIC-PC se desarrolle como si se tratase del puerto serial físico. Esto supone una gran ayuda, puesto que el lenguaje de programación utilizado dispone de complementos que facilitan el manejo de este puerto.

4.3.1. Configuración del Módulo de Conversión

Para la digitalización de las señales provenientes del ADXL335, se hizo uso de dos librerías: ADC.h, creada por Microchip, y ADXL335.h/c.

La librería ADC.h está relacionada con el manejo y configuración del conversor análogo-digital incorporado en el PIC, consta de siete funciones: OpenADC, ConvertADC, ReadADC, BusyADC, SetChanADC y CloseADC.

La primera, es utilizada para ajustar el módulo del conversor, es decir, con esta función se escoge la frecuencia del reloj, la justificación de la conversión, el tiempo de adquisición de los

datos, el canal que se utilizará para la conversión y la cantidad de entradas del PIC que se definirán como analógicas. Además, permite seleccionar si se desea utilizar los voltajes de referencia. La segunda, se encarga de iniciar el proceso de conversión, mientras que ReadADC lee el resultado de la conversión y lo retorna un número entero. Por su parte, BusyADC permite conocer si la conversión continúa en proceso o si ha terminado. SetChanADC es utilizada para seleccionar el canal y CloseADC, simplemente, deshabilita el módulo.

Por su parte, la librería ADXL335.h sólo tiene una función, ameter1_read, y es responsable de tomar los datos de tres canales distintos (Canal 0, Canal 1, Canal 4), los cuales digitalizan las señales del acelerómetro y envían los datos al computador por medio del USB. Cuando esta función es solicitada, se genera una interrupción en el PIC, puesto que responde a una solicitud del computador.

4.3.2. Configuración del RTC

Para poder leer y actualizar la fecha y hora del RTC DS1302, se desarrolló una librería llamada DS1302.h/c, que no sólo implementa el protocolo de comunicación del integrado, sino que cuenta con las funciones: rtc_init, rtc_write y rtc_read.

En la inicialización del sistema se hace uso de rtc_init, que selecciona las líneas necesarias para la comunicación, enciende el reloj y configura el circuito interno Trickle-Charger.

A nivel de interrupción, se utilizan dos funciones. La primera se encarga de actualizar la fecha y hora en el integrado, con la información que se le envía desde el computador, mientras que la segunda, lee la hora y fecha proporcionada por el DS1302, para ser enviada hacia el computador.

4.3.3. Configuración de la Memoria microSD

La utilización de la microSD depende de la configuración del protocolo SPI, mediante el cual es posible leer y guardar datos de un determinado sector de la memoria. Para esto, se hizo uso de la librería MDD File System, proporcionada por Microchip. Dentro de esta librería se tienen dos subconjuntos: el SD-SPI.h, que consta de 8 funciones, entre las que destacan: MDD_SDSPI_InitIO que inicializa las líneas para la comunicación, MDD_SDSPI_MediaDetect, la cual detecta si la tarjeta se encuentra conectada y si está habilitado el protocolo SPI. Si está encendido, la función inicializa la tarjeta de memoria, en caso contrario, lo enciende y luego realiza la inicialización. Además, se cuenta con MDD_SDSPI_SectorRead, que se encarga de leer un sector de 512 bytes y almacenarlos en el búfer del USB, para ser enviados al computador.

Seguidamente, se tiene la función `MDD_SDSPI_SectorWrite`, que se encarga de recibir un bloque de 512 bytes y de escribirlos en la memoria SD. Finalmente, `MDD_SDSPI_ShutdownMedia` deshabilita el protocolo SPI y la microSD.

Además, se tiene el `FSIO`, con el cual se pueden crear, modificar y borrar archivos, permite crear directorios y formatear la memoria. Pero, no fue posible su implementación debido a la cantidad de recursos necesarios para su implementación. Se hicieron esfuerzos para reducir el número de instrucciones, sacrificando funcionalidad, aun así no fue posible por limitaciones en la memoria RAM del PIC.

