



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**CONSTRUCCIÓN Y EMPLAZAMIENTO DE UN PROTOTIPO DE
SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA PARA LA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CUENCA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTORES: DIEGO ENRIQUE CÁRDENAS BERZOSA

DIEGO PAUL SALAZAR BACULIMA

DIRECTOR: ING. JUAN MALDONADO NOBOA, MSc

CUENCA – ECUADOR

2020

*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*

DECLARACIÓN

Nosotros, Diego Enrique Cárdenas Berzosa Y Diego Paul Salazar Baculima, declaramos bajo juramento que el trabajo investigativo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



DIEGO ENRIQUE CÁRDENAS BERZOSA

C.I. 0105893408



DIEGO PAUL SALAZAR BACULIMA

C.I. 0106909658

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Enrique Cárdenas Berzosa Y Diego Paul Salazar Baculima, bajo mi supervisión.



Ing. Juan Sebastián Maldonado, MSc.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Primeramente, agradezco a Dios por darme salud y ser mi guía en todo momento de mi vida.

A mis padres, hermanos por ser un apoyo en las buenas y en las malas, han sido un pilar en todos mis pasos que he dado.

A mi esposa por ser mi compañera de lucha, por su amor incondicional, haber logrado ser profesionales es un orgullo para nuestra hija.

A mi hija por ser la persona quien me motivo día a día a no desmayar y a cumplir las metas que me proponga.

A mis suegros por ser como unos padres que siempre estuvieron presentes para apoyarme y ser un ejemplo.

-Diego Enrique Cárdenas Berzosa-

DEDICATORIA

A Dios por guiarme, acompañarme y darme la fuerza necesaria para continuar durante toda mi vida y ayudarme a salir adelante.

A mis padres Miguel y Leonor, por su amor, esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional he logrado cumplir con esta meta.

A mi hermano Juan y su familia Damaris, Mateo y Martin por siempre estar presentes y contar con su apoyo moral.

A mi hermano Miguel por ser nuestro guía durante este proceso, apoyarnos con su conocimiento y experiencia.

-Diego Paul Salazar Baculima-

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por permitirnos culminar con nuestros estudios, a la institución en la que nos desempeñamos como estudiantes universitarios y a sus profesores quienes nos impartieron su conocimiento y experiencias en el salón de clases.

Un agradecimiento especial a nuestro tutor el Ing. Juan Sebastián Maldonado, director de nuestra tesis, quien nos brindó su tiempo y ayuda, siendo un soporte fundamental durante la investigación y nos guió en todos los procesos para culminar con este trabajo.

Agradecemos al Ing. Miguel Salazar por su ayudarnos con sus conocimientos, enseñanzas, y brindarnos su tiempo para llevar a cabo este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	0
CERTIFICACIÓN	2
DEDICATORIA	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO I	13
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	13
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3 JUSTIFICACIÓN	15
1.4 HIPÓTESIS	16
CAPÍTULO II	17
MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO	17
2.1 BASES TEÓRICAS	17
2.1.1 Sistemas de alerta temprana sísmica	17
2.1.2 Sistemas de alerta temprana sísmica en el mundo	18
2.1.3 Instrumentación sísmica	18
2.1.4 Historia de la instrumentación sísmica	19
2.2 SISMÓGRAFOS	20
2.2.1 Sismógrafos en el mundo	20
2.2.2 Sismógrafos en Ecuador	21
2.3 ACELERÓGRAFOS	23
2.3.1 Acelerógrafos en el mundo	23
2.3.2 Acelerógrafos en Ecuador	23
2.4 HISTORIA SÍSMICA EN ECUADOR	25
2.4.1 Sismo del 16 de abril de 2016	26
2.5 ESCALAS SÍSMICAS	27
2.5.1 Escala de Richter	27
2.5.2 Escala Modificada de Mercalli (IMM)	28
2.5.3 Escala de Kanamori	29
2.5.4 Escala de Intensidad Msk-64	29
2.5.5 Escala de Intensidad EMS-98	30
2.5.6 Correlación de la aceleración con la Escala Modificada de Mercalli	31
2.6 ONDAS SÍSMICAS	32
2.6.1 Introducción	32
2.6.2 Ondas de Cuerpo	32
2.6.2.1 Ondas P	33
2.6.2.2 Ondas S	33
2.6.3 Ondas Superficiales	33
2.6.3.1 Ondas Rayleigh	34
2.6.3.2 Ondas Love	34
2.6.4 Software de análisis de ondas sísmicas	34
2.7 PLACAS TECTÓNICAS EN ECUADOR	37
2.7.1 Placa Nazca	37

2.7.2 Placa Sudamericana	37
2.8 CORDILLERA DE CARNEGIE	38
2.9 PELIGRO SÍSMICO, RIESGO SÍSMICO Y VULNERABILIDAD SÍSMICA	38
2.9.2 Conceptos	38
2.9.2 Teorema de Bayes	39
CAPÍTULO III	40
MODELO FÍSICO DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA	40
3.1 SENSORES	40
ADXL335	40
MMA7361	41
ADXL345	43
MPU6050	44
MPU9250	46
Reloj RTC DS3231	48
3.2 DIGITALIZADOR	49
3.2.1 Arduino Uno	49
3.2.2 Arduino Nano	51
3.2.3 Raspberry Pi 3 B	52
3.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	54
3.3.1 CONTROLADOR DE CARGA	54
3.3.2 BATERÍA	54
Power Bank	54
Batería o Acumulador	55
3.4 ADQUISICIÓN DE DATOS	55
Módulo MicroSD	55
3.5 FUNCIONAMIENTO DEL PRIMER PROTOTIPO	56
3.6 FUNCIONAMIENTO DEL SEGUNDO PROTOTIPO	57
3.7 FUNCIONAMIENTO DEL TERCER PROTOTIPO	58
CAPÍTULO IV	60
MODELO MATEMÁTICO DEL PROTOTIPO SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA	60
4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS	60
4.1.1 Procesamiento de datos	61
4.2 ANÁLISIS DE ONDAS SÍSMICAS	62
4.2.1 Software de análisis de las ondas sísmicas	62
4.2.2 Tratamiento de las ondas sísmicas	63
4.3 ANÁLISIS DE ALERTA DEL PROTOTIPO	65
CAPÍTULO V	66
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
5.1 PELIGRO SÍSMICO, RIESGO SÍSMICO Y VULNERABILIDAD SÍSMICA EN LA ZONA DE ESTUDIO	66
5.2 EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO	68
Sismos en el Ecuador mayores o iguales a 4 (ML) en la escala de Richter	68
5.3 RESULTADOS	75
5.3.1 Resultados del peligro sísmico de la zona de estudio	75
5.3.2 Resultados del prototipo de alerta sísmica	79
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	93

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LA RED SÍSMICA NACIONAL INSTITUTO GEOFÍSICO (RENSIG) ...	22
FIGURA 2: DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS ACELEROGRÁFICOS EN EL ECUADOR	24
FIGURA 3: DESTRUCCIÓN OCASIONADA POR EL TERREMOTO DE AMBATO 1949.....	25
FIGURA 4: RÉPLICAS DEL TERREMOTO.....	26
FIGURA 5: FALLAS ESTRUCTURALES	27
FIGURA 6: ONDAS SÍSMICAS REGISTRADAS POR UN SISMÓGRAFO.....	28
FIGURA 7: ESCALA DE MERCALLI	28
FIGURA 8: ESCALA MSK-64	30
FIGURA 9: ESCALA EMS-98.	30
FIGURA 10: CORRELACIÓN DE LA INTENSIDAD MODIFICAD DE MERCALLI Y LA ACELERACIÓN MÁXIMA DEL SUELO.....	31
FIGURA 11: RELACIÓN DE LA ACELERACIÓN CON LA ESCALA MODIFICADA DE MERCALLI	32
FIGURA 12: ONDAS P.....	33
FIGURA 13: ONDAS S.....	33
FIGURA 14: ONDAS RAYLEIGH	34
FIGURA 15: ONDAS LOVE.....	34
FIGURA 16: EJEMPLO DE LA INTERFAZ DEL PROGRAMA PRISM “GROUND MOTION MENU”	35
FIGURA 17: EJEMPLO DE LA INTERFAZ DEL PROGRAMA PRISM “RESPONSE TIME HISTORY MENU”	36
FIGURA 18: EJEMPLO DE LA INTERFAZ DEL PROGRAMA PRISM “RESPONSE.....	36
FIGURA 19: ACELERÓMETRO ADXL335.....	40
FIGURA 20: DIAGRAMA FUNCIONAL DEL ADXL 335	41
FIGURA 21: ACELERÓMETRO MMA7361	41
FIGURA 22: DIAGRAMA FUNCIONAL DEL MMA7361	42
FIGURA 23: ACELERÓMETRO ADXL345	43
FIGURA 24: DIAGRAMA FUNCIONAL DEL ADXL 335	44
FIGURA 25: ACELERÓMETRO MPU6050	44
FIGURA 26: DIAGRAMA FUNCIONAL DEL MPU6050	45
FIGURA 27: ACELERÓMETRO MPU9250	46
FIGURA 28: DIAGRAMA FUNCIONAL DEL MPU6050	47
FIGURA 29: RTC DS3231	48
FIGURA 30: ARDUINO UNO.....	49
FIGURA 31: DIAGRAMA DE PINES DE ARDUINO UNO.....	50
FIGURA 32: ENTRADAS Y SALIDAS E/S ARDUINO UNO.....	50
FIGURA 33: ARDUINO NANO.....	51
FIGURA 34: DIAGRAMA DE PINES DE ARDUINO NANO.....	51
FIGURA 35: RASPBERRY PI 3 B	52
FIGURA 36: ENTRADAS Y SALIDAS E/S RASPBERRY PI 3 B.....	53
FIGURA 37: DIAGRAMA FUNCIONAL RASPBERRY PI 3 MODEL B.....	53
FIGURA 38: SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	54
FIGURA 39: POWER BANK.....	54
FIGURA 40: BATERÍA O ACUMULADOR.....	55
FIGURA 41: MÓDULO MICROSD	55
FIGURA 42: PRIMER PROTOTIPO.....	56
FIGURA 43: SEGUNDO PROTOTIPO (A).....	57
FIGURA 44: SEGUNDO PROTOTIPO (B).....	58
FIGURA 45: TERCER PROTOTIPO	59
FIGURA 46: FORMATO DE REGISTRO.....	60
FIGURA 47: EJEMPLO DE REGISTRO DEL RASPBERRY PI 3 B	60

FIGURA 48: EJEMPLO DE REGISTRO FINAL DE ARCHIVOS DEL RASPBERRY PI 3 B	61
FIGURA 49: EJEMPLO DE REGISTRO FINAL DE DATOS DEL RASPBERRY PI 3 B.....	61
FIGURA 50: FORMATO DE INGRESO DE DATOS DEL PROGRAMA PRISM	62
FIGURA 51: EJEMPLO DEL INGRESO DE DATOS DEL PRIMER FORMATO EN EL PROGRAMA PRISM	62
FIGURA 52: EJEMPLO DEL INGRESO DE DATOS DEL SEGUNDO FORMATO EN EL PROGRAMA PRISM	63
FIGURA 53: EJEMPLO DEL INGRESO DE DATOS DEL EJEMPLO “CORRALITOS.DAT”	63
FIGURA 54: EJEMPLO DE VALORES CORRESPONDIENTES A LA ACELERACIÓN, VELOCIDAD Y DESPLAZAMIENTO SIN FILTROS NI CORRECCIONES “CORRALITOS.DAT”	64
FIGURA 55: EJEMPLO DE VALORES CORRESPONDIENTES A LA ACELERACIÓN, VELOCIDAD Y DESPLAZAMIENTO APLICADO FILTRO BUTTERWORTH Y CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE “CORRALITOS.DAT”	64
FIGURA 56: EJEMPLO DE REGISTRO FINAL DE DATOS DEL ARDUINO NANO.....	65
FIGURA 57: MAPA DE UBICACIÓN DEL SITIO DE EMPLAZAMIENTO DEL PROTOTIPO EN LA PARROQUIA RICAURTE.	66
FIGURA 58: MAPA GEOLÓGICO DE LA PARROQUIA RICAURTE DEL CANTÓN CUENCA.....	67
FIGURA 59: FORMACIÓN GEOLÓGICA, SEGÚN SU LITOLÓGÍA.	68
FIGURA 60: NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS Y LOCALIZADOS POR LA RENSIG: EVENTOS CON MAGNITUD IGUAL O SUPERIOR A 4.....	69
FIGURA 61: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL DIAGRAMA DEL ÁRBOL, PARA OBTENER LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA.....	73
FIGURA 62: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL DIAGRAMA DEL ÁRBOL, PARA OBTENER LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA.....	74
FIGURA 63: ECUADOR, ZONAS SÍSMICAS PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO Y VALOR DEL FACTOR DE ZONA Z.....	76
FIGURA 64: PELIGRO SÍSMICO DEL AUSTRO DEL ECUADOR. (MAPA DE ACELERACIONES MÁXIMAS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS)	77
FIGURA 65: MAPA DE INTENSIDADES MÁXIMAS	78
FIGURA 66: PRINCIPALES FALLAS GEOLÓGICAS DEL AUSTRO DEL ECUADOR	79
FIGURA 67: DATOS DE REGISTRO DEL PROTOTIPO DEL EJE X SIN CORRECCIÓN.....	81
FIGURA 68: DATOS DE REGISTRO DEL PROTOTIPO DEL EJE X CON CORRECCIÓN.....	82
FIGURA 69: DATOS DE REGISTRO DEL PROTOTIPO DEL EJE Y SIN CORRECCIÓN.....	83
FIGURA 70: DATOS DE REGISTRO DEL PROTOTIPO DEL EJE Y CON CORRECCIÓN.....	84
FIGURA 71: DATOS DE REGISTRO DEL PROTOTIPO DEL EJE Z SIN CORRECCIÓN.....	85
FIGURA 72: DATOS DE REGISTRO DEL PROTOTIPO DEL EJE Z CON CORRECCIÓN	86

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ESPECIFICACIONES ADXL335.....	40
TABLA 2. ESPECIFICACIONES MMA7361.....	42
TABLA 3: ESPECIFICACIONES ADXL345.....	43
TABLA 4. ESPECIFICACIONES MPU6050.....	45
TABLA 5: ESPECIFICACIONES MPU9250.....	47
TABLA 6. ESPECIFICACIONES RTC DS3231.....	48
TABLA 7. ESPECIFICACIONES ARDUINO UNO.....	49
TABLA 8. ESPECIFICACIONES ARDUINO NANO.....	51
TABLA 9. ESPECIFICACIONES RASPBERRY PI 3 B.....	52
TABLA 10. ESPECIFICACIONES DEL PRIMER PROTOTIPO.....	57
TABLA 11. ESPECIFICACIONES DEL SEGUNDO PROTOTIPO.....	58
TABLA 12. ESPECIFICACIONES DEL TERCER PROTOTIPO.....	59
TABLA 13: ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE ALERTA.....	65
TABLA 14: EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS Y LOCALIZADOS POR LA IGEPN, RSA, IRIS.....	70
TABLA 15: SISMOS EN EL AZUAY DE MAGNITUD MAYOR O IGUAL A 4 EN LA ESCALA DE RICHTER.....	71
TABLA 16: SISMOS EN EL AZUAY DE PROFUNDIDADES MENORES O IGUAL A 20 KM.....	72
TABLA 17: VALORES DEL FACTOR Z EN FUNCIÓN DE LA ZONA SÍMICA ADOPTADA.....	77
TABLA 18: DATOS DE REGISTRO DEL PROTOTIPO.....	80

RESUMEN

Esta investigación se orienta en elaborar un prototipo económico de alerta sísmica para la Universidad Católica de Cuenca en la parroquia Ricaurte.

El prototipo final tiene las siguientes dimensiones 20 cm de largo, 20 cm de profundidad y 8.5 cm de altura. Trabaja en 2 módulos siendo el primero de la alerta con un sensor MPU9250 y el segundo el registro de datos con un sensor MPU6050. El primer módulo realiza un análisis de las aceleraciones presentadas y las compara con respecto a una correlación establecida, que da la alerta cuando se sobrepase 0,092g (IMM VI). El segundo módulo almacena los datos de las aceleraciones presentadas para posteriormente analizar las ondas sísmicas, para lo cual se utiliza el software especializado "PRISM", se aplica a los datos obtenidos el filtro Butterworth y la corrección de línea de base.

Se realiza un análisis de la evaluación del peligro sísmico mediante la probabilidad de ocurrencia de sismos en la ciudad de Cuenca, aplicando parámetros específicos de registros existentes del IGEPN, IRIS y RSA mediante el Teorema de Bayes, teniendo como resultado que se genere un evento sísmico con una probabilidad de ocurrencia de 6 años de acuerdo a una magnitud 4 (ML) en función de la profundidad y de acuerdo a una profundidad de 20 km en función de la magnitud con una probabilidad de ocurrencia de 1 año 6 meses.

El prototipo se desarrolla con fines de mejorar el control sísmico en el lugar de emplazamiento. Se espera con el dispositivo elaborar futuras líneas de investigación tales como salud estructural y microzonificación sísmica, para generar medidas de prevención y mejorar la gestión integral de riesgos.

PALABRAS CLAVES: PROTOTIPO, ALERTA SÍSMICA, ACELERACIONES, FILTRO BUTTERWORTH, PROBABILIDAD, PRISM.

ABSTRACT

This research is oriented towards the elaboration of a seismic alert economic prototype for the Catholic University of Cuenca, in Ricaurte parish.

The final prototype has the following dimensions 20 cm long, 20 cm in-depth, and 8.5 cm in height. It works in two modules, the first is the alert with an MPU9250 sensor; the second is the data logging with an MPU6050. The first module analyzes the accelerations presented and compare them with an established correlation that the alert shows when the 0,092g (IMM VI) is exceeded. The second module storages the acceleration data showed to subsequently analyze the seismic waves, for which the specialized software "PRISM" is utilized, it is applied to the data collected in the Butterworth filter, and the correction of the baseline.

An analysis of the evaluation of the seismic risk was performed through the likelihood of tremor occurrence in Cuenca city, applying specific parameters from existing records of IGEPN, IRIS, and RSA through the Bayes' theorem, having, as a result, to trigger a seismic event with a probability of occurrence of 6 years according to a magnitude of 4(ML) based on depth, and according to a depth of 20 km based on the magnitude with a probability of occurrence of 1 year and 6 months.

The prototype is developed to ameliorate the seismic monitoring in the location. The device is expected to develop future lines of research, such as structural health and seismic micro zoning to generate prevention measures as well as enhance the integrated risk management.