Adicionalmente, para la transferencia de datos de la memoria hacia el computador, se implementó la librería `microSD.h/c`.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Se construyó una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador PIC18F4550, la cual se mantiene fiel al diseño original, salvo por pequeñas modificaciones: fueron retiradas las resistencias de pull-up externas, que estaban conectadas a las líneas D+ y D- del USB, ya que se optó por hacer uso de las resistencias internas del microcontrolador. La tarjeta no necesita una fuente de alimentación externa; pues a partir del voltaje suministrado por el USB, se obtienen los 3V necesarios para el funcionamiento del sistema, gracias a la implementación de un regulador construido con componentes discretos. El USB sustituye el puerto serial, que se ha dejado de incorporar en los computadores desde hace varios años. Para minimizar el impacto en el software en el computador, se utiliza un puerto serial virtual, desarrollado por Microchip, que facilita la implementación del canal de comunicación, dado que se evita la creación de un driver específico para el dispositivo y que, además, sea compatible con el sistema operativo que se utilice.



Figura 58: Tarjeta de Desarrollo



Figura 59: Tarjeta de Desarrollo (2)

Para el etiquetado temporal de los datos se incorporó al sistema un reloj de tiempo real DS1302, el cual utiliza un protocolo de comunicación de 3 hilos. Dado que este protocolo de comunicación no es soportado por el hardware del PIC18F4550, se desarrolló una librería a la que hemos llamado DS1302.h/c, que implementa dicho protocolo por medio de software y contiene las funciones de configuración, lectura y escritura del reloj.

Cuando se utiliza el microcontrolador, la lectura y escritura en la memoria microSD se realiza en sectores, que pertenecen a unos archivos previamente creados desde el computador y que se apegan al sistema FAT16. De esta forma, los datos almacenados por el PIC pueden ser recuperados en el computador.

El primer archivo denominado “CONTENTS.TXT” recopila la información de los archivos utilizados para almacenar los datos y el resto de ellos actúan como contenedores.

El conversor análogo-digital permite alcanzar una tasa de muestreo máxima de 1194 muestras por segundo; sin embargo, con el USB no es posible alcanzar tales velocidades, así que la tasa máxima de transferencia hacia el computador, se ve limitada a 200 muestras por segundo.

Cuando se utiliza la memoria para registrar los datos, se puede alcanzar una tasa de muestreo promedio de 380 muestras por segundo, pero de forma pulsada, ya que mientras se escribe en la microSD, se detiene el proceso de digitalización. Si se desea un muestreo continuo, es necesario respetar el tiempo de escritura en la memoria, que experimentalmente se encontró que varía de 6ms hasta 136ms de forma no determinada. En este caso se podría

tomar una muestra cada 136ms, con lo cual la tasa de muestreo se reduce a menos de 8 muestras por segundo.