KEYWORDS: SEISMIC ALERT, ACCELERATIONS, BUTTERWORTH FILTER, SEISMIC MONITORING, PRISM.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Cuenca está localizada de acuerdo a la NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción) en una zona de caracterización del peligro sísmico alta, por lo que implementar una red lo suficientemente amplia para monitorear un área de interés generaría costos elevados por la adquisición, implementación y mantenimiento de instrumentación sísmica. En el “Plan Nacional 2017-2021 de Desarrollo Toda una Vida” se especifica la falta de información de zonas más propensas a desastres naturales por lo que se tiene como un objetivo la microzonificación sísmica en la planificación urbana. En la ciudad de Cuenca la RSA (Red Sísmica del Austro) cuenta con 3 estaciones sísmicas ubicadas dentro de la ciudad para el respectivo monitoreo y generación de información. Para realizar estudios de aceleraciones sísmicas, se debe contar con equipos que la mayoría de las veces llegan a tener un costo excesivamente alto y dichos equipos necesitan de un profesional que tenga conocimientos para interpretar los resultados que son generados. La implementación de medidas de seguridad en edificaciones para el caso de amenazas sísmicas debe ser económicamente accesibles para toda la ciudadanía.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Construir e implementar un prototipo económico de sistema de alerta sísmica en base a las aceleraciones registradas para la Universidad Católica de Cuenca.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construcción del prototipo del sistema de alerta en base a productos económicos comercializados en el país.
- Realizar un registro y adquisición de datos de las aceleraciones sísmicas.
- Implementar al prototipo un medio de alerta visual y sonora sísmica en función de las aceleraciones máximas registradas.
- Realizar un análisis de las aceleraciones registradas mediante el software "PRISM" para la corrección de línea de base y filtrado de las ondas.
- Realizar un análisis estadístico para la obtención de periodos de retorno sísmicos en la ciudad de Cuenca en función de la profundidad y magnitud de sismos registrados.
- Análisis del sitio de emplazamiento del prototipo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El Ecuador es un país en el cual se impulsa una cultura de gestión integral de riesgos disminuyendo la vulnerabilidad y siendo uno de sus objetivos la prevención de todo tipo de emergencias provocadas por desastres naturales. En el caso de la sismicidad el país trabaja en planes para disminuir los efectos provocados mediante medidas de prevención, por lo que se propone en el "Plan Nacional 2017-2021 de Desarrollo Toda una Vida" ampliar el trabajo interinstitucional para identificar, analizar y desarrollar propuestas para las regiones más propensas a dichos fenómenos, vinculando sistemas de gestión integral de riesgos para la obtención de información que ayude a establecer una microzonificación sísmica. En la ciudad de Cuenca se trabaja en la implementación o mejora de redes sísmicas ya sean estas colocadas en zonas interés geológico o en edificios para su posterior análisis.

1.4 HIPÓTESIS

La construcción del prototipo será realizada mediante pruebas de diferentes componentes económicos comercializados en el país, estos ayudarán a obtener una señal adecuada para dar la alerta. Una vez obtenida la señal y cuando pase de cierto límite se deberá activar la misma y se obtendrá un registro de la señal para su posterior análisis de datos, los registros permitirán obtener previo a un análisis las aceleraciones, velocidades y desplazamientos del sismo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO

2.1 BASES TEÓRICAS

2.1.1 Sistemas de alerta temprana sísmica

El fundamento físico de un EEWS (Earthquake Early Warning System), se basa en el momento que sucede un sismo, la mayor parte de energía radiada en el foco está contenida en las fases de menor velocidad de propagación siendo estas fases las ondas S y superficiales, las cuales llegan después de las ondas P (fase de mayor velocidad) (Carranza Gómez, 2007).

A partir de la onda P se obtiene la información necesaria para dar un análisis preliminar de los efectos que las ondas S pueden tener sobre el terreno, siendo estas ondas las más destructivas. Mientras los dispositivos reciben la alerta de la onda P, se debe enviar la señal por un medio eléctrico, superando así en velocidad a las ondas S y permitiendo que las personas tengan tiempo suficiente para evacuar y con esto tratar de reducir desastres. Todo este método se basa en la distancia al hipocentro y donde se encuentren los dispositivos de recepción de las señales, además del tiempo que tardan en viajar las ondas y del tipo de suelo por el cual se trasladan.

La primera referencia escrita de un EEWS se da en el año de 1868 cuando J. D. Cooper propuso un sistema simple de alerta en caso de terremoto (Cooper, 1868) (Carranza Gómez, 2007).

La hipótesis de Cooper consistía en instalar dispositivos a lo largo de todo San Francisco, cuando se llegase a presentar un sismo, se procedería a enviar la alerta de forma automática a través del telégrafo llegando la señal al centro de la ciudad y haciendo sonar una campana de manera característica para dar aviso a todas las personas y que estas tomen las debidas precauciones. En esa época no se contaba con la suficiente tecnología para implementar una red de esas características, su costo de implementación, transporte y mantenimiento sería demasiado elevado.

2.1.2 Sistemas de alerta temprana sísmica en el mundo

Los SAT (Sistema de Alerta Temprana) iniciaron con su desarrollo en el año de 1985 en Japón, esto se realizó con la finalidad de determinar cuándo un tren bala sufra un descarrilamiento se pueda detener de manera segura minimizando los daños producidos. En México el sistema de alerta temprana sísmica que fue implementado en el año 1991 y sigue funcionando, este sistema se encuentra de manera lineal a lo largo de toda su costa del Pacífico y da una alerta a la ciudad de México de cuando se produce un sismo, además se complementa con otros SAT que se encuentran ubicados en todo el país, un tipo de SAT similar al de México se encuentra en Rumania y en la ciudad de Estambul. Desde el año 2002 en Taiwán los sistemas de alerta temprana llevan operativos, siendo capaces de dar una alerta a 70 Km de distancia del epicentro del sismo. En el año 2007 se produjo un incremento de la red sísmica de Japón con el objetivo de proporcionar alerta a la población. En el año 2011 en Japón se dio un sismo de $M_w=9$, con lo que se procedió a la alerta de la población por medio de televisión, radio y mensajes de texto logrando con esto 15 segundos de diferencia hasta que el sismo llegue a un punto determinado. En Italia en la zona sur los SAT se encuentran en fases de desarrollo e implementación, colocados en lugares de mayor ocurrencia de sismos mediante una red de estaciones, siendo estas actualizadas constantemente. Además, existen SAT en China, Corea del Sur, Israel, Suiza, Islandia, Grecia, Estados Unidos de América y España.

2.1.3 Instrumentación sísmica

Los terremotos han existido siempre, no se encuentran en el pasado formulaciones de sistemas constructivos sismorresistentes, con excepción de algunas precauciones de tipo elemental. Quizá sea debido a que las construcciones normales eran de altura reducida y estaban realizadas con barro, madera, arcilla cocida en forma de ladrillos, o de piedra con materiales aglomerantes o sin ellos, que aumentaban su resistencia a la acción de las fuerzas horizontales. Por otra parte, los daños estaban limitados por sus propias dimensiones (Aurel A, Mihail D, & A. García, 1975).

El científico Robert Mallet presento un estudio en el año de 1848, en la Academia de Ciencias de Irlanda, sobre la dinámica en las construcciones siendo este uno de los primeros análisis para determinar soluciones aplicables de los problemas que presentan las acciones sísmicas en las estructuras.

El problema del incremento poblacional es una de las razones para que se realicen construcciones de estructuras de numerosos pisos donde se coloquen viviendas, negocios y oficinas. Esto facilita el progreso de una comunidad, pero se presenta el problema de que las estructuras deben soportar la acción de sismos de manera que sean seguras y confiables. Los estudios que se han llevado a cabo por parte de varios investigadores, proporcionan información necesaria para evaluar el problema y dar una solución factible.

El británico I. Milne, que se ocupó del problema de los movimientos sísmicos en general, ha sido el primero que investigo la influencia de terremotos y sus efectos resultantes en las estructuras. Estudió y comentó las diferentes prescripciones e instrucciones sobre la construcción en países de fuerte sismicidad, y directamente en el campo investigo el posible registro de las acciones de los terremotos con ayuda de aparatos (Aurel A, Mihail D, & A. García, 1975).

2.1.4 Historia de la instrumentación sísmica

El primer detector de ondas sísmicas fue construido en China aproximadamente en el año 132 d.C. el responsable de esto fue Zhang Heng. El instrumento consistía en un jarrón con cuatro cabezas con la forma de dragón que señalaban a los diferentes puntos cardinales, cuando este dispositivo sienta el movimiento del suelo y procederá a liberar unas bolas de bronce de la boca de cada dragón y estas se colocan en las bocas de jarrones más pequeños con la forma de sapos que se encuentran directamente debajo de los dragones. El primer dispositivo electromecánico capaz de detectar los movimientos sísmicos fue desarrollado en Italia en 1875 por F. Cechi. Un hecho relevante es la recolección de información sísmica de manera global, se dio gracias al investigador Milne que construyo un dispositivo lo suficientemente compacto para implementarlo en 40 estaciones en todo el mundo. En 1898 Wiechert construyó el primer sismómetro con amortiguación que reproduciría el movimiento sísmico del suelo. En el año de 1914 se desarrolló el primer sismómetro electromagnético con péndulo móvil,

mediante una bobina permite producir corriente eléctrica para amplificaciones, pero su banda es más estrecha que los otros dispositivos previamente mencionados que son instrumentos mecánicos.

2.2 SISMÓGRAFOS

2.2.1 Sismógrafos en el mundo

La sismología ha crecido en estos últimos años progresivamente, con objetivos de adecuación e instalación para llevar un control sísmico. Se estableció la red sismológica mundial (WWSSN) en 1961 con dispositivos de corto y largo periodo; la obtención y tratamiento de datos permitió que la red mundial mejorara el conocimiento en las áreas de la sismología. Una inadecuada instrumentación de la red sismología mundial WWSSN, por un mal control en su operación y mantenimiento, da paso a la aparición de una red mundial de sismómetros como el IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) y IGEPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional) para un mayor control sísmico y desarrollar nuevas iniciativas utilizando tecnología como en la investigación (Vera Lizcano, 2003).

Una forma apropiada en la obtención, instalación y operación de redes, permite realizar una comparación entre los resultados teóricos con los adquiridos en observación y experimentación. En la actualidad, gran cantidad de información digital reunida, ha permitido progresar en el ámbito del conocimiento sobre la distribución de la sismicidad en la tierra y la delimitación de las zonas más propensas a riesgos (Vera Lizcano, 2003).

Una red de sismómetros se constituye por varias estaciones, cada una consta con registro en las 3 direcciones dispuestas de un sensor vertical o en algunos casos de tres sensores colocados ortogonalmente (1 vertical, 2 horizontales) registran el desplazamiento vertical y horizontal del terreno. (Vera Lizcano, 2003). Para lograr cubrir el área de estudio o interés, las estaciones estarán ubicadas en una correcta zona o punto geográfico de la tierra. En cada estación se obtiene un sismograma del cual, con el empleo de modelos predefinidos, se determina el tipo de falla, foco sísmico, análisis de ondas, entre otros. La distribución óptima de una red sísmica conlleva una mayor precisión y menor

error en la determinación del hipocentro, debido a sus costos elevados en su adquisición, instalación y mantenimiento.

2.2.2 Sismógrafos en Ecuador

La Red Nacional de Sismógrafos comenzó su instalación y desarrollo aproximadamente en el año de 1970; usaron sensores de un componente y de periodo corto. En 1980 y 1990 se instalaron sensores de tres direcciones de periodo corto, todas las estaciones funcionaban a tiempo real y utilizaban radios analógicos. Estas redes localizadas en la zona andina, se colocaron con el objetivo de monitorizar la actividad de los volcanes, hacia mediados de los 90's, se instalaron estaciones cerca de la zona costera.

El Consorcio IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) se dedica a la operación de instalaciones para la adquisición, gestión, y distribución de datos sobre sismos. En el 2000 se instalaron 2 estaciones en el Ecuador, una en las Islas Galápagos y otra en la ciudad de Otavalo. Las estaciones conforman una parte de la red de sismógrafos a nivel mundial y cuentan con acelerómetros, acelerógrafos, sensores y estaciones de banda corta y banda ancha.

En el año 2007 se adquirieron e instalaron 3 estaciones adicionales, contaban con sensores de la señal de período corto y de tres componentes (X, Y, Z), las estaciones se situaron en la Costa Ecuatoriana. De las 3 estaciones solo 2 continúan instaladas al momento.

En el año 2008 se instalaron adicionalmente 3 nuevas estaciones de banda ancha en el norte del país, y las cercanías de Macas. En el sur del Ecuador se establecieron 4 estaciones de banda ancha.

Desde el año 2007 y hasta el año 2009 se adquirieron 9 estaciones sismográficas que se caracterizaban por tener integrados sensores sísmicos de banda ancha, acelerógrafos y GPS en la región costera del Ecuador.

Dentro de programa francés (Séismes à l'école), instalaron en el año 2008 una estación sísmica en un colegio en la ciudad de Quito.

En el año 2011 se colocaron 3 estaciones de banda ancha en la provincia de Imbabura, cerca de Yahuarcocha, y Urcuquí.

Desde el 2009 hasta el año 2012 la SENECYT con el proyecto de investigación en primera fase, permitió la modernización y amplificación de la Red Sísmica Nacional. Las nuevas estaciones cuentan con varios sensores de banda ancha, acelerógrafos y digitalizadores de mejor resolución.

El proyecto se completó con la segunda fase, las estaciones cuentan con transmisión de datos obtenidos en tiempo real y se mejoraron las estaciones que estuvieron previamente instaladas con anterioridad al proyecto que estableció la Senescyt.

Desde el año 2012 se tiene como objetivo desarrollar el proyecto “Generación de capacidades para la difusión de alertas tempranas y para el desarrollo de instrumentos de decisión ante las amenazas sísmicas y volcánicas dirigido al sistema Nacional de Gestión de Riesgos”, este proyecto a desarrollar es financiado por Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) con esto se produjo la actualización de la red de sismógrafos en Ecuador.

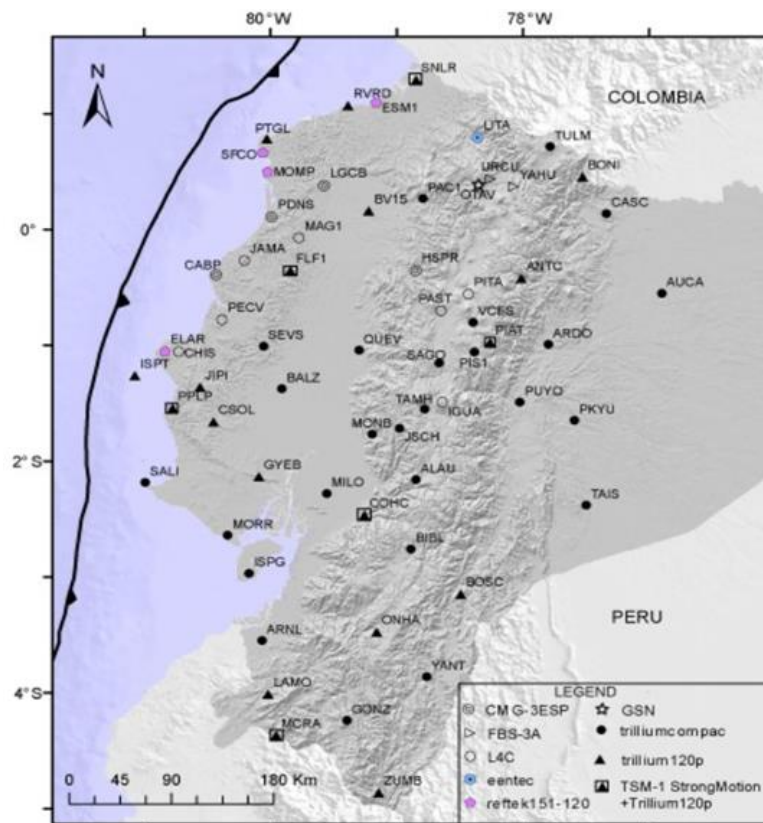


Figura 1: Distribución actual de la Red Sísmica Nacional Instituto Geofísico (RENSIG)

Fuente: (IGEPN)

2.3 ACELERÓGRAFOS

2.3.1 Acelerógrafos en el mundo

Una red acelerográfica está compuesta por una serie de acelerógrafos, los cuales están formados por sensores que miden las aceleraciones registradas del suelo cuando se presentan eventos sísmicos; esta red acelerográfica debe estar localizada en una zona de interés para conocer y obtener información sobre las características del subsuelo, donde va a ser emplazada la misma (Macías Castillo & Ayala Hernández, 2018).

El acelerógrafo está formado de 3 sensores, 1 vertical y 2 en horizontal; de los cuales el primero en dirección Este-Oeste, el segundo en dirección Norte-Sur y el tercero en posición vertical; con el fin de obtener registros tridimensionales de una partícula en movimiento (Macías Castillo & Ayala Hernández, 2018).

2.3.2 Acelerógrafos en Ecuador

El primer acelerómetro colocado en Ecuador fue instalado por la EPN (Escuela Politécnica Nacional), tiempo después se ampliaría la cobertura en toda la ciudad de Quito. La Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) cubre las 3 regiones del Ecuador siendo estas Costa, Sierra y Oriente, los acelerógrafos fueron colocados en las principales ciudades, con los datos recopilados se generaron estudios del movimiento del suelo y el análisis de aceleraciones provocadas por sismos.

En Ecuador la red acelerográfica (RENAC), adquiere varios registros y almacena las señales sísmicas captadas por los dispositivos siendo las de mayor impacto y destrucción las que son archivadas.

En el año 2008 al 2012 nace el proyecto “Fortalecimiento del Instituto Geofísico Ampliación y modernización del Servicio Nacional de Sismología y Vulcanología” cuyo objetivo es cubrir todo el territorio nacional mediante redes de estaciones acelerográficas con tecnología de punta y alta calidad es proyecta está financiado por la SENESCYT.



Figura 2: Distribución de equipos acelerográficos en el Ecuador

Fuente: (IGEPN)

Con la implementación de nuevos equipos de monitoreo en toda la ciudad de Quito, se plantea que estos detecten movimientos del suelo provocadas por las placas tectónicas.

En el año 2014 el IGEPN y el OCP (Oleoducto de Crudos Pesados) elaboran un convenio de ampliación de la red de monitoreo sísmico, se instalan nuevos equipos acelerográficos a lo largo del tubo de Oleoducto de Crudos Pesados. (IGEPN & Manosalvas, 2014)

2.4 HISTORIA SÍSMICA EN ECUADOR

La actividad sísmica en Ecuador es considerablemente alta, en toda su historia se ha visto afectado por sismos y sus réplicas, en los últimos 500 años provocando devastación de ciudades, en la escala MSK siendo algunos eventos mayores a intensidad VII, como Riobamba en 1797, Ibarra en 1868, Esmeraldas en 1906, Ambato en 1949 y la muerte de más de 60000 personas aproximadamente en Riobamba en 1797.

Cada terremoto que se presenta ocasiona pérdidas tanto humanas como materiales, los daños en ciertos casos son significativos afectado psicológicamente a las personas haciendo que opten por trasladarse a diferentes lugares de la zona donde ocurrió el sismo.

La primera estación sismográfica del Ecuador se adquirió hace aproximadamente 100 años por el Observatorio Astronómico de Quito y la EPN (Escuela Politécnica Nacional) ellos realizaban estudios geológicos, sísmicos y de vulcanología de varias zonas en el país en esa época.

Actualmente el IGEPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional) mantiene redes de monitoreo de actividad tanto sísmica como volcánica en el Ecuador. La red de Sismógrafos Nacional empezó instalando sus instrumentos en 1970 siendo la parte andina del Ecuador la zona de estudio, aproximadamente en el año 2000 se implementaron estaciones internacionales por parte de instituciones y estas integran la red mundial de sismógrafos.



Figura 3: Destrucción ocasionada por el terremoto de Ambato 1949.

Fuente: (IGEPN)

2.4.1 Sismo del 16 de abril de 2016

El día sábado 16 de abril de 2016, se originó un sismo de 7.8Mw en el cantón de Pedernales ubicado en la Provincia de Manabí, a 19 km de profundidad, este sismo fue ocasionado por una falla de subducción entre las placas de Nazca y la Sudamericana, afectando en mayor parte a las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas y Los Ríos.

El sismo de magnitud 7,8Mw representa la energía equivalente a la que libera una explosión de 5 millones de toneladas de TNT, que se tomó referencia lo descrito por (Petak y Atkinson, 1982). También se realiza una comparación del terremoto de Chile-Valdivia en el año 1960 de magnitud 9,5Mw el cual libera 362 veces más energía que el sismo de Pedernales de 7,8Mw y este a su vez libera 16 veces más energía que el sismo de Puerto Príncipe de Haití de 7,0Mw en el año 2010, la cual asegura el investigador del IGEPN (Yepes Hugo, 2016).

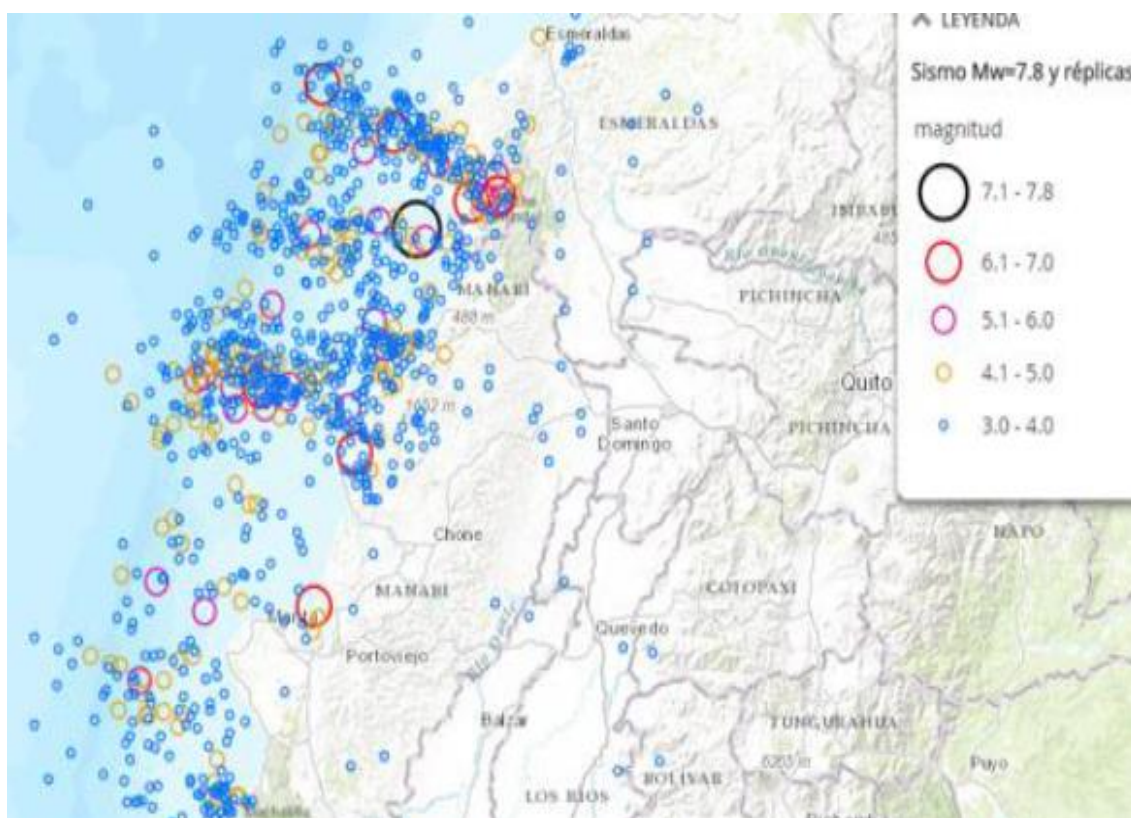


Figura 4: Réplicas del terremoto

Fuente: (Ferrín, Pilligua, & Aguiar, 2016)

Se presentaron aproximadamente 3429 réplicas, 9 de estas mayor a 6Mw. Se confirmaron 671 fallecidos y cerca de 12 personas desaparecidas, 113 personas fueron rescatadas, muchas de las estructuras colapsaron atrapando a personas que se encontraban en su interior, otras personas se vieron afectadas psicológicamente prefirieron quedarse a pasar la noche en las calles que volver a sus domicilios.



Figura 5: Fallas estructurales

Fuente: (Aguiar & Mieles, 2016)

Los servicios básicos tales como agua potable, luz eléctrica, líneas telefónicas sufrieron daños graves. Se registraron 69335 edificaciones afectadas de las cuales muchas fueron construidas con materiales de baja calidad y en algunos casos para el diseño y la construcción no se tuvo en cuenta la normativa NEC para la construcción.

2.5 ESCALAS SÍSMICAS

2.5.1 Escala de Richter

La escala sísmica de Richter “ML” (Richter, Gutenberg, 1935) cuantifica de M1 a M9.5 la energía que es liberada por un sismo en el epicentro (Cajamarca, 2018).

Para calcular la magnitud del terremoto, Richter propuso el logaritmo decimal del desplazamiento de una aguja de sismógrafo y su valor se estima de acuerdo con las oscilaciones registradas por los sismógrafos (Cajamarca, 2018).

$$M = \log_{10} A + 3 \log_{10} (8\Delta t) - 2.92 = \log_{10} \left(\frac{A * \Delta t^3}{1.62} \right)$$

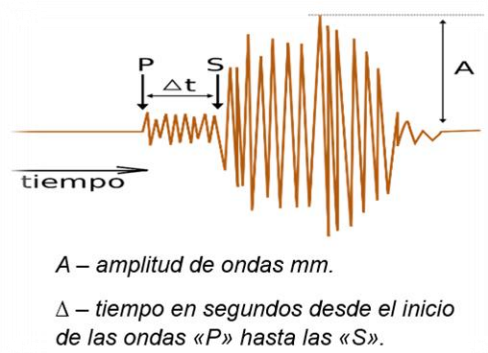


Figura 6: Ondas Sísmicas registradas por un sismógrafo.

Fuente: (Cajamarca, 2018)

2.5.2 Escala Modificada de Mercalli (IMM)

La escala de Mercalli lleva el nombre de Giuseppe Mercalli un italiano quien en el siglo XIX desarrollo una escala que evalúa la intensidad, permitiendo entender la dimensión de un sismo a partir del efecto o daño que este ha provocado sobre las personas, las estructuras, la superficie del suelo y el medio.

MM	
Modificada de Mercalli	
I	Muy débil
II	Débil
III	Leve
IV	Moderado
V	Poco fuerte
VI	Fuerte
VII	Muy fuerte
VIII	Destructivo
IX	Muy destructivo
X	Desastroso
XI	Muy desastroso
XII	Catastrófico

Figura 7: Escala de Mercalli

Fuente: (Cajamarca, 2018)

2.5.3 Escala de Kanamori

Kanamori en 1977 limitó la escala de Richter hasta una magnitud $M_L=6.8$, basado en que esta escala muestra magnitudes muy similares para sismos grandes, debido a las limitaciones de los dispositivos y a que esta magnitud es determinada considerando las ondas superficiales (Cajamarca, 2018).

Para la valoración de los sismos grandes, los sismólogos consideran aplicable la escala sísmica de momento (MW). Esta escala mide la energía total que libera un sismo y coincide con la escala de Richter hasta una magnitud de 6.8 (Cajamarca, 2018).

$$M_W = \frac{2}{3}(\log M_0 - 16.1)$$

DONDE:

M_0 — momento sísmico [din×cm]

(1 N = 100.000 din)

(1 din = 1 g·cm/s² = 10⁻⁵ N)

$$M_0 = \mu S u \quad , [N*m]$$

DONDE:

μ — módulo de cizalla de las rocas

S — área de ruptura, distancia de la falla geológica donde ocurrió el terremoto

u — desplazamiento medio de la falla

2.5.4 Escala de Intensidad Msk-64.

En el continente europeo muchos de los países optan por utilizar la escala sísmica MSK propuesta en 1964 por Medvedev, Sponheuer y Karnak. Siendo una escala de intensidad macro sísmica usada principalmente para evaluar la fuerza de movimientos de tierra basándose en: efectos percibidos por las personas; efectos sobre los objetos y el entorno; daños producidos en las construcciones.

MSK-64	
Macrosísmica Internacional	
I	<i>Imperceptible</i>
II	<i>Levemente perceptible</i>
III	<i>Débil</i>
IV	<i>Notable</i>
V	<i>Alarmante</i>
VI	<i>Fuerte</i>
VII	<i>Muy fuerte</i>
VIII	<i>Gravemente dañino</i>
IX	<i>Destructivo</i>
X	<i>Devastador</i>
XI	<i>Catastrófico</i>
XII	<i>Extremadamente catastrófico</i>

Figura 8: Escala Msk-64

Fuente: (Cajamarca, 2018)

2.5.5 Escala de Intensidad EMS-98.

La Escala Macro Sísmica Europea (EMS), la Comisión Sismológica Europea (CES) procedió a dar revisión y posteriormente actualizar la escala MSK-64 en el año de 1992 para obtener la versión final de la escala (EMS-98) que se publicó en el año 1998; diseñada y orientada para designar la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en varios países europeos y otros continentes. Esta escala considera 12 grados.

EMS-98	
Macrosísmica Europea	
I	<i>No sentido</i>
II	<i>Apenas sentido</i>
III	<i>Débil</i>
IV	<i>Ampliamente observado</i>
V	<i>Fuerte</i>
VI	<i>Levemente dañino</i>
VII	<i>Dañino</i>
VIII	<i>Gravemente dañino</i>
IX	<i>Destructor</i>
X	<i>Muy destructor</i>
XI	<i>Devastador</i>
XII	<i>Completamente devastador</i>

Figura 9. Escala EMS-98.

Fuente: (Cajamarca, 2018)

2.5.6 Correlación de la aceleración con la Escala Modificada de Mercalli

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), es actualmente una agencia científica del gobierno que estudia diversas disciplinas como geología, hidrología, geografía y biología. El Centro Nacional de Información Sísmica es una división del USGS que está encargada de realizar los estudios de sismos en todo el mundo. El USGS para facilitar el flujo de información al público desarrolló correlaciones entre la escala de Intensidad Modificada de Mercalli y la aceleración y velocidad máxima generando mapas de valores registrados de movimientos del suelo obteniendo intensidades instrumentales.

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL. (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 10: Correlación de la Intensidad Modificada de Mercalli y la aceleración máxima del suelo

Fuente: USGS

Se han realizado varios estudios para llegar a una correlación entre la intensidad y ciertos parámetros físicos del movimiento del suelo siendo uno la aceleración máxima del mismo, en tiempos pasados se incluyeron la correlación de este parámetro como parte de la escala. Los valores de intensidad registrados de los efectos observados son el resultado del movimiento real del suelo, la cual es una relación compleja; existe casos donde la intensidad no se ve afectado principalmente por la aceleración máxima del suelo o no es el parámetro más importante, por lo que existe una dispersión grande, que reduce el alcance de los valores que se predicen, lo recomendable para una dispersión reducida es usar aceleraciones espectrales. Esta correlación se presta para que continúe con futuras investigaciones. Esta es todavía un área de investigación activa (Grunthal & Lorenzo, 2009).

Escala de Mercalli	Aceleración sísmica (g)	Percepción del temblor	Potencial de daño
I	< 0.0017	No apreciable	Ninguno
II-III	0.0017 - 0.014	Muy leve	Ninguno
IV	0.014 - 0.039	Leve	Ninguno
V	0.039 - 0.092	Moderado	Muy leve
VI	0.092 - 0.18	Fuerte	Leve
VII	0.18 - 0.34	Muy fuerte	Moderado
VIII	0.34 - 0.65	Severo	Moderado a fuerte
IX	0.65 - 1.24	Violento	Fuerte
X+	> 1.24	Extremo	Muy fuerte

Figura 11: Relación de la aceleración con la Escala Modificada de Mercalli

Fuente: CGI (Agudelo Zapata, 2016)

2.6 ONDAS SÍSMICAS

2.6.1 Introducción

Las ondas sísmicas son provocadas cuando la energía es liberada mediante una explosión o mediante un sismo, dicha energía se traslada por el suelo mediante ondas elásticas deformando el terreno, es decir se transmiten mientras se desplazan.

Las ondas sísmicas se dividen en Ondas de Cuerpo que a su vez estas se transmiten por el interior del suelo y cuando estas alcanzan la superficie, actúan con la misma y se producen las Ondas Superficiales.

2.6.2 Ondas de Cuerpo

Se clasifican en Primarias (P) y Secundarias (S), las primarias son longitudinales tienen velocidades entre 8 km/seg a 7 km/seg y las secundarias son transversales tienen velocidades entre 5 km/seg a 4 km/seg.

2.6.2.1 Ondas P

Son ondas longitudinales, se comprimen y se extienden por medio de dilataciones, las ondas P son 1.7 veces más rápidas que las ondas S, dicho movimiento se puede asemejar al de un resorte, esta onda oscila en una sola dirección.

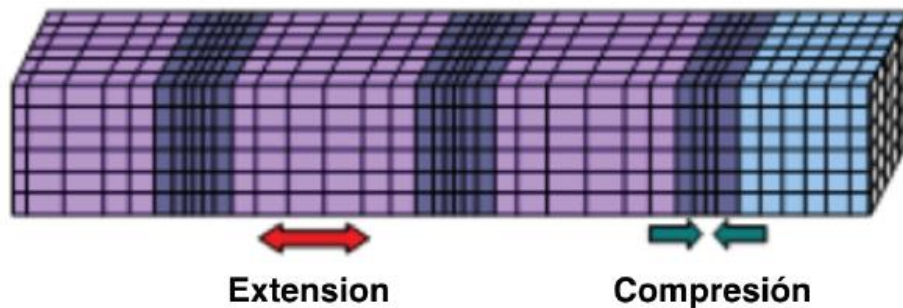


Figura 12: Ondas P

Fuente: (SÁEZ ARIAS, 2016)

2.6.2.2 Ondas S

Son ondas transversales, oscilando por la superficie del suelo tanto vertical como horizontalmente, esta onda es la genera daños en las estructuras.

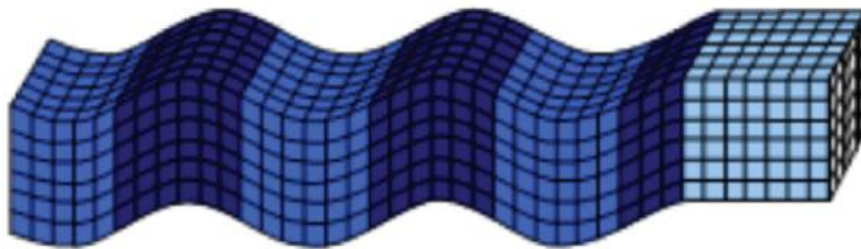


Figura 13: Ondas S

Fuente: (SÁEZ ARIAS, 2016)

2.6.3 Ondas Superficiales

Se clasifican en Rayleigh (R) y Love (L), las velocidades son considerablemente menores a Ondas P y S, variando dichas velocidades entre 5 km/seg a 0.5 km/seg.

2.6.3.1 Ondas Rayleigh

Son ondas de periodo muy largo, su movimiento se asemeja a las Ondas P, las partículas en el terreno se mueven en forma elíptica.

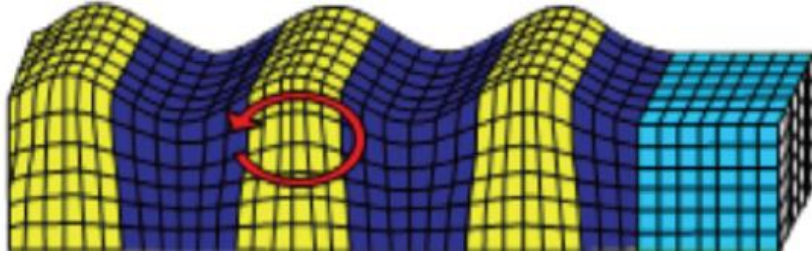


Figura 14: Ondas Rayleigh

Fuente: (SÁEZ ARIAS, 2016)

2.6.3.2 Ondas Love

Las Ondas Love son semejantes a las Ondas Rayleigh que son de periodo largo, el movimiento de estas se compara con las Ondas S porque genera un movimiento vertical y horizontal.

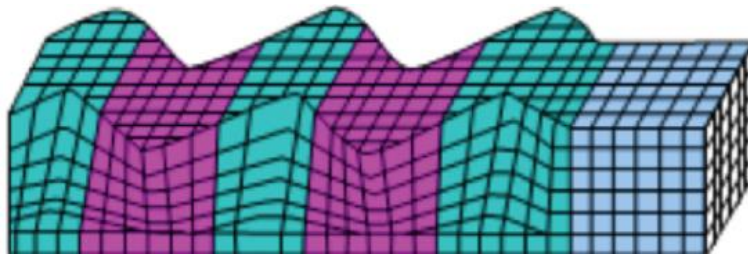


Figura 15: Ondas Love

Fuente: (SÁEZ ARIAS, 2016)

2.6.4 Software de análisis de ondas sísmicas

PRISM es un programa de libre acceso que sirve para el análisis de respuesta sísmica. Destinado para ingenieros, estudiantes e investigadores, contiene herramientas que facilitan el análisis del movimiento del suelo para procesar y filtrar las ondas sísmicas, además de realizar análisis de respuesta de sistemas de un grado de libertad genera espectros de respuestas elásticos e inelásticos.

Las principales características del programa son el procesamiento de las señales sísmicas del suelo (aceleraciones) y el análisis del espectro de respuestas de

estructuras. En la señal del movimiento del suelo se aplica un filtro Butterworth y se realiza la corrección de línea base de la señal.

En el programa se pueden realizar las siguientes características:

- Procesamiento de movimientos de suelo por terremotos,
 - Escalado y recorte.
 - Corrección basal.
 - Filtrado de ruido.
- Análisis dinámico del historial de respuestas
 - Resultados numéricos y gráficos sobre aceleración, velocidad y desplazamiento.
 - Monitoreo de la relación fuerza-desplazamiento de una estructura inelástica.
- Generación de espectros de respuesta elásticos e inelásticos.
 - Espectros de respuesta elástica.
 - Espectros de respuesta inelástica.
 - Resultados numéricos y gráficos en varios formatos, incluido el ADRS (espectro de respuesta de desplazamiento de aceleración).