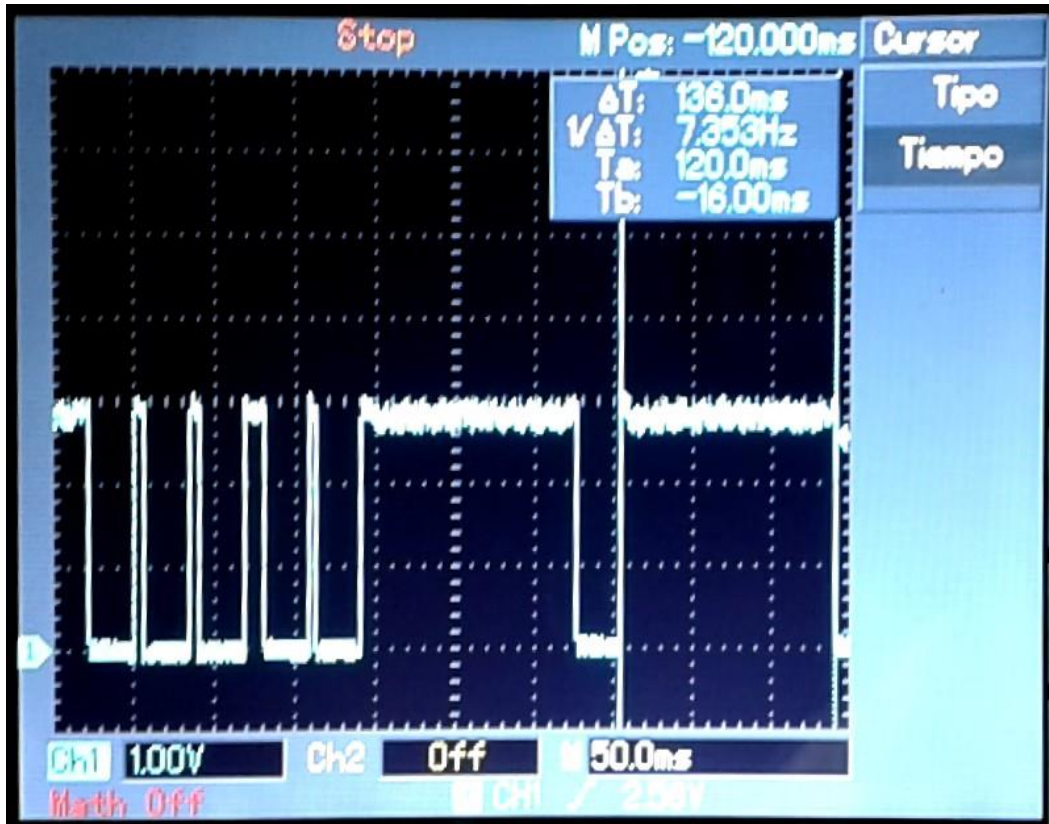


Figura 60: Tiempo de Escritura en la microSD

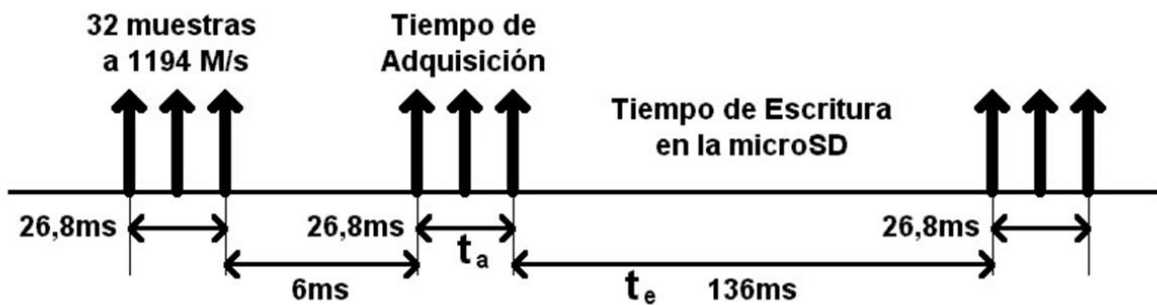


Figura 61: Tiempo de Escritura en la microSD (2)

El tiempo que toma llenar un archivo contenedor es aproximadamente 687 segundos. Esto, tomando en cuenta el tiempo de adquisición, que permanece constante, y el de escritura en la microSD. En los 26,8ms que demora la adquisición, se toman 32 muestras a una velocidad de 1194M/s.

Para llenar cada archivo se deben escribir 8192, es decir que el tiempo total de adquisición es de 220 segundos, con lo cual se tiene la memoria tarda 467 segundos en escribir las 262144 muestras que se tienen en cada archivo. Entonces, la tasa promedio de escritura en la microSD es de 560M/s, mientras que la tasa promedio de muestreo es de 380M/s. Con este resultado, se tiene que aunque se pudiera guardar de forma temporal los datos digitalizados y luego transferirlos a la memoria, la máxima velocidad con la cual pudiera hacerlo sería de 560M/s.

El acelerómetro opera en una frecuencia de 500Hz, es decir que por el teorema de Nyquist, el cual establece que la tasa de muestreo debe ser al doble del ancho de banda, se hace necesario muestrear a una velocidad de 1000M/s, sin embargo esto no es posible con la microSD, por lo cual se haría necesario registrar los datos digitalizados en una memoria temporal y posteriormente, enviarlos a la microSD.

Cuando el sistema es alimentado a través del USB, el nivel de ruido en las señales analógicas provenientes del acelerómetro, alcanza valores en el orden de 100mV_p, cuando se alimenta con el programador, se alcanzan valores de 50mV_p y al hacerlo con una batería de litio, no supera los 10mV_p.

El valor de la corriente de alimentación alcanza los 110mA cuando se escribe en la memoria microSD y disminuye a 80mA cuando esta se encuentra inactiva.

La apreciación para los ejes X e Y, que utilizan como voltajes de referencia V_{DD} y V_{SS}, es de 0,01g y para el eje Z, que emplea los voltajes de referencia externos, es de 0,003g. La utilización de los voltajes de referencia externos permite eliminar de la medición, la aceleración estática presente en el eje Z, debido a la aceleración de gravedad.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema digital basado en el microcontrolador PIC18F4550 que permite medir y almacenar en una memoria microSD las señales provenientes del acelerómetro capacitivo ADXL335.

Se implementó un puerto serial virtual sobre una conexión USB, que permite la comunicación entre el sistema y el computador.

Se incorporó al sistema un reloj de tiempo real DS1302 para el etiquetado temporal de los datos. Para su manejo se desarrolló una librería, DS1302.h/c, que permite configurar, leer y escribir en el reloj.

Se logró almacenar la información en la memoria microSD, utilizando archivos previamente creados y respetando el sistema FAT16.

El conversor análogo-digital permite alcanzar una tasa máxima de muestreo de 1194 muestras por segundo.

Cuando se transmiten los datos hacia el computador para su visualización en tiempo real, se alcanza una tasa de muestreo de 200 M/s.

Cuando se guarda la información en la memoria microSD, se puede alcanzar una tasa de muestreo promedio de 364 M/s de manera pulsada y una tasa de muestreo continuo de 8M/s.

El nivel de ruido presente en las señales analógicas mejora en un factor de 10 cuando se alimenta con una batería de litio, respecto a cuando se alimenta a través del USB.

La apreciación para el eje X e Y es de 0,01g, mientras que para el eje Z es de 0,003g.

El sistema digital desarrollado, resulta una herramienta de entrenamiento adecuada para trabajar con un microcontrolador más avanzado a los utilizados, comúnmente, en el Laboratorio Docente de Instrumentación y con el lenguaje de programación C18.

RECOMENDACIONES

Para la implementación del sistema de archivos FAT, empleando las librerías que Microchip pone a disposición, es necesario utilizar un microcontrolador con al menos 48KB de memoria de programa y 4KB de memoria RAM. Con estas especificaciones se tienen, por ejemplo, los PIC18F8622 y PIC18F2620.

Para mejorar la tasa de muestreo de la memoria microSD, se podría implementar al sistema una memoria RAM de 64KBytes, como por ejemplo la memoria FM25V10.

Para lograr una mejor apreciación, se podría utilizar un conversor análogo-digital de mayor resolución. Otra posibilidad es sustituir los potenciómetros que se encuentran conectados a las entradas de referencia del conversor, por potenciómetros digitales, a fin de que estos voltajes puedan ser dinámicos y realizar los ajustes necesarios de forma independiente en cada eje.