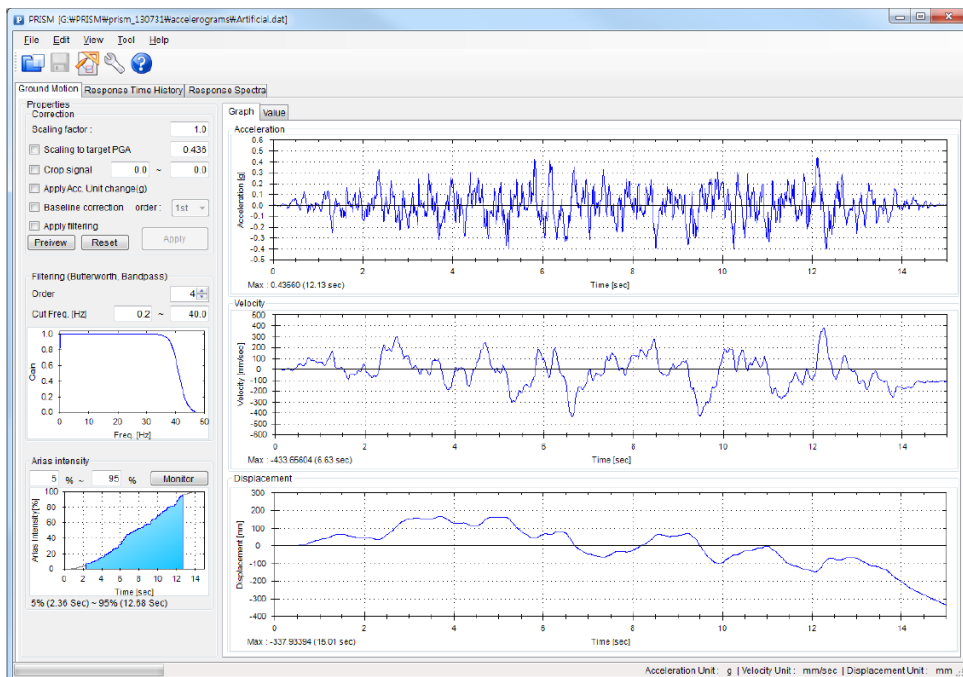


Figura 16: Ejemplo de la interfaz del programa PRISM "Ground Motion Menu"

Fuente: Manual de PRISM

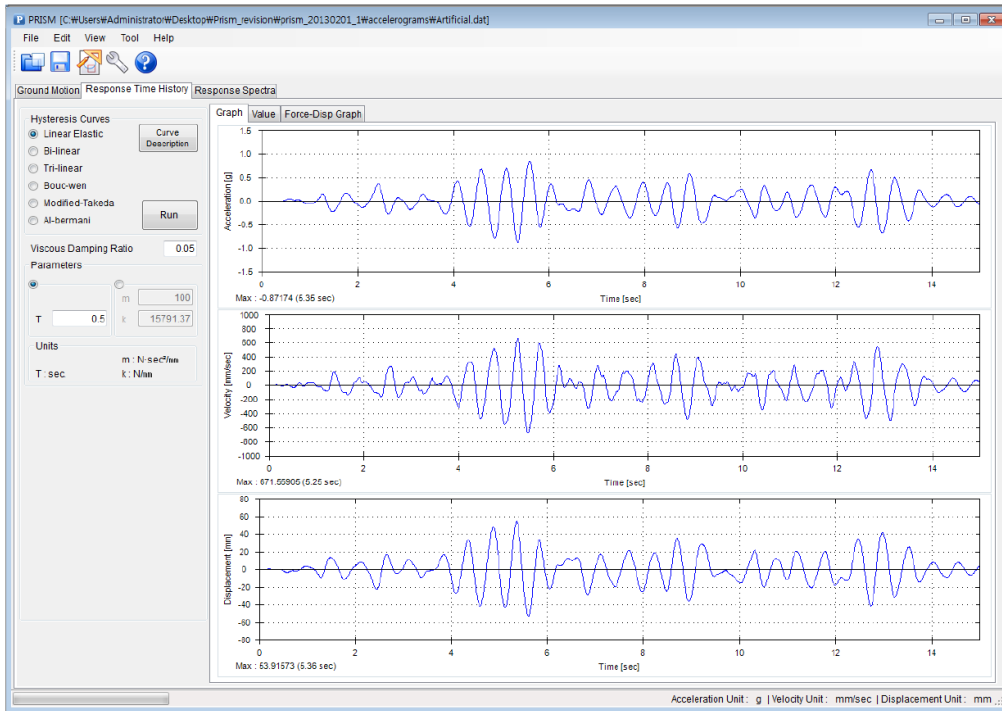


Figura 17: Ejemplo de la interfaz del programa PRISM “Response Time History Menu”

Fuente: Manual de PRISM

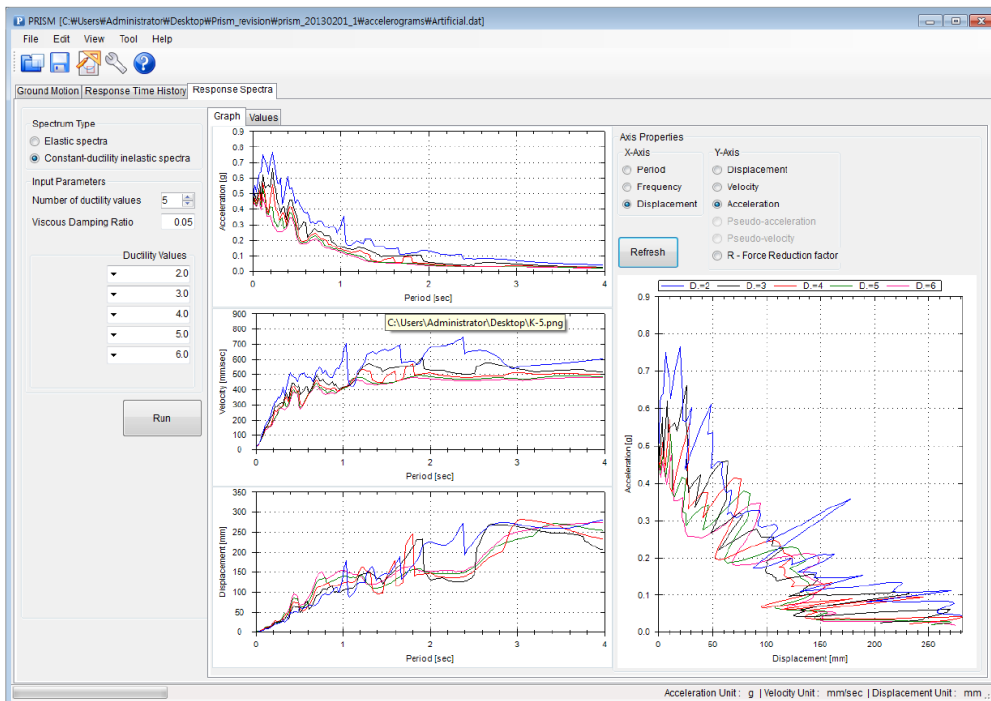


Figura 18: Ejemplo de la interfaz del programa PRISM “Response Spectra Menu”

Fuente: Manual de PRISM

2.7 PLACAS TECTÓNICAS EN ECUADOR

2.7.1 Placa Nazca

Su nombre Nazca proviene de una provincia ubicada en el Perú, se sitúa en el Océano Pacífico limitando con Placa de Cocos y la Placa del Caribe al Norte, con la Placa Antártica al Sur, con la Placa Sudamericana al este y con la Placa del Pacífico al Oeste. La Cordillera de los Andes se originó por una colisión entre las placas Nazca y Sudamericana.

La placa de Nazca subdivide en tres nuevas placas: Nazca Norte, Nazca Centro, Nazca Sur.

- Placa Nazca Norte: Se localiza frente a las Costas del Ecuador y Centro América.
- Placa Nazca Centro: Se localiza al frente de Costa Norte del Perú.
- Placa Nazca Sur: Se localiza al frente de las Costas del Sur del Perú y Costas Chilenas.

2.7.2 Placa Sudamericana

Su nombre proviene de dicho subcontinente, se extiende por toda América del Sur y una parte del Océano Atlántico. Su área comprende cerca de 9 millones de km².

Los límites de la Placa Sudamericana son la placa de Norteamérica y la placa del Caribe al norte, con placa Antártica al sur, la placa de Nazca limita al oeste, la placa sudamericana limita con la placa africana al este.

La Placa de Nazca al ser más compacta se mueve hacia el este, se inserta bajo el borde de la placa sudamericana, el fenómeno de subducción produce una colisión que a su vez responsable de levantar la Cordillera de los Andes y de provocar la aparición de los volcanes.

Sudamérica en la parte noroeste es de un borde convergente donde dos placas chocan, es la razón por su alta sismicidad, subducción, colisión arco-continente en curso y arcos volcánicos (Egbue & Kellogg, 2010).

2.8 CORDILLERA DE CARNEGIE

La Cordillera de Carnegie está ubicada entre las costas de Ecuador y las Islas Galápagos en el Océano Pacífico, es el resultado del movimiento de la placa de Nazca hasta la fosa de subducción sudamericana, con un ancho de 200 Km, la cual se inserta bajo el margen central ecuatoriano involucrando una deformación cortical importante. La parte norte de Carnegie separa el margen de Colombia-Ecuador en dos dominios y tectónicamente opuestos (Collot & Gutscher, M., 1999, 2002).

La cordillera de Carnegie influye en la zona de subducción, haciendo colisión con el Ecuador en las latitudes 1º Norte y 2º Sur. (Collot & Gutscher, M., 1999, 2002), La colisión de Carnegie entre las placas de Sudamericana y Nazca, en el norte se han provocado cuatro grandes sismos en 1906, 1942, 1958 y 1979, y uno a lo largo del flanco sur en 1901 (Cajamarca, 2018).

2.9 PELIGRO SÍSMICO, RIESGO SÍSMICO Y VULNERABILIDAD SÍSMICA.

2.9.2 Conceptos

PELIGRO SÍSMICO se define como la probabilidad de excedencia, de oscilaciones del suelo, cuyas variables como aceleración, desplazamiento, velocidad, magnitud o intensidad son cuantificados, en un rango de período de tiempo establecido y región determinada. (NEC-SE-DS, 2015).

RIESGO SÍSMICO se define como la evaluación de la vulnerabilidad y daños o pérdidas que en una estructura o grupo de estructuras podrían ocasionar, debido al peligro sísmico en el lugar de emplazamiento. La evaluación implica el cálculo de pérdida probable (PL), pérdida anual promedio (AAL), pérdidas para un escenario específico (SL), o todas las anteriores. (NEC-SE-RE, 2015).

En 1980 la UNESCO relaciona todos los aspectos del riesgo sísmico a través de la siguiente formulación.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Valor Económico}$$

VULNERABILIDAD SÍSMICA se define como el nivel de pérdida o daño de un elemento o varios elementos sujeta a riesgo, como resultado de la posible ocurrencia de un suceso catastrófico, presentada en una escala desde 0 sin daño a 1 pérdida total (Undro, 1979).

2.9.2 Teorema de Bayes

El análisis probabilístico conocido como Teorema de Bayes fue propuesto por el británico Thomas Bayes que fue matemático, estadístico, filósofo y miembro de Real Sociedad de Londres. Este teorema determina la probabilidad de que se presente un suceso con respecto a información previa de otro suceso.

Las ventajas de aplicación del Teorema de Bayes a la peligrosidad sísmica son debatidas por (Esteve, 1970) y resumidas por (Campbell, 1982). Una ventaja permite implementar incertidumbres asociadas con la estimación estadísticas de parámetros que son utilizados para cuantificar sismos esto es asociado a la aleatoriedad de ocurrencia de los mismos. Otra ventaja dice que se desarrolla un análisis a precisión al combinar resultados previos acerca de datos estadísticos sobre la observación histórica o valoración geológica, estos resultados se consideran complementarios a análisis sismológicos estadísticos incompletos mientras se adquiere nueva información.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A)}{P(B)}$$

Se calcula la probabilidad cumpliendo ciertas características, de que el evento A se produzca a consecuencia de que sucedió el evento B, esto es igual a la probabilidad de que el evento B se produzca dado que el evento A sucedió, esto multiplicada a la probabilidad de que el evento A suceda y se divide para la probabilidad de que el evento B se produzca.

CAPÍTULO III

MODELO FÍSICO DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA

3.1 SENSORES

ADXL335

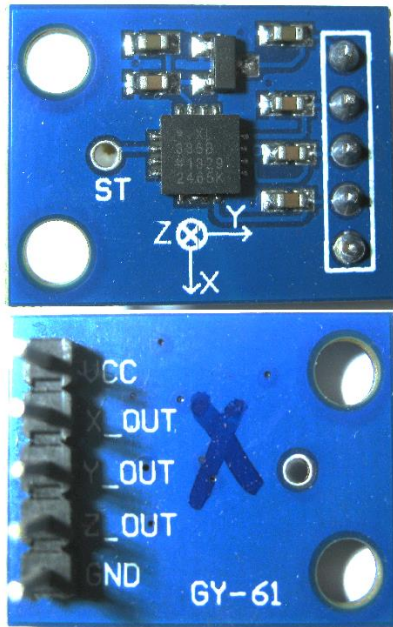


Figura 19: Acelerómetro ADXL335

Fuente: Autores

El sensor usado en el primer prototipo es un acelerómetro ADXL335 analógico, el dispositivo mide la aceleración provocada por un movimiento, impacto o vibración en 3 direcciones (X, Y, Z), tiene un rango de funcionamiento de $\pm 3g$, este sensor es de bajo consumo, se pueden obtener datos de aceleración y velocidad al mismo tiempo.

Especificaciones	
Detección:	3 ejes
Dimensiones:	20.5 mm x 15.2 mm x 3.45 mm
Bajo consumo de corriente:	Rango medio de 350 μA
Alimentación:	1.8 V a 3.6 V
Estabilidad térmica:	Buena

Tabla 1. Especificaciones ADXL335

Fuente: (AnalogDevices, 2009)

Diagrama funcional del acelerómetro.

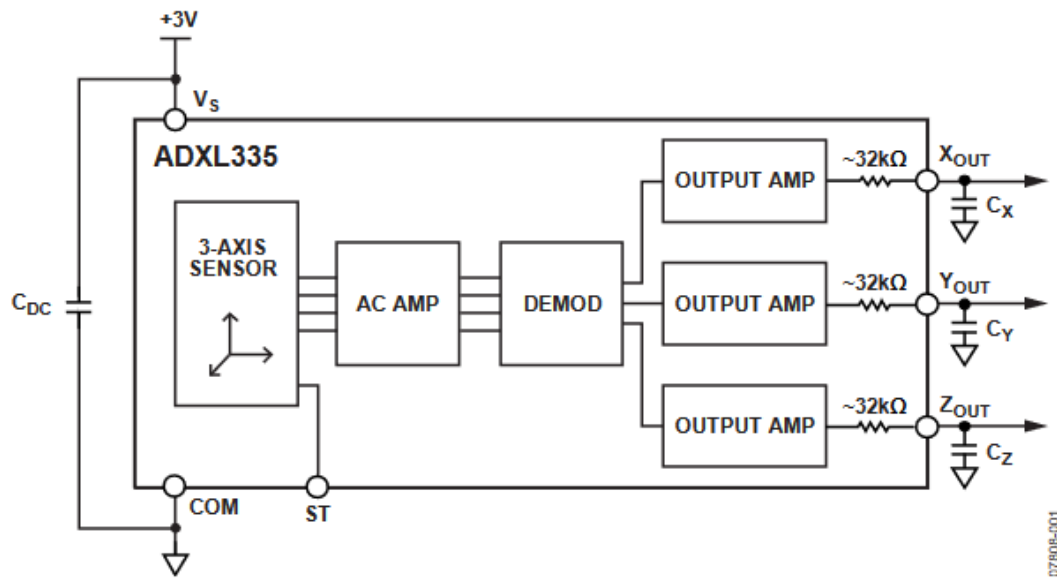


Figura 20: Diagrama funcional del ADXL 335

Fuente: (AnalogDevices, 2009)

MMA7361

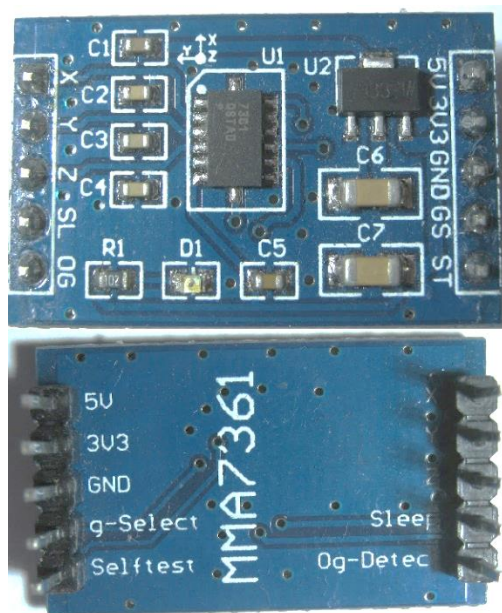


Figura 21: Acelerómetro MMA7361

Fuente: Autores

El sensor usado en el segundo prototipo es un acelerómetro MMA7361 analógico, el dispositivo mide la aceleración o inclinación en una plataforma con respecto al eje de la Tierra, cuenta con características como acondicionamiento de señal, del modo sleep y detección de caída libre. Este sensor puede realizar mediciones en las 3 direcciones (X, Y, Z) tiene un rango de funcionamiento de $\pm 1.5g$ o $\pm 6g$, su conexión se puede realizar tanto en Arduino como Raspberry.

Especificaciones	
Sensibilidad seleccionable:	$\pm 1.5g - \pm 6g$
Detección:	3 ejes
Dimensiones:	30 mm x 18.5 mm x 3.5 mm
Bajo consumo de corriente:	Rango medio de 400 μA
Alimentación:	2.2 V a 3.6 V
Estabilidad térmica:	Buena
Modo de espera:	3 μA
Diseño:	Robusto para resistencia al impacto
Tiempo de encendido:	5ms tiempo de respuesta

Tabla 2. Especificaciones MMA7361

Fuente: (Freescale, 2011)

Diagrama funcional del acelerómetro.

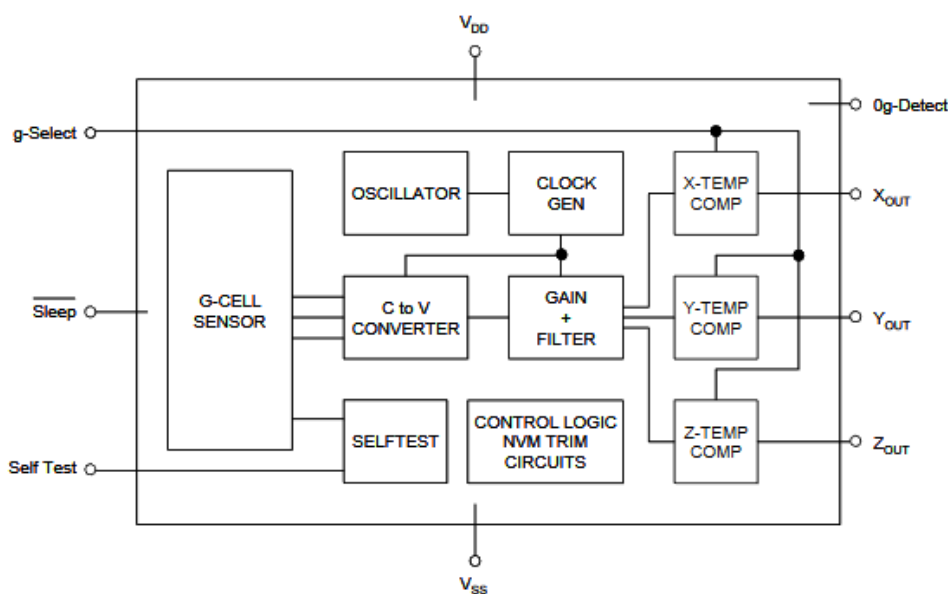


Figura 22 Diagrama funcional del MMA7361

Fuente: (Freescale, 2011)

ADXL345



Figura 23: Acelerómetro ADXL345

Fuente: Autores

El segundo sensor usado es un ADXL345 digital, este sensor reemplazo al MMA7361 que es analógico, en el segundo prototipo. El ADXL345 un acelerómetro pequeño y delgado, de bajo consumo, mide la aceleración dinámica y estática de la gravedad en aplicación de detección de inclinación en 3 direcciones (X, Y, Z), además de ser de alta resolución. La sensibilidad se puede ajustar a $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$, por lo que el menor valor proporciona más resolución en movimientos suaves, mientras que los valores altos se usan para movimientos rápidos. Los datos de salida con interfaz digital como: SPI y I2C. Posee características especiales como la detección de doble golpe, detección caída libre, detección de actividad e inactividad.