Para reducir el nivel de ruido en las señales analógicas, es recomendable alimentar el sistema con baterías y preferiblemente, usando una batería independiente para el acelerómetro y las referencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TRABAJOS CITADOS

- [1] E. Farfán Suárez, Acondicionamiento de Señal Proveniente de un Acelerómetro MEMS, México, D.F: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [2] H. Hernández Arias, Diseño e Implementación de una Interfaz de Registro de Datos Para la Unidad Sísmica SR04, México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [3] J. P. Azcona, «Encontrarte Aporrea,» [En línea]. Available: <http://encontrarte.aporrea.org/media/56/la%20exploracion.pdf>. [Último acceso: 25 Julio 2015].
- [4] J. Cavada, «Geocities,» Mayo 2000. [En línea]. Available: <http://www.geocities.ws/geofisicaucv/Archivos/refracc4.pdf>. [Último acceso: 26 Julio 2015].
- [5] G. J. Guariguata Rojas, Levantamiento Sísmico de Refracción Somera en el Área Occidental de el Hatillo, al Norte del Poblado de Urumaco, Estado Falcón, Universidad Simón Bolívar, 2008.
- [6] J. A. González Díaz, Estimación de Parámetros Geotécnicos por Métodos Geofísicos en la Ciudad Universitaria de Caracas - Universidad Central de Venezuela, Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2011.
- [7] IGEO, «Instituto de Geociencias,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.igeo.ucm-csic.es/cultura-cientifica/divulgacion/228igeo>. [Último acceso: 1 Agosto 2015].
- [8] J. García G, Caracterización Geofísica del Área Noreste de la Cuenca Barina-Apure (Estado Barinas) Mediante el Análisis de Microtremores (Método de Nakamura), Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2014.
- [9] R. J. Contreras G., «Ciencia Recreativa,» 18 Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://ciencia.digital.info.ve/2015/05/el-sensor-sismico-geofono.html>. [Último acceso: 26 Julio 2015].
- [10] F. Miyara, «Fceia,» [En línea]. Available: <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/adxl05.pdf>. [Último acceso: 10 Julio 2015].

- [11] Microchip, *PIC18F2455/2550/4455/4550*, Microchip Technology, 2009.
- [12] «<http://www.todopic.com.ar>,» 3 Enero 2011. [En línea]. Available: <http://www.todopic.com.ar/foros/index.php?topic=28952.40>. [Último acceso: 16 Septiembre 2015].
- [13] F. Remiro Dominguez, «PlumaBot,» Programa ARCE, [En línea]. Available: http://www.plumabot.es/moodle/file.php/31/Transparencias_PIC16F88X/Los_PIC16F87X_MSSP_modulo_SPI.pdf. [Último acceso: 25 Septiembre 2015].
- [14] J. Moyano, «Scribd,» 16 Febrero 2010. [En línea]. Available: <http://es.scribd.com/doc/38125530/Pic18f2550-y-Usb#scribd>. [Último acceso: 28 Agosto 2015].
- [15] J. Osio, L. Antonini, W. Aróztegui y J. Rapallini, Descripción General de un Microcontrolador (Módulos de Comunicación), Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata, 2011.
- [16] M. I. Products, *DS1302 Tickle-Charge Timekeeping Chip*, Sunnyvale: Maxim Integrated Products, 2015.
- [17] F. A. Rodríguez Ruiz y K. M. Rivas Vásquez, Sistema Inalámbrico para la Lectura Automatizada de Consumo de Electricidad Utilizando Tecnología GSM, Soyapango: Universidad Don Bosco, 2006.
- [18] R. Casillas Martín, Desarrollo de una Librería Para dsPIC33F Para Lectura de Tarjetas microSD en un Dispositivo Inercial, Universidad Politécnica de Catalunya, 2013.
- [19] A. Á. Hernández López, Registro de Datos en Tarjetas de Memoria SD CARD Implementando los Sistemas de Archivos FAT16 y FAT32, México, D.F: Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [20] D. Ibrahim, *SD Card Projects Using the PIC Microcontroller*, Elsevier, 2010.
- [21] I. Lasso, «Proyecto Autodidacta,» 20 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www.proyectoautodidacta.com/comics/que-es-un-sistema-de-archivos/>. [Último acceso: 26 Septiembre 2015].
- [22] AnalogDevice, *Small, Low Power, 3-Axis ±3g Accelerometer ADXL335*, Norwood: Analog Device, 2009.
- [23] SanDisk, *SanDisk Secure Digital Card*, Sunnyvale: SanDisk Corporation, 2003.
- [24] K. Navarro, «Panama Hitek,» 15 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://panamahitek.com/como-funciona-el-protocolo-spi/>. [Último acceso: 20 Junio 2015].