Especificaciones	
Detección:	3 ejes
Dimensiones:	25 mm x 19 mm x 3,14 mm
Modo de comunicación	I2C, SPI
Alimentación:	3,3 V a 5 V
Peso	1,27 g
Sensibilidad del acelerómetro:	$\pm 2g$ - $\pm 4g$ - $\pm 8g$ - $\pm 16g$

Tabla 3: Especificaciones ADXL345

Fuente: (AnalogDevices, 2009)

Diagrama funcional del acelerómetro.

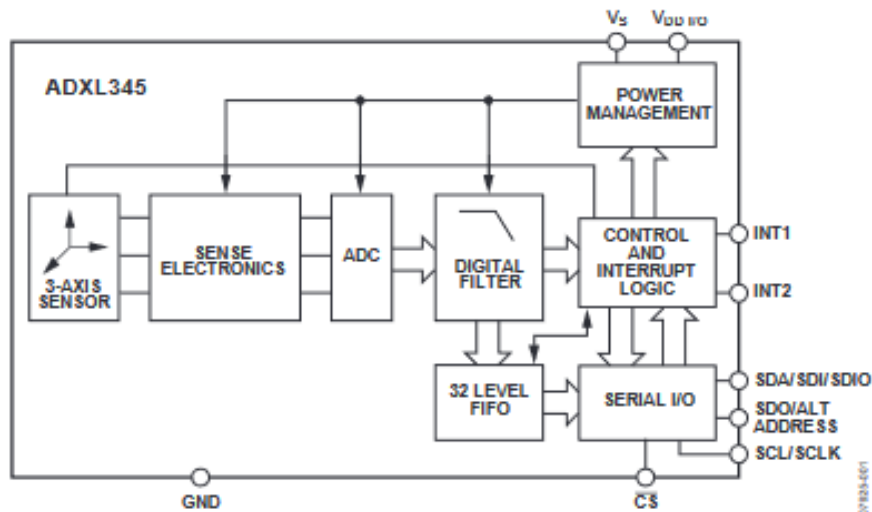


Figura 24: Diagrama funcional del ADXL 335

Fuente: (AnalogDevices, 2009)

MPU6050

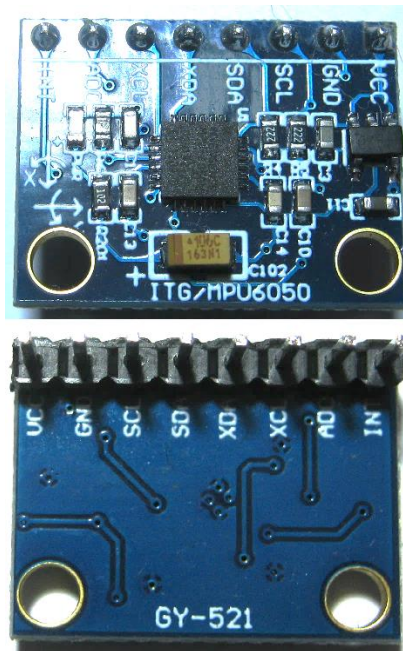


Figura 25: Acelerómetro MPU6050

Fuente: Autores

El sensor usado en el prototipo final (tercero) para el módulo de almacenamiento es un acelerómetro MPU6050 digital, es una Unidad de Medición Inercial o IMU, puede realizar 6 mediciones, las primeras 3 para las direcciones (X, Y, Z), y las 3 mediciones restantes las realiza un giroscopio de 3 ejes, tiene un rango de

funcionamiento de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$, y el giroscopio cuenta con un rango de funcionamiento de $\pm 250^\circ/\text{seg}$, $\pm 500^\circ/\text{seg}$, $\pm 1000^\circ/\text{seg}$ y $\pm 2000^\circ/\text{seg}$, este dispositivo puede realizar mediciones de temperatura y cuenta con un reloj de alta precisión. Su conexión se puede realizar tanto en Arduino como Raspberry en la mayoría de módulos.

El procesado interno del IMU realiza cálculos precisos de los valores que miden sus sensores internos que pueden ser aceleraciones lineales y angulares, la comunicación del MPU6050 se realiza mediante vía I2C (Circuito Inter Integrado o Inter-Integrated Circuit).

Especificaciones	
Sensibilidad del acelerómetro:	$\pm 2g$ - $\pm 4g$ - $\pm 8g$ - $\pm 16g$
Sensibilidad del giroscopio:	$\pm 250^\circ/\text{seg}$ - $\pm 500^\circ/\text{seg}$ - $\pm 1000^\circ/\text{seg}$ - $\pm 2000^\circ/\text{seg}$
Detección:	6 ejes
Dimensiones:	21.2 mm x 16.4 mm x 3.3 mm
Alimentación:	2.37 V a 3.46 V
Modo de comunicación:	Protocolo I2C
Sensor temperatura:	Digital

Tabla 4. Especificaciones MPU6050

Fuente: (Invensense, 2013)

Diagrama funcional del acelerómetro.

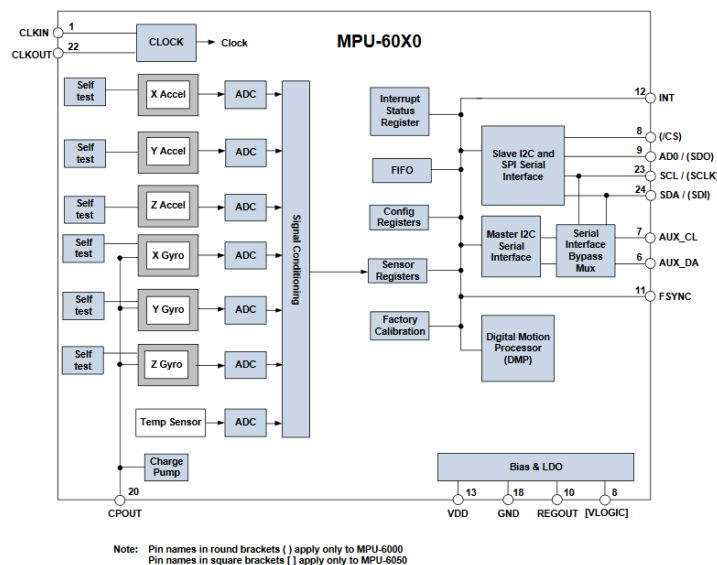


Figura 26: Diagrama funcional del MPU6050

Fuente: (Invensense, 2013)

MPU9250



Figura 27: Acelerómetro MPU9250

Fuente: Autores

El segundo sensor también usado en el prototipo final (tercero) para el módulo de alerta es un acelerómetro MPU9250 digital, es una Unidad de Medición Inercial o IMU al igual que el MPU6050, puede realizar 9 mediciones, las primeras 3 para las direcciones (X, Y, Z), otras 3 mediciones las realiza un giroscopio de 3 ejes, y las 3 mediciones restantes las realiza un magnetómetro de 3 ejes, todos estos movimientos captados por un procesador digital de movimiento, tiene un rango de funcionamiento de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$, y el giroscopio cuenta con un rango de funcionamiento de $\pm 250^\circ/\text{seg}$, $\pm 500^\circ/\text{seg}$, $\pm 1000^\circ/\text{seg}$ y $\pm 2000^\circ/\text{seg}$, este dispositivo posee una amplia librería de fácil acceso para su uso de manera inmediata. Su conexión se puede realizar tanto en Arduino como Raspberry en la mayoría de módulos. La comunicación del

MPU9250 se realiza mediante vía I2C (Circuito Inter Integrado o Inter-Integrated Circuit).

Especificaciones	
Sensibilidad del acelerómetro:	$\pm 2g - \pm 4g - \pm 8g - \pm 16g$
Sensibilidad del giroscopio:	$\pm 250^\circ/\text{seg} - \pm 500^\circ/\text{seg} - \pm 1000^\circ/\text{seg} - \pm 2000^\circ/\text{seg}$
Sensibilidad del magnetómetro:	$\pm 4800\mu\text{T}$
Detección:	9 ejes
Dimensiones:	20 mm x 16 mm x 30 mm
Alimentación:	3 V a 5 V
Modo de comunicación:	Protocolo I2C y SPI

Tabla 5: Especificaciones MPU9250

Fuente: (invensense, 2016)

Diagrama funcional del acelerómetro.

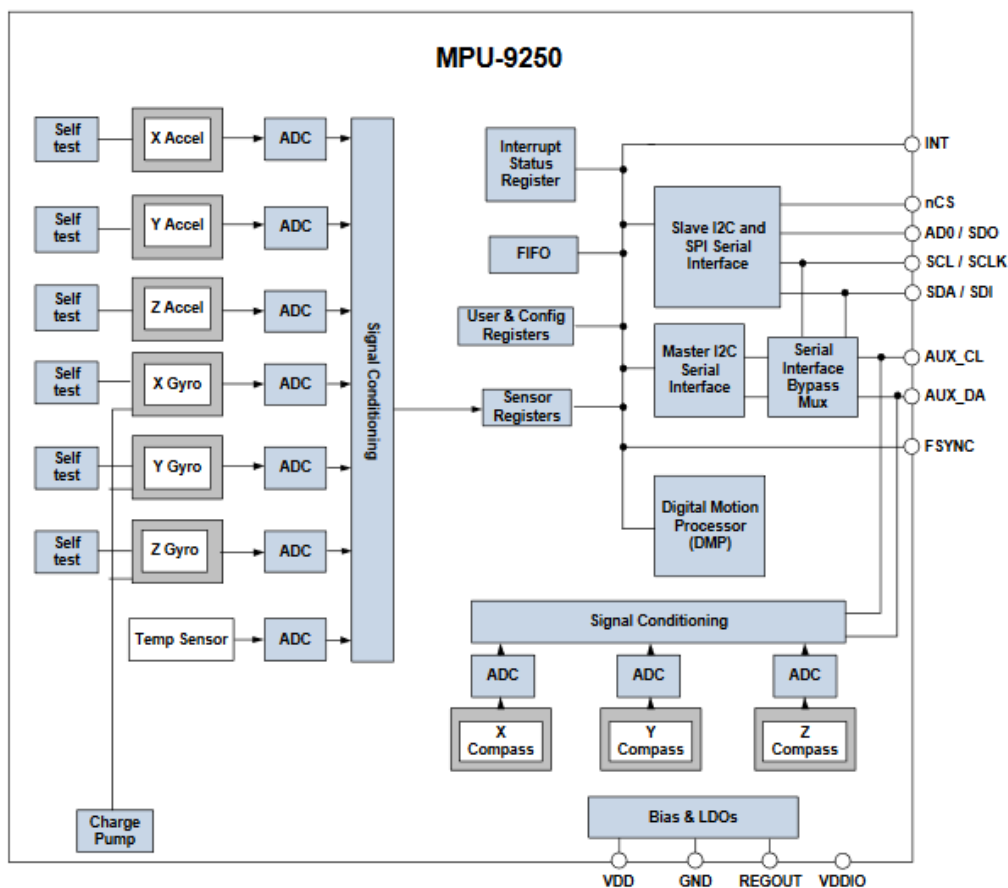


Figura 28: Diagrama funcional del MPU6050

Fuente: (invensense, 2016)

Reloj RTC DS3231

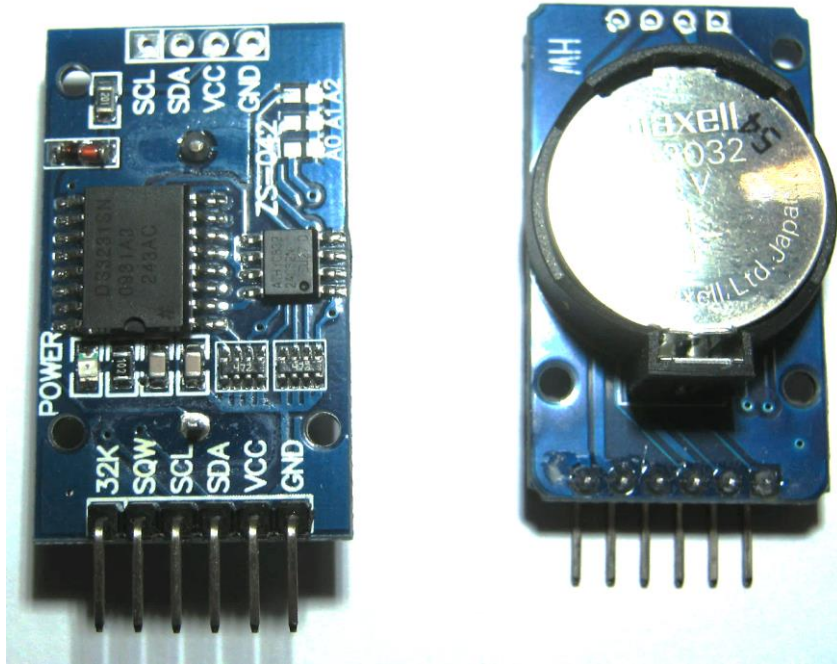


Figura 29: RTC DS3231

Fuente: Autores

El reloj de tiempo real DS3231 es un módulo de alta precisión y bajo consumo siendo alimentado por batería, cuenta con un oscilador interno y un compensador de temperatura, cuenta con una precisión de 2ppm, su batería de respaldo tiene una autonomía de 10 años. Este dispositivo fue usado en el segundo prototipo y en prototipo final.

Especificaciones	
Exactitud:	2ppm
Comunicación:	Protocolo I2C
Voltaje de Operación:	3.3V - 5V
Formato de hora:	12 o 24 horas

Tabla 6. Especificaciones RTC DS3231

Fuente: (components101RTC, 2018)

3.2 DIGITALIZADOR

3.2.1 Arduino Uno

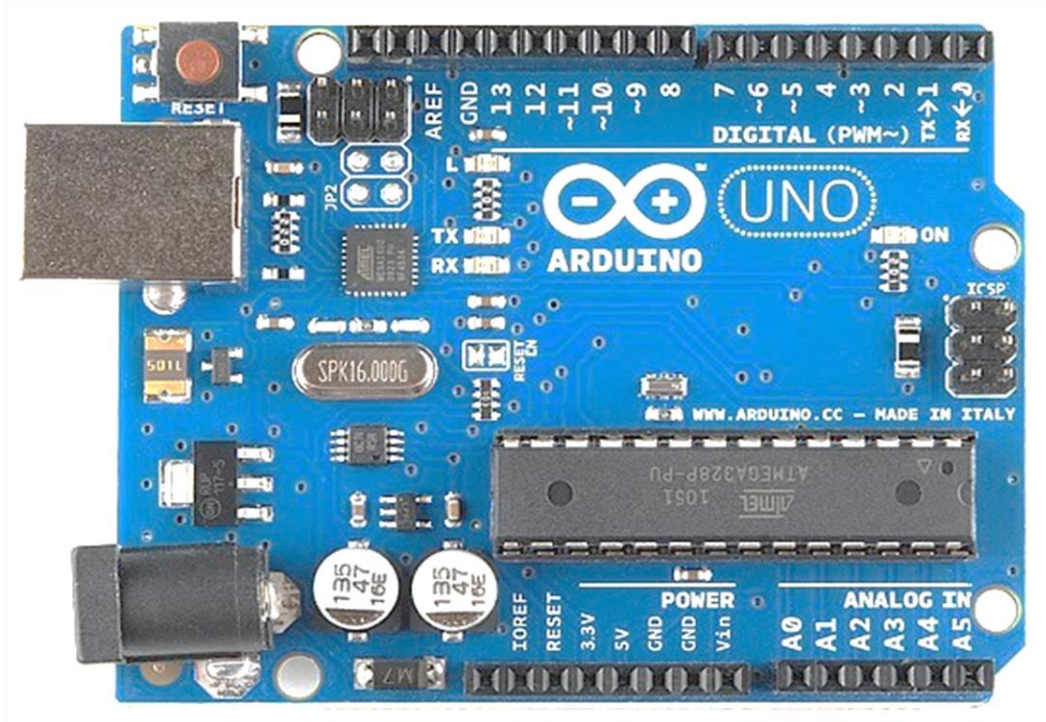


Figura 30: Arduino Uno

Fuente: Autores

Arduino es una plataforma de desarrollo Open source, en la cual se la programa códigos en lenguaje Java. En el prototipo es la parte que va a recibir los datos del sensor y reloj, concatenarlos en una cadena de texto y guardarlo en la memoria MicroSD. Este dispositivo fue utilizado en el primer prototipo.