- [25] M. P. García Juárez, Tarjeta de Adquisición de Datos con interfaz USB, empleando al Microcontrolador AT90USB646 de ATMEL, Huajuapán de León: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2013.
- [26] O. Saavedra Morales, Análisis de Ondas Sísmicas en Entorno Matlab, México, D.F: Instituto Politécnico Nacional, 2013.

APÉNDICES

1.2. Product Models

The SD Card is available in the capacities shown in Table 1-1.

Table 1-1. SD Card Capacities

Model No.	Capacities
SDSDB-16	16 MB
SDSDB-32	32 MB
SDSDJ-64	64 MB
SDSDJ-128	128 MB
SDSDJ-256	256 MB
SDSDJ-512	512 MB
SDSDJ-1024	1024 MB

SDSDB = Binary NAND technology.

SDSDJ = Multi Level Cell (MLC) NAND technology.

1.3. System Features

The SD Card provides the following features:

- Up to 1-GB of data storage.
- SD Card protocol compatible.
- Supports SPI Mode.
- Targeted for portable and stationary applications for secured (copyrights protected) and non-secured data storage.
- Voltage range:
 - Basic communication (CMD0, CMD15, CMD55, ACMD41): 2.0—3.6V.
 - Other commands and memory access: 2.7—3.6V.
- Variable clock rate 0—25 MHZ.
- Up to 12.5 MB/sec data transfer rate (using 4 parallel data lines).
- Maximum data rate with up to 10 cards.
- Correction of memory field errors.
- Copyrights Protection Mechanism—Complies with highest security of SDMI standard.
- Password Protected of Cards (not on all models).
- Write Protect feature using mechanical switch.
- Built-in write protection features (permanent and temporary).
- Card Detection (Insertion/Removal).
- Application specific commands.



MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 Endpoints (16 bidirectional)
- 1 Kbyte Dual Access RAM for USB
- On-Chip USB Transceiver with On-Chip Voltage Regulator
- Interface for Off-Chip USB Transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, Peripherals on
- Idle: CPU off, Peripherals on
- Sleep: CPU off, Peripherals off
- Idle mode Currents Down to 5.8 μ A Typical
- Sleep mode Currents Down to 0.1 μ A Typical
- Timer1 Oscillator: 1.1 μ A Typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A Typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes, including High-Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, Up to 48 MHz
- Internal Oscillator Block:
 - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual Oscillator Options allow Microcontroller and USB module to Run at Different Clock Speeds
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High-Current Sink/Source: 25 mA/25 mA
- Three External Interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 5.2 ns ($T_{cy}/16$)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 83.3 ns (T_{cy})
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-shutdown and auto-restart
- Enhanced USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module Supporting 3-Wire SPI (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-Bit, Up to 13-Channel Analog-to-Digital Converter (A/D) module with Programmable Acquisition Time
- Dual Analog Comparators with Input Multiplexing

Special Microcontroller Features:

- C Compiler Optimized Architecture with Optional Extended Instruction Set
- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory Typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory Typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 Years
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via Two Pins
- In-Circuit Debug (ICD) via Two Pins
- Optional Dedicated ICD/ICSP Port (44-pin, TQFP package only)
- Wide Operating Voltage Range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	Comparators	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

Figura 63: Manual PIC18F4550 [11]