Especificaciones	
Alimentación:	5V
Voltaje de entrada (recomendado):	7-12V
Memoria flash:	32KB
Velocidad de reloj:	16 MHz
Dimensiones:	68,6 mm x 53,4 mm
Peso:	25 g

Tabla 7. Especificaciones Arduino Uno

Fuente: (components101UNO, 2018)

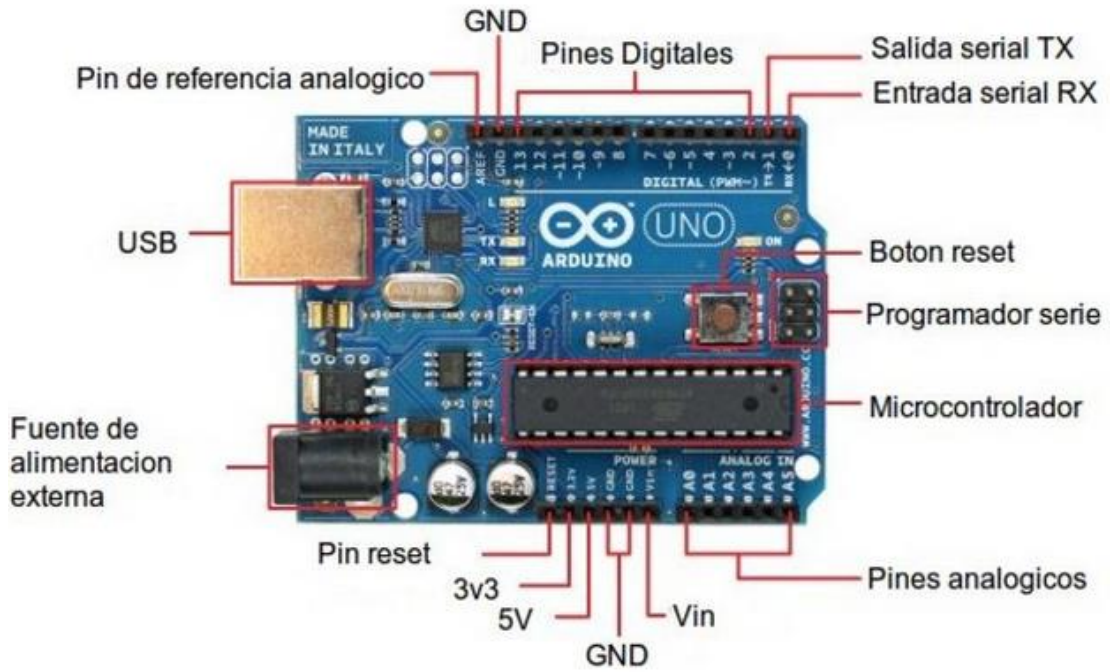


Figura 31: Diagrama de pines de Arduino Uno

Fuente: (Infootec)

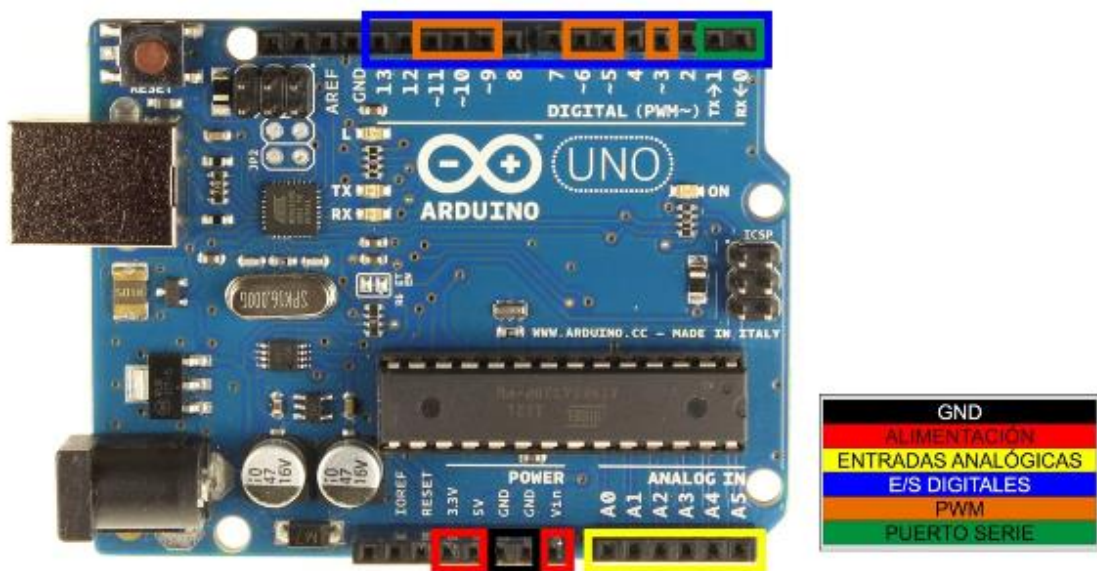


Figura 32: Entradas y salidas E/S Arduino Uno

Fuente: (Zonamaker)

3.2.2 Arduino Nano

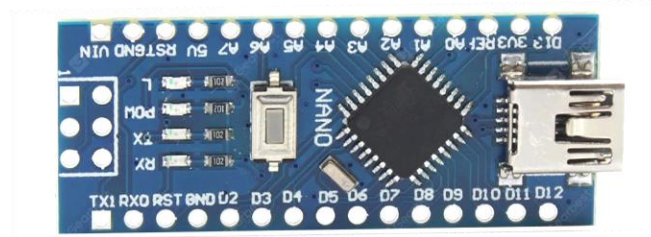


Figura 33: Arduino Nano

Fuente: Autores

El Arduino Nano es de tamaño reducido a comparación del Arduino Uno y compartiendo muchas de sus características. Se puede manejar fácilmente por sus dimensiones y conectividad. Este dispositivo fue utilizado en el segundo prototipo y en el prototipo final.

Especificaciones	
Alimentación:	5V
Voltaje de entrada (recomendado):	7-12V
Memoria flash:	32KB
Velocidad de reloj:	16 MHz
Dimensiones:	45 mm x 18 mm
Peso:	5 g

Tabla 8. Especificaciones Arduino Nano

Fuente: (components101Nano, 2018)

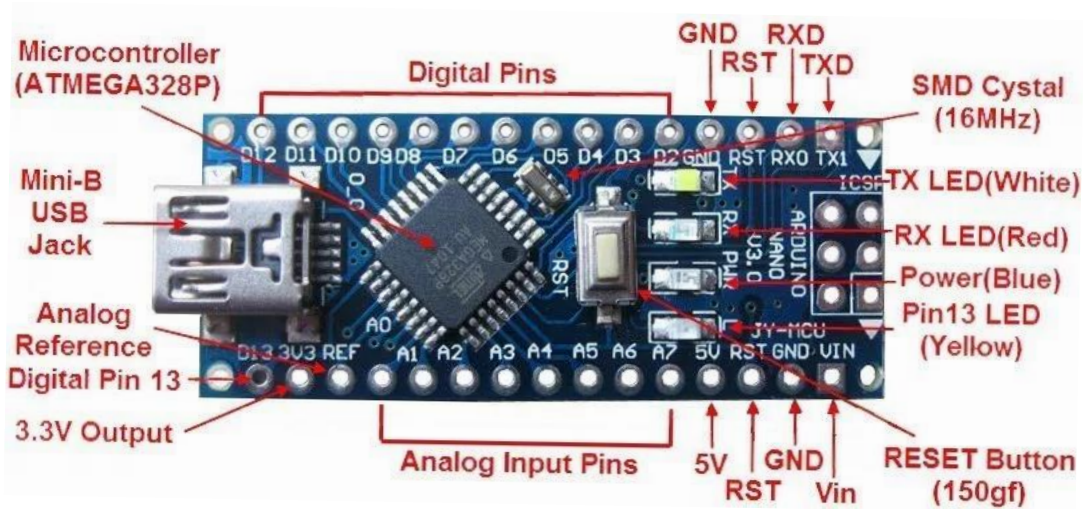


Figura 34: Diagrama de pines de Arduino Nano

Fuente: Patagoniatec

3.2.3 Raspberry Pi 3 B

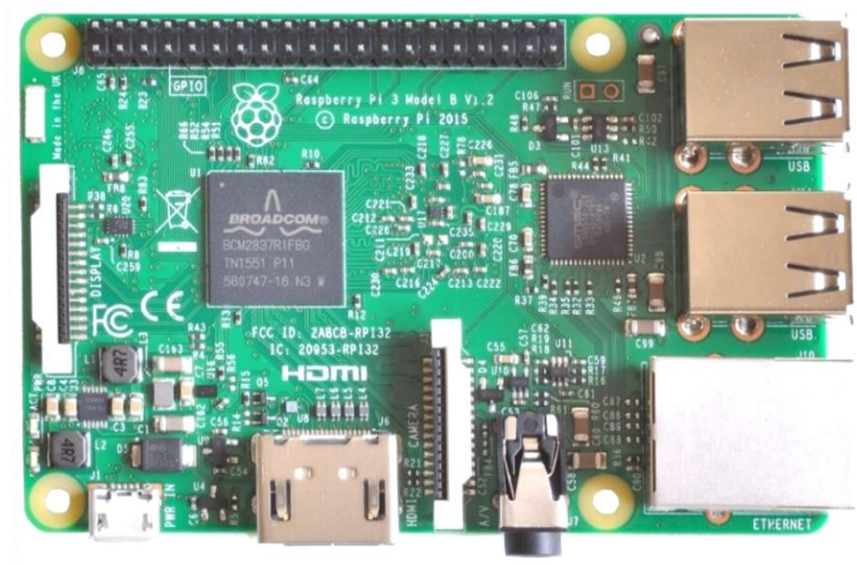


Figura 35: Raspberry Pi 3 b

Fuente: Autores

El Raspberry PI 3 B es una computadora de placa reducida sus dimensiones son 85x56x17mm cuenta con 4 puertos USB, conexión Ethernet, HDMI, procesador Quad-Core 64 bits a 1.2 GHz, 1 GB de RAM. Se puede utilizar para sistemas de seguridad, sistemas de automatización, aplicaciones de internet, robótica y servidores. Su sistema operativo Raspbian se basa en la distribución de Linux soporta herramientas en software libre como Python. Esta es la tercera generación del Raspberry Pi este dispositivo soporta Ubuntu y Windows 10, esta versión a diferencia de la segunda generación integra conexión Wi-Fi y Bluetooth. Este dispositivo fue utilizado en el segundo prototipo y en el prototipo final.

Especificaciones	
Procesador:	Procesador de núcleo Broadcom BCM2837 de 64 bits
Memoria:	SDRAM de 1 GB
Bluetooth:	Bluetooth 4.1 - Bluetooth 4.2
Ethernet:	2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN
USB:	4 USB 2.0
HDMI:	1 tamaño completo
Almacenamiento:	Ranura de tarjeta microSD
Alimentación:	Conector USB para 5,1 V / 2,5 A DC

Tabla 9. Especificaciones Raspberry Pi 3 B

Fuente: (alliedelec, 2018)

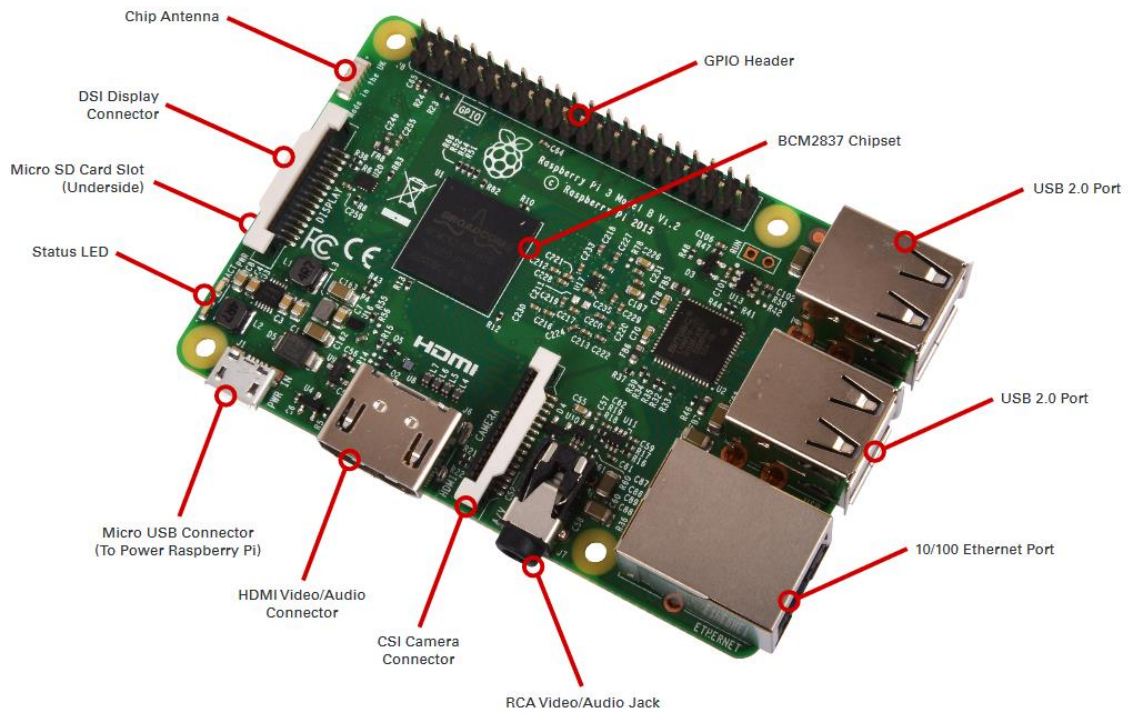


Figura 36: Entradas y salidas E/S Raspberry Pi 3 B

Fuente: (Alliedelec)

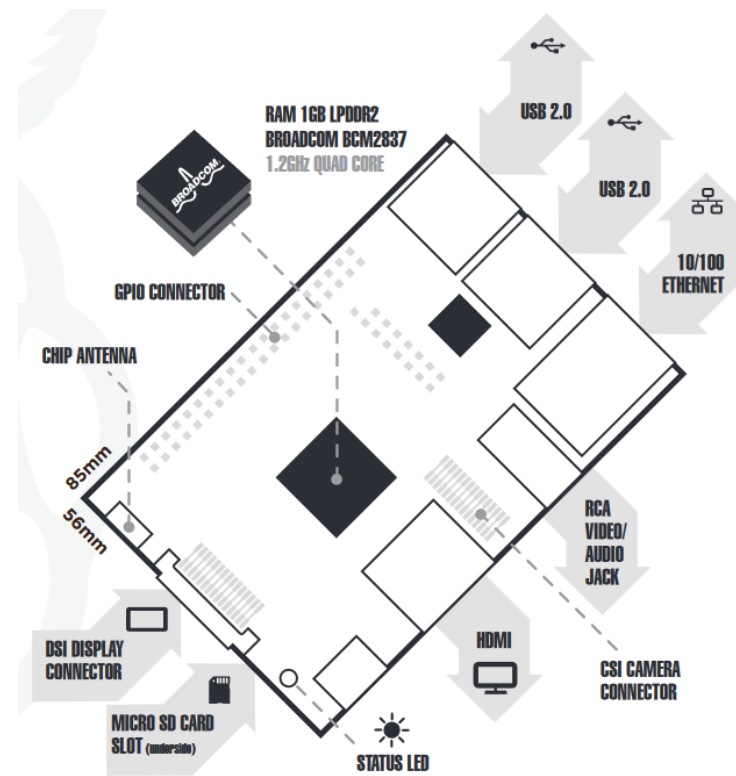


Figura 37: Diagrama funcional Raspberry Pi 3 Model B

Fuente: (Alliedelec)

3.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

3.3.1 CONTROLADOR DE CARGA

El adaptador de energía permite mantener a la tensión AC común a niveles DC óptimos para el funcionamiento del controlador Arduino o Raspberry y todos sus módulos. Este dispositivo fue utilizado en todos los prototipos.



Figura 38: Sistema de alimentación

Fuente: Autores

3.3.2 BATERÍA

Power Bank

El Power Bank o cargador portátil es un banco de baterías LiOn (polímero de litio) en las cuales se almacena energía para ser utilizada en un momento de no tener acceso a un tomacorriente. Para el prototipo se lo planea utilizar con respaldo de energía en caso de corte, siendo conectado en paralelo al prototipo. Este dispositivo fue utilizado en el segundo prototipo.



Figura 39: Power Bank

Fuente: Autores

Batería o Acumulador

La batería o acumulador es un dispositivo que cuenta con una o más celdas en las cuales se almacena energía para ser utilizada en un momento de corte de del servicio de luz eléctrica. Un parámetro a tener en cuenta al momento de seleccionar una batería es la capacidad o su duración, la cantidad de electricidad se mide en amperios hora o desde la carga total hasta la descarga completa o que el servicio de luz eléctrica sea restablecido. Este dispositivo fue utilizado en el prototipo final.



Figura 40: Batería o Acumulador

Fuente: Autores

3.4 ADQUISICIÓN DE DATOS

Módulo MicroSD

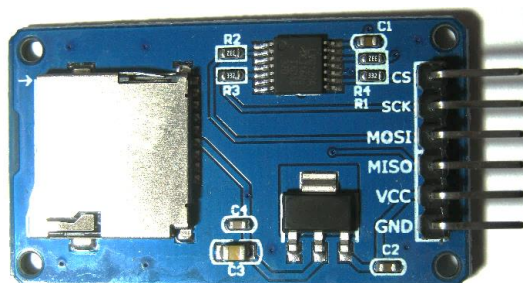


Figura 41: Módulo MicroSD

Fuente: Autores

El módulo de MicroSD permite acoplar una memoria SD a un Arduino dando la opción de leer y escribir información en la misma, las memorias SD son las más comúnmente usadas en nuestro medio, siendo baratas y de gran capacidad. Este dispositivo fue utilizado en el segundo prototipo y en el prototipo final.

3.5 FUNCIONAMIENTO DEL PRIMER PROTOTIPO

El primer prototipo trabaja en un único módulo de alerta y almacenamiento. El controlador Arduino Uno adquiere los datos del sensor acelerómetro ADXL335, los 3 ejes coordenados, concatena estos datos con la hora y la fecha del momento de la adquisición, los convierte en una cadena de texto String y los almacena en la memoria MicroSD, en lo posterior se descarga los datos en una computadora y se los procesa con ayuda de software matemático o especializado. La alimentación de energía del prototipo será por medio de una fuente de alimentación común, por el bajo consumo de energía, pero además se conectará un Power Bank o cargador portátil para que en caso de corte del suministro de energía publica este mismo alimente al prototipo.

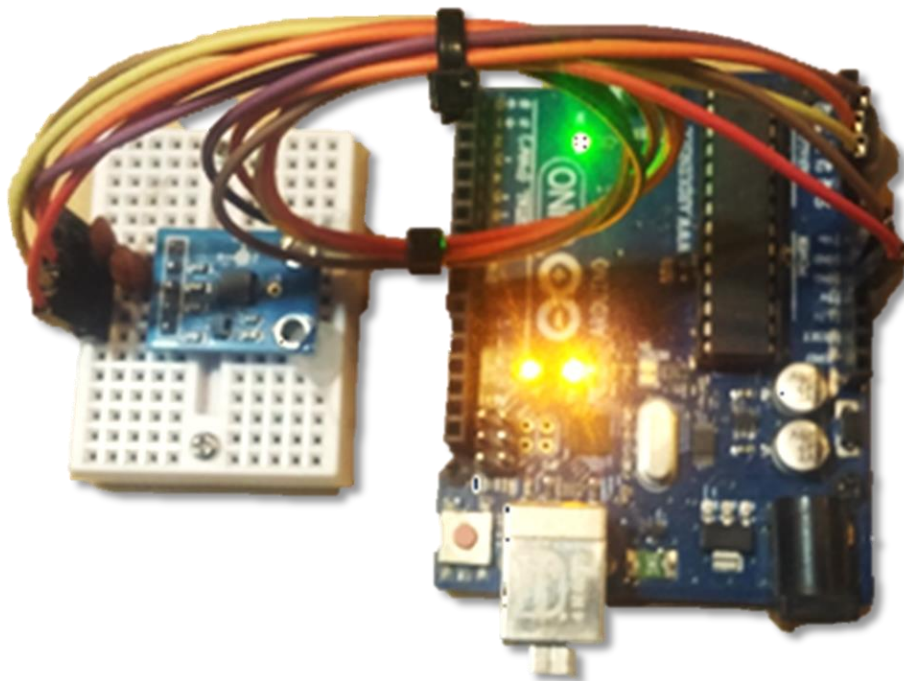


Figura 42: Primer Prototipo

Fuente: Autores

Especificaciones	
Base del sistema de alerta y sistema de almacenamiento:	Arduino Uno
Sensor del sistema de alerta y almacenamiento:	ADXL335
Memoria del sistema de alerta y sistema de almacenamiento:	MicroSD
Batería del sistema de alerta y sistema de almacenamiento:	Power Bank

Tabla 10. Especificaciones del Primer Prototipo

Fuente: Autores

3.6 FUNCIONAMIENTO DEL SEGUNDO PROTOTIPO

El segundo prototipo como el anterior trabaja en un único módulo de alerta y almacenamiento. Se utiliza el Arduino Nano por motivos de espacio a comparación del Arduino Uno que es más grande. Se probaron 3 sensores, el MMA7361, ADXL345 y el MPU6050. Siendo el MPU6050 el seleccionado para colocarlo en el segundo prototipo, además como base se colocó un protoboard al que se conectó Reloj RTC DS3231 y el Módulo MicroSD. Se realizaron las pruebas con los otros acelerómetros, pero el resultado no fue el deseado al momento del análisis. Al igual que el primer prototipo se concatenan los datos de hora y fecha, con los datos de las aceleraciones en los 3 ejes coordenados (X, Y, Z), se los envía a la memoria microSD y se procesan los datos en una computadora, en software especializado. El prototipo se alimenta de una fuente de energía, además se proporciona un cargador portátil (Power Bank) en el caso de un corte de energía pública.



Figura 43: Segundo Prototipo (a)

Fuente: Autores

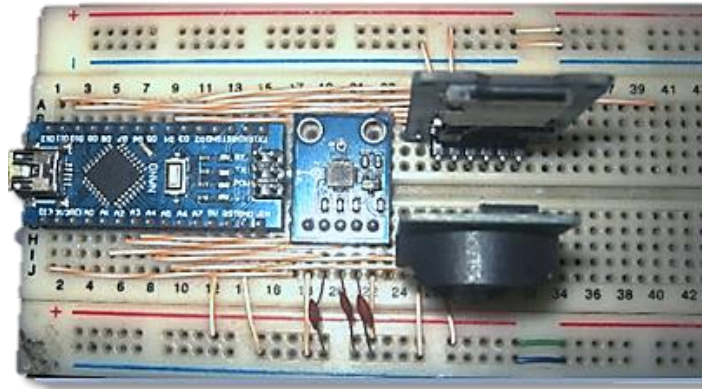


Figura 44: Segundo Prototipo (b)

Fuente: Autores

Especificaciones	
Base del sistema de alerta y sistema de almacenamiento:	Arduino Nano
Sensor del sistema de alerta y almacenamiento:	MPU6050
Memoria del sistema de alerta y sistema de almacenamiento:	MicroSD
Batería del sistema de alerta y sistema de almacenamiento:	Power Bank
Reloj del sistema de alerta y sistema de almacenamiento:	RTC DS3231

Tabla 11. Especificaciones del Segundo Prototipo

Fuente: Autores

3.7 FUNCIONAMIENTO DEL TERCER PROTOTIPO

El tercer prototipo se diferencia de los primeros 2 prototipos porque se utiliza el Arduino Nano como módulo de alerta y el Raspberry Pi 3 B conjuntamente como módulo de almacenamiento, durante las pruebas del segundo prototipo el Arduino Nano no tuvo suficiente capacidad para el almacenamiento de datos y dar la alerta. Por lo que se eligió realizar el almacenamiento de datos con el Raspberry Pi 3 B con el acelerómetro MPU6050 en un rango de $\pm 2g$ para valores más precisos con una resolución de 16 bits, los datos almacenados en 3 direcciones (X, Y, Z) son guardados en la memoria interna del mismo y estos son guardados en un archivo de formato de texto para su posterior análisis. La alerta se realizará en el Arduino Nano con el acelerómetro MPU9250 trabajando el mismo en un rango de $\pm 2g$ y una resolución de 16 bits al igual que el MPU6050.

El sistema de alerta trabajara con el Reloj RTC DS3231 y el Módulo MicroSD. La microSD almacena la fecha y hora del momento que ocurre un sismo, este archivo de texto es independiente del que se tiene en el Raspberry 3B. El prototipo se lo conectará el sistema de energía eléctrica del edificio y tendrá una batería de plomo para el caso de corte del suministro de energía pública.

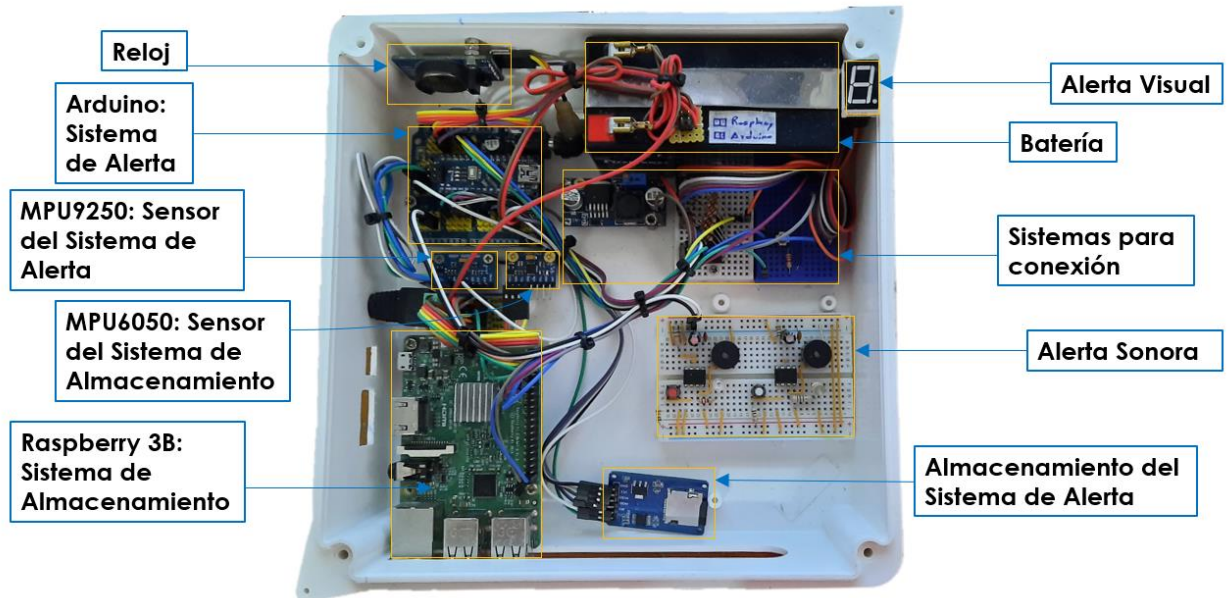


Figura 45: Tercer Prototipo

Fuente: Autores

Especificaciones	
Base del sistema de alerta:	Arduino Nano
Sensor del sistema de alerta:	MPU9250
Base del sistema de almacenamiento:	Raspberry Pi 3 B
Sensor del sistema de almacenamiento:	MPU6050
Memoria del sistema de alerta:	MicroSD para Arduino Nano
Memoria del sistema de almacenamiento:	MicroSD para Raspberry Pi 3 B
Reloj del sistema de alerta:	RTC DS3231
Reloj del sistema de almacenamiento:	Reloj integrado del Raspberry Pi 3 B
Sistema de alerta visual:	Display de 7 segmentos
Sistema de alerta sonoro:	2 Buzzer
Batería:	Batería seca

Tabla 12. Especificaciones del Tercer Prototipo

Fuente: Autores

CAPÍTULO IV

MODELO MATEMÁTICO DEL PROTOTIPO SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA

4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos para un registro sísmico debe contener los datos de la fecha que lleva día, mes y el año, a su vez debe tener el tiempo que debe contener las horas, minutos y segundos y en este caso los datos de las 3 direcciones (X, Y, Z), que proporciona los acelerómetros MPU6050 y MPU9250. En el caso del Raspberry Pi 3 B cuenta con su propio reloj por lo que de este se obtienen los datos de fecha y hora. En el caso del Arduino Nano se obtiene la fecha y hora del componente Reloj RTC DS3231. En ambos casos se guardarán los datos en archivos de extensión (.TXT) que es un formato de texto de fácil manejo. El formato utilizado para los datos será el que se muestra en la siguiente figura.

FECHA		
Día	Mes	Año

HORA		
Hora	Minutos	Segundos

ACELEROMETRO		
Eje X	Eje Y	Eje Z

Figura 46: Formato de registro

Fuente: Autores

2019-10-29	22:09:22.362843	EJE X: 1.0283203125	EJE Y: -0.004150390625	EJE Z: -0.10009765625
2019-10-29	22:09:22.365801	EJE X: 1.018310546875	EJE Y: 0.001708984375	EJE Z: -0.09033203125
2019-10-29	22:09:22.368750	EJE X: 1.02587890625	EJE Y: -0.003662109375	EJE Z: -0.10400390625
2019-10-29	22:09:22.371679	EJE X: 1.021240234375	EJE Y: -0.003173828125	EJE Z: -0.099365234375
2019-10-29	22:09:22.374634	EJE X: 1.023681640625	EJE Y: -0.005615234375	EJE Z: -0.101318359375
2019-10-29	22:09:22.377815	EJE X: 1.017578125	EJE Y: -0.004150390625	EJE Z: -0.10205078125
2019-10-29	22:09:22.380974	EJE X: 1.0234375	EJE Y: -0.004150390625	EJE Z: -0.09814453125
2019-10-29	22:09:22.383930	EJE X: 1.02490234375	EJE Y: -0.0029296875	EJE Z: -0.108642578125
2019-10-29	22:09:22.386759	EJE X: 1.015869140625	EJE Y: -0.002685546875	EJE Z: -0.0927734375
2019-10-29	22:09:22.389545	EJE X: 1.01806640625	EJE Y: -0.002685546875	EJE Z: -0.10595703125
2019-10-29	22:09:22.392227	EJE X: 1.0224609375	EJE Y: 0.01318359375	EJE Z: -0.092041015625
2019-10-29	22:09:22.394907	EJE X: 1.018798828125	EJE Y: -0.007080078125	EJE Z: -0.097900390625
2019-10-29	22:09:22.397560	EJE X: 1.0224609375	EJE Y: -0.005126953125	EJE Z: -0.099609375

Figura 47: Ejemplo de Registro del Raspberry Pi 3 B

Fuente: Autores

Para un mejor desempeño del almacenamiento que realiza el Raspberry Pi 3 B se procedió a crear un registro de cada hora que almacena la información, por lo que se modificó el archivo guardando ahora los datos de la fecha y hora en el nombre del mismo como se indica en la siguiente figura.

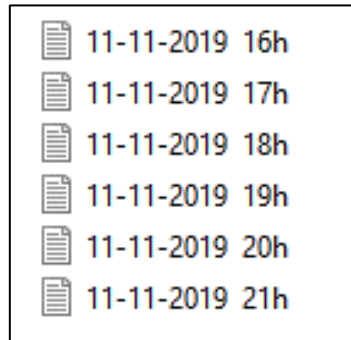


Figura 48: Ejemplo de registro final de archivos del Raspberry Pi 3 B

Fuente: Autores

20:31:41	X:0.0087890625	Y: -0.02392578125	Z: 0.93896484375
20:31:41	X:0.01025390625	Y: -0.02001953125	Z: 0.934326171875
20:31:41	X:0.012451171875	Y: -0.02392578125	Z: 0.946044921875
20:31:42	X:0.013671875	Y: -0.017333984375	Z: 0.945068359375
20:31:42	X:0.001708984375	Y: -0.01513671875	Z: 0.9228515625
20:31:42	X:0.008544921875	Y: -0.018310546875	Z: 0.9306640625
20:31:42	X:0.013427734375	Y: -0.031982421875	Z: 0.939697265625
20:31:42	X:0.01904296875	Y: -0.0185546875	Z: 0.9375
20:31:42	X:0.01171875	Y: -0.023681640625	Z: 0.935546875
20:31:43	X:0.026123046875	Y: -0.022705078125	Z: 0.94189453125
20:31:43	X:0.013427734375	Y: -0.01806640625	Z: 0.940185546875
20:31:43	X:0.011474609375	Y: -0.020751953125	Z: 0.931884765625
20:31:43	X:0.010986328125	Y: -0.0224609375	Z: 0.94970703125

Figura 49: Ejemplo de registro final de datos del Raspberry Pi 3 B

Fuente: Autores

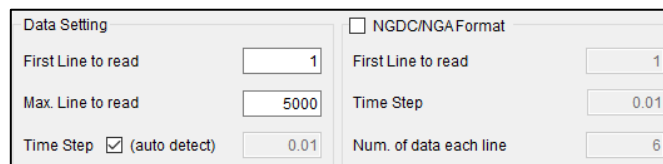
4.1.1 Procesamiento de datos

Los datos obtenidos en el prototipo son presentados en un archivo de formato de Texto (.txt), estos son importados a Excel para posteriormente ingresarlos en el programa PRISM en el formato adecuado, se debe separar cada eje en un archivo individual para su análisis. En el programa PRISM se importan los datos de la siguiente manera siendo la primera columna el paso del tiempo y la segunda columna la aceleración.

4.2 ANÁLISIS DE ONDAS SÍSMICAS

4.2.1 Software de análisis de las ondas sísmicas

El programa PRISM puede leer datos de acelerómetros en 2 formatos, uno de ellos en 2 columnas la primera con el tiempo y la segunda columna con la aceleración. El segundo formato es Next Generation Attenuation Model (NGA) o el National Geographical Data Center (NGDC), el ingreso de los datos en los 2 formatos se muestra a continuación.

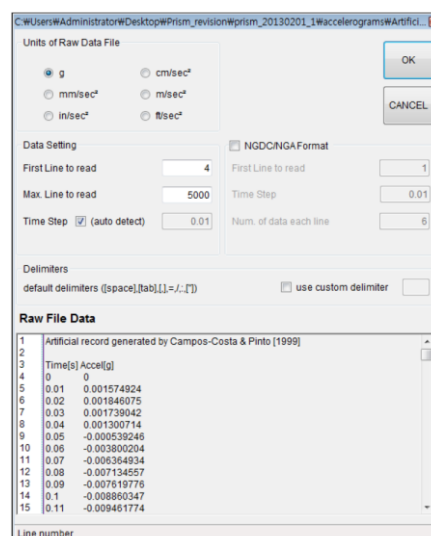


Data Setting	<input type="checkbox"/> NGDC/NGA Format		
First Line to read	1	First Line to read	1
Max. Line to read	5000	Time Step	0.01
Time Step <input checked="" type="checkbox"/> (auto detect)	0.01	Num. of data each line	6

Figura 50: Formato de ingreso de datos del programa PRISM

Fuente: Manual de PRISM

Las unidades para el ingreso de las señales que permite el programa PRISM son g, m/seg², plg/seg², mm/seg², cm/seg², ft/seg². Se debe seleccionar la línea desde la cual se va a leer los registros de tiempo y aceleración. En el caso del primer formato de ingreso se debe colocar el paso del tiempo o permitir que el programa directamente lea este paso del archivo, en caso del segundo formato se debe ingresar el paso del tiempo.



Units of Raw Data File	<input checked="" type="radio"/> g	<input type="radio"/> cm/sec ²	
	<input type="radio"/> mm/sec ²	<input type="radio"/> m/sec ²	
	<input type="radio"/> in/sec ²	<input type="radio"/> ft/sec ²	
Data Setting	<input type="checkbox"/> NGDC/NGA Format		
First Line to read	4	First Line to read	1
Max. Line to read	5000	Time Step	0.01
Time Step <input checked="" type="checkbox"/> (auto detect)	0.01	Num. of data each line	6
Delimiters	default delimiters [space][tab][,][.][:][']	<input type="checkbox"/> use custom delimiter	
Raw File Data	Artificial record generated by Campos-Costa & Pinto [1999]		
1	Time[s]	Acce[g]	
2	0	0	
3	0	0	
4	0	0	
5	0.01	0.001574924	
6	0.02	0.001846075	
7	0.03	0.001739042	
8	0.04	0.001300714	
9	0.05	-0.000538246	
10	0.06	-0.003800204	
11	0.07	-0.006364934	
12	0.08	-0.007134557	
13	0.09	-0.007619776	
14	0.1	-0.008860347	
15	0.11	-0.009461774	

Figura 51: Ejemplo del ingreso de datos del primer formato en el programa PRISM

Fuente: Manual de PRISM

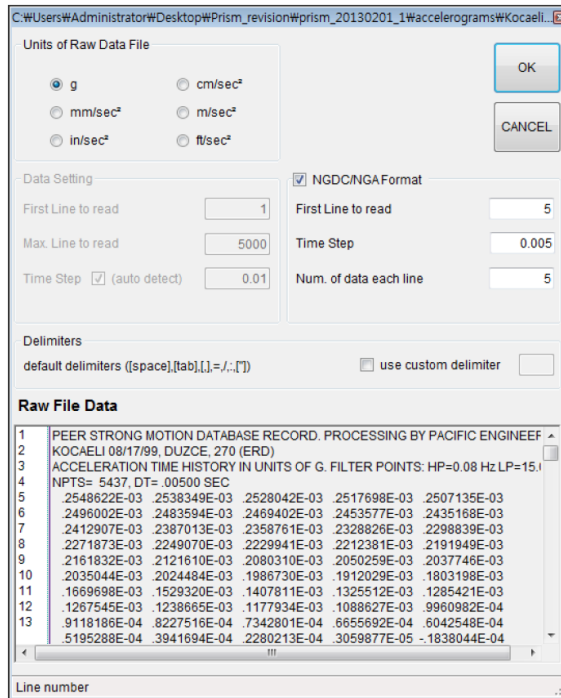


Figura 52: Ejemplo del ingreso de datos del segundo formato en el programa PRISM

Fuente: Manual de PRISM

4.2.2 Tratamiento de las ondas sísmicas

El tratamiento de las señales de aceleraciones se procederá con un ejemplo que presenta el programa en este caso el archivo utilizado es “Corralitos.dat”.

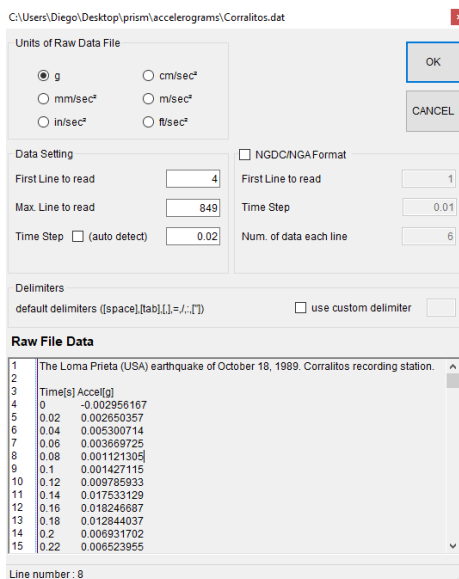


Figura 53: Ejemplo del ingreso de datos del ejemplo “Corralitos.dat”

Fuente: Autores

Los datos que se muestran a continuación no presentan ningún tipo de filtrado.

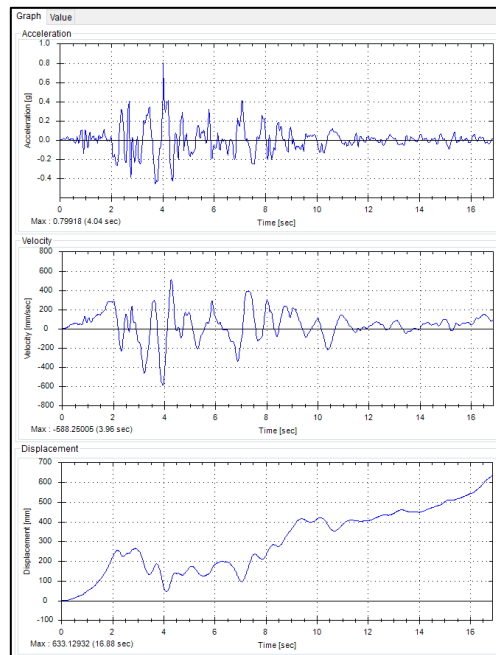


Figura 54: Ejemplo de valores correspondientes a la Aceleración, Velocidad y Desplazamiento sin filtros ni correcciones “Corralitos.dat”

Fuente: Autores

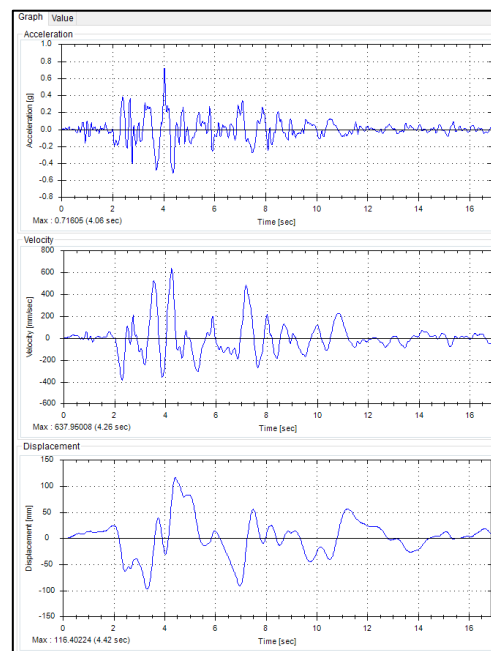


Figura 55: Ejemplo de valores correspondientes a la Aceleración, Velocidad y Desplazamiento aplicado filtro Butterworth y corrección de línea base “Corralitos.dat”

Fuente: Autores

4.3 ANÁLISIS DE ALERTA DEL PROTOTIPO

Especificaciones de la alerta	
Unidades acelerómetro:	g
Activación del sensor:	>0.092g
Sensor:	MPU9250
Alerta sonora:	2 Buzzer(zumbadores) Display (Intensidad en la escala Modificada de Mercalli)
Alerta visual:	
Percepción del sismo por las personas (IMM-VI):	Fuerte
Probabilidad de daño potencial de las estructuras (IMM-VI):	Ligero - Leve
Tipos de daños presentados (IMM-VI):	Casos de agrietamientos en paredes de bloque, estuco, carrizo y adobe. Caída de recubrimientos débiles.