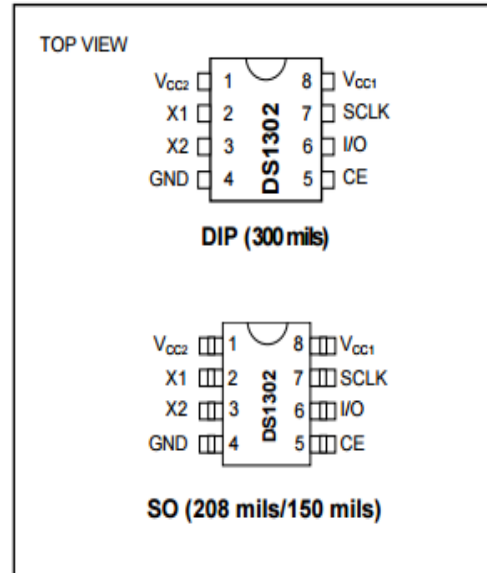
DS1302

Trickle-Charge Timekeeping Chip

BENEFITS AND FEATURES

- Completely Manages All Timekeeping Functions
 - Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Date of the Month, Month, Day of the Week, and Year with Leap-Year Compensation Valid Up to 2100
 - 31 x 8 Battery-Backed General-Purpose RAM
- Simple Serial Port Interfaces to Most Microcontrollers
 - Simple 3-Wire Interface
 - TTL-Compatible ($V_{CC} = 5V$)
 - Single-Byte or Multiple-Byte (Burst Mode) Data Transfer for Read or Write of Clock or RAM Data
- Low Power Operation Extends Battery Backup Run Time
 - 2.0V to 5.5V Full Operation
 - Uses Less Than 300nA at 2.0V
- 8-Pin DIP and 8-Pin SO Minimizes Required Space
- Optional Industrial Temperature Range: $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ Supports Operation in a Wide Range of Applications
- Underwriters Laboratories® (UL) Recognized

PIN CONFIGURATIONS



ORDERING INFORMATION

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	TOP MARK*
DS1302+	$0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$	8 PDIP (300 mils)	DS1302
DS1302N+	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$	8 PDIP (300 mils)	DS1302
DS1302S+	$0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$	8 SO (208 mils)	DS1302S
DS1302SN+	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$	8 SO (208 mils)	DS1302S
DS1302Z+	$0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$	8 SO (150 mils)	DS1302Z
DS1302ZN+	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$	8 SO (150 mils)	DS1302ZN

+Denotes a lead-free/RoHS-compliant package.

*An N anywhere on the top mark indicates an industrial temperature grade device. A + anywhere on the top mark indicates a lead-free device.

UL is a registered trademark of Underwriters Laboratories, Inc.



Small, Low Power, 3-Axis $\pm 3 g$ Accelerometer

ADXL335

FEATURES

- 3-axis sensing
- Small, low profile package
 - 4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm LFCSP
- Low power : 350 μ A (typical)
- Single-supply operation: 1.8 V to 3.6 V
- 10,000 g shock survival
- Excellent temperature stability
- BW adjustment with a single capacitor per axis
- RoHS/WEEE lead-free compliant

APPLICATIONS

- Cost sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications
 - Mobile devices
 - Gaming systems
 - Disk drive protection
 - Image stabilization
 - Sports and health devices

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of $\pm 3 g$. It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_x , C_y , and C_z capacitors at the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_LQ).

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

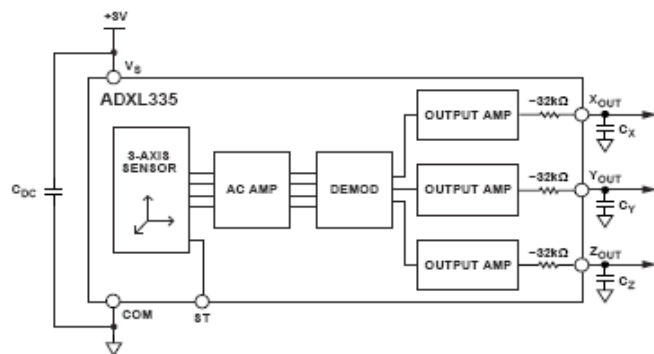


Figure 1.

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781.329.4700 www.analog.com
 Fax: 781.461.3113 ©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.