Tabla 13: Especificaciones del sistema de alerta.

Fuente: Autores

El módulo del sistema de alerta funciona en el Arduino Nano con el acelerómetro MPU 9250, se activa cuando la aceleración sobrepase un valor mayor o igual a 0.092g (Intensidad VI - Escala Modificada Mercalli) y se almacena los valores en un archivo de texto de extensión (.txt) que contiene la fecha, hora y el valor de la intensidad de la escala modificada de Mercalli.

La siguiente figura muestra cómo se van a presentar los datos del prototipo del módulo de alerta en el registro del Arduino Nano, este archivo almacenará solo la información de cuando se presentan las condiciones para activación del sistema y con esto se facilitará encontrar los datos en el archivo del módulo de almacenamiento del Raspberry Pi 3 B.

Fecha			Hora			IMM	
Día	Mes	Año	Hora	Minutos	Segundos	Intensidad Rango I-X+	

Figura 56: Ejemplo de registro final de datos del Arduino Nano

Fuente: Autores

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 PELIGRO SÍSMICO, RIESGO SÍSMICO Y VULNERABILIDAD SÍSMICA EN LA ZONA DE ESTUDIO

5.1.1 Análisis del sitio de emplazamiento del prototipo.

El emplazamiento del prototipo de sistema de alerta sísmica para la Universidad Católica de Cuenca se escogió acorde a ciertas particularidades que guarda el lugar.

Una de las razones es porque el campus universitario se situará en la parroquia de Ricaurte, a futuros años las Facultades, principalmente la Facultad de Ingeniería Industria y Construcción pasarán a instalarse en el nuevo campus universitario, más a aun desde años atrás viene funcionando el laboratorio de ingeniería como el de suelos, hidráulica y se está adecuando el laboratorio de sísmica.

La Parroquia Ricaurte se encuentra ubicado en la provincia del Azuay, al noroeste de la ciudad de Cuenca.

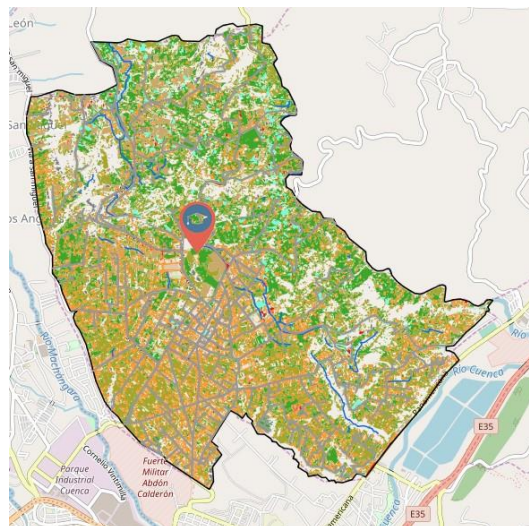


Figura 57: Mapa de Ubicación del sitio de emplazamiento del prototipo en la parroquia Ricaurte.

Fuente: IERSE Universidad del Azuay.

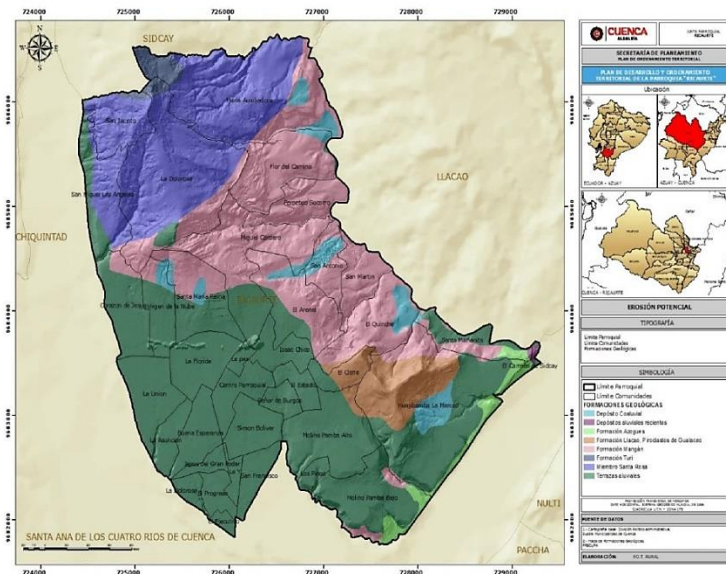


Figura 58: Mapa geológico de la parroquia Ricaurte del cantón Cuenca

Fuente: I. Municipalidad de Cuenca, P.O.T. Rural 2011.

El prototipo que será emplazado en el campus universitario de la parroquia Ricaurte atraviesa las formaciones geológicas de: Terrazas aluviales y formación Mangán.

Formación Mangán (Mm). Compuestas de areniscas, limolitas, lutitas y finogranulares, de un color claro en su parte inferior; en su parte media las lutitas se encuentran con vetas de carbón; en la parte superior la arenisca tobácea es de color gruesa café. Esta formación posee un espesor aproximado de 2.200 m.,

Terrazas Aluviales. Depósitos que se originan mayormente por motivos aluviales. En la zona de la ciudad de Cuenca se cubren extensas áreas planas con cinco niveles diferentes de terrazas, estas se componen por potentes capas de matriz areno-arcillosa. La formación es apta para la construcción y para una buena cimentación.

Expuesta a condiciones geodinámicas que modifican la estructura de la corteza de la Tierra como son la erosión hídrica que se da por las corrientes superficiales en taludes de corte expuesto; terrazas de deposición original en general estables, mientras sus taludes sujetos a erosión y desprendimientos.

Las superficies que conforman cada una de las formaciones con su respectiva litología.

FORMACIÓN	LITOLOGÍA	AREA (Has.)	PORCENTAJE (%)
Depósito Coaluvial	Bloques en matriz limo arcillosa.	50,51	3,70
Depósitos Aluviales recientes	Gravas, arenas limosas	1,41	0,10
Terrazas aluviales	Bloques en matriz de grava areno arcillosa/Estratos erráticos de arena, limo y depósito aluvial	584,90	42,86
Formación Azogues	Areniscas tobáceas, lutitas, limolitas, fauna de moluscos y restos de plantas.	23,13	1,70
Formación Llaico	Flujos piroclásticos, conglomerados y areniscas	65,22	4,78
Formación Mangán	Limolitas, lutitas y areniscas finogranulares	364,81	26,73
Formación Turi	Conglomerados de base, arenas, arcillas, tobas, brechas	17,18	1,26
Miembro Santa Rosa	Conglomerados en matriz ceniza volcánica con lutitas rojas arenosas y limosas.	257,55	18,87
TOTAL		1.364,73	100,00

Figura 59: Formación geológica, según su litología.

Fuente: I. Municipalidad de Cuenca, P.O.T. Rural 2011.

5.2 EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

Sismos en el Ecuador mayores o iguales a 4 (ML) en la escala de Richter.

En la figura 60, se observan los eventos registrados y localizados desde el año 2000, se puede apreciar un crecimiento moderado del número de eventos registrados desde el año 2014. El incremento presentado se da por una mejor zonificación sísmica ya que se implementaron más dispositivos de registro a la red de monitoreo alcanzando un objetivo por parte de la Senascyt-Senplades en uno de sus proyectos. En los últimos cuatro años sobresale el año 2016 con la ocurrencia del sismo del 16 de abril además de un alto número de réplicas (IG-EPN, 2018).

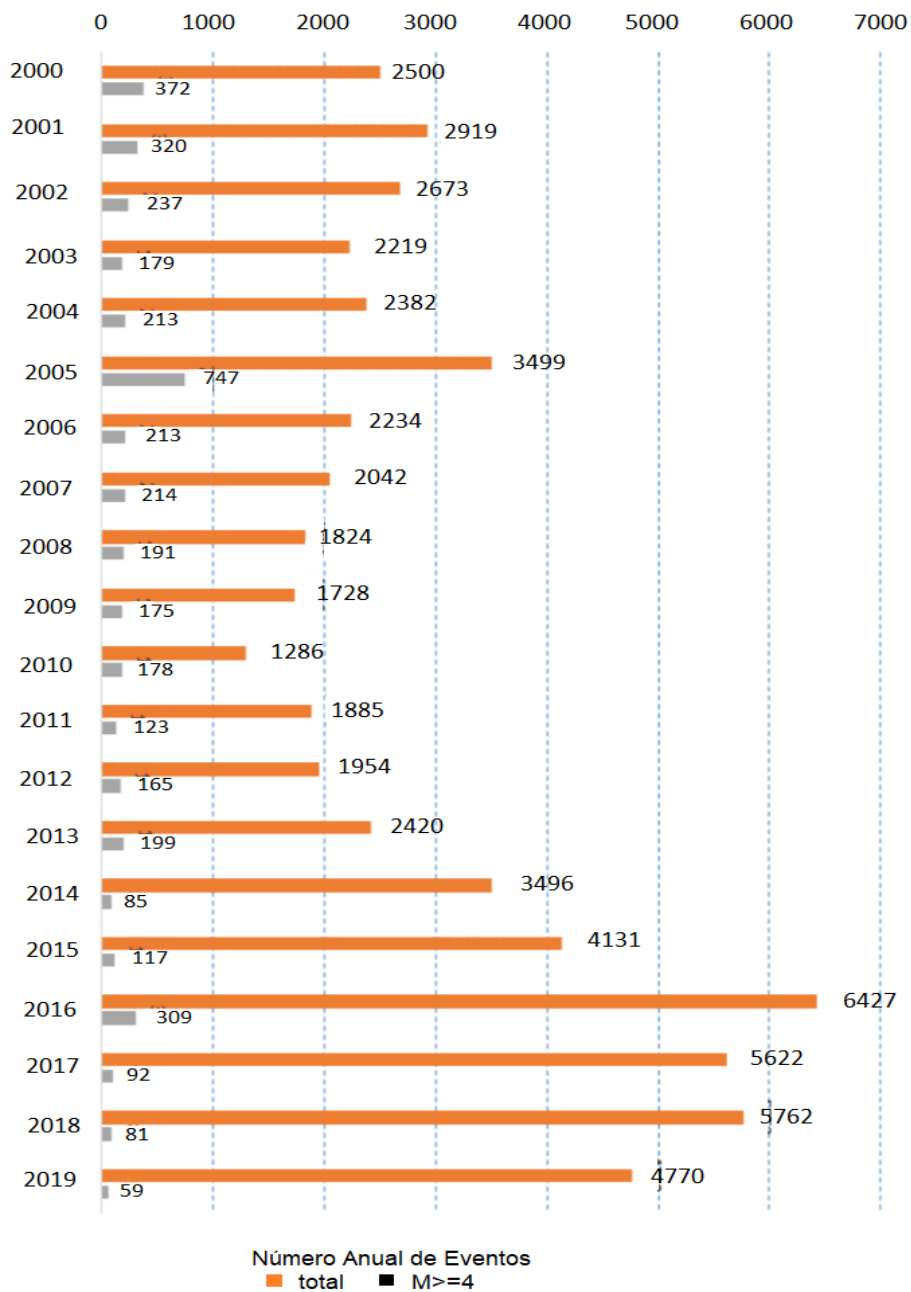


Figura 60: Número de eventos registrados y localizados por la RENSIG: eventos con magnitud igual o superior a 4.

Fuente: IGEPN

Para la evaluación de las probabilidades se presentan a continuación los valores de sismos que se registraron en la provincia del Azuay, con sus diferentes magnitudes y profundidades. Los valores son tomados de la página del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), de la Red Sísmica del Austro (RSA) y de la página de Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS).

ID Evento	Mag	Tipo	Registro Sísmico			Region	Modo	Hora UTC
			Lat	Long	Prof			
IRIS	4.2	M	-2.8340	-78.9850	191.0	Ecuador - Azuay	M	30/7/1974
IRIS	5.1	M	-3.0040	-79.1840	95.5	Ecuador - Azuay	M	26/5/1981
IRIS	4.9	M	-2.8200	-79.1600	33.0	Ecuador - Azuay	M	27/6/1995
IRIS	5.2	M	-2.8250	-78.8390	33.0	Ecuador - Azuay	M	5/11/1995
IRIS	3.7	M	-3.0730	-78.8110	100.0	Ecuador - Azuay	M	12/1/1997
RSA	4.2	mb	-3.1300	-78.9900	100.00	Ecuador - Azuay	M	26/3/1998 11:15
RSA	4.0	Md	-3.4591	-79.6639	62.50	Ecuador - Azuay	M	16/5/1998 3:54
RSA	4.7	mb	-3.4200	-79.0600	15.00	Ecuador - Azuay	M	28/5/1998 22:51
RSA	4.9	mb	-3.3322	-79.4900	53.54	Ecuador - Azuay	M	16/9/1998 6:29
RSA	4.5	Md	-3.4348	-79.9163	68.93	Ecuador - Azuay	M	16/7/1999 14:44
RSA	5.3	Md	-3.4013	-79.1959	64.11	Ecuador - Azuay	M	3/8/1999 10:59
RSA	4.3	Md	-3.5809	-79.2751	103.23	Ecuador - Azuay	M	28/2/2000 8:51
RSA	4.6	mb	-3.2200	-78.8800	70.39	Ecuador - Azuay	M	6/10/2000 19:00
RSA	4.1	Mb	-3.0100	-78.9500	75.00	Ecuador - Azuay	M	21/3/2001 6:05
RSA	4.1	Md	-3.2689	-79.6069	66.49	Ecuador - Azuay	M	11/2/2002 21:08
RSA	5.1	Mb	-3.0965	-79.7876	70.60	Ecuador - Azuay	M	17/3/2002 15:22
RSA	5.1	Md	-3.4537	-78.8361	91.05	Ecuador - Azuay	M	1/9/2003 18:20
RSA	4.1	Md	-3.5541	-79.4519	87.38	Ecuador - Azuay	M	29/10/2005 21:50
RSA	3.9	Md	-3.2017	-78.8981	174.64	Ecuador - Azuay	M	1/11/2005 14:17
RSA	3.8	Md	-3.2028	-78.8888	59.93	Ecuador - Azuay	M	7/11/2005 13:55
RSA	4.1	Md	-3.6030	-79.5422	75.72	Ecuador - Azuay	M	29/11/2005 0:49
RSA	4.0	Md	-3.5346	-79.8855	70.96	Ecuador - Azuay	M	24/1/2006 22:10
RSA	4.1	Md	-3.0144	-79.4202	13.95	Ecuador - Azuay	M	28/1/2006 18:51
RSA	4.1	Md	-3.2854	-79.3121	102.82	Ecuador - Azuay	M	22/4/2006 11:07
RSA	4.3	Md	-3.8240	-78.2441	90.48	Ecuador - Azuay	M	6/10/2006 18:56
RSA	5.1	MwGCMT	-3.2837	-79.1515	81.07	Ecuador - Azuay	M	10/6/2007 19:19
RSA	4.5	mbGS	-3.8939	-79.9617	18.29	Ecuador - Azuay	M	13/7/2007 2:20
RSA	4.2	Md	-3.6547	-79.7885	9.88	Ecuador - Azuay	M	20/9/2007 2:20
RSA	5.9	MwGS	-3.9955	-79.4434	116.21	Ecuador - Azuay	M	25/9/2007 23:42
RSA	4.0	Md	-3.0791	-78.8386	88.35	Ecuador - Azuay	M	27/10/2007 22:32
RSA	4.0	Md	-3.1895	-79.0874	19.81	Ecuador - Azuay	M	4/1/2008 2:28
IRIS	4.2	M	-3.0420	-78.8990	95.7	Ecuador - Azuay	M	21/3/2008
RSA	4.2	mbGS	-3.1070	-79.0980	81.17	Ecuador - Azuay	M	21/3/2008 0:31
RSA	4.0	Md	-3.2074	-78.8934	91.68	Ecuador - Azuay	M	30/5/2008 3:37
IRIS	4.4	M	-3.0260	-79.0540	14.5	Ecuador - Azuay	M	24/9/2008
RSA	4.1	Md	-3.4000	-78.7400	10.00	Ecuador - Azuay	M	15/10/2008 5:16
RSA	4.5	mbGS	-3.8177	-79.6477	100.12	Ecuador - Azuay	M	12/12/2008 15:25
RSA	4.1	Md	-3.2695	-78.5101	69.89	Ecuador - Azuay	M	16/1/2010 22:05
RSA	4.1	Md	-3.2582	-78.3736	30.81	Ecuador - Azuay	M	27/1/2010 18:38
RSA	4.6	mbGS	-3.2000	-78.0900	50.81	Ecuador - Azuay	M	19/3/2010 14:57
RSA	3.8	Md	-3.1778	-78.9630	69.98	Ecuador - Azuay	M	21/9/2010 1:30
RSA	4.0	Md	-3.7636	-79.8690	99.30	Ecuador - Azuay	M	8/10/2010 5:46
RSA	4.1	mbGS	-3.1010	-79.4313	51.51	Ecuador - Azuay	M	12/1/2011 7:20
RSA	4.7	mbGS	-3.9100	-79.6675	92.10	Ecuador - Azuay	M	20/4/2011 17:28
RSA	3.7	Md	-3.2154	-79.4954	81.61	Ecuador - Azuay	M	24/8/2011 12:47
RSA	4.9	mbGS	-3.5283	-79.8703	75.16	Ecuador - Azuay	M	1/9/2011 22:46
RSA	4.6	MB	-3.0080	-79.4260	82.40	Ecuador - Azuay	M	30/8/2012 17:57
RSA	3.9	Md	-3.3266	-79.4724	88.65	Ecuador - Azuay	M	23/9/2012 0:49
RSA	4.5	MB	-3.0294	-78.5473	106.25	Ecuador - Azuay	M	27/2/2013 10:56
RSA	3.8	Md	-3.2469	-78.6067	36.29	Ecuador - Azuay	M	19/3/2013 13:56
RSA	4.0	Md	-3.2000	-78.3400	254.22	Ecuador - Azuay	M	21/5/2013 13:37
IRIS	4.5	M	-2.8639	-79.1096	78.4	Ecuador - Azuay	M	19/12/2015
igeprn2016fzmfh	4.3	M	2.59° S	79.42° W	10	Ecuador - Azuay	M	26/3/2016 2:17
igeprn2016jxnp	4.0	M	2.86° S	79.56° W	11	Ecuador - Azuay	M	20/5/2016 22:49
igeprn2016kejh	5.0	M	2.82° S	79.09° W	69	Ecuador - Azuay	M	24/5/2016 16:35
igeprn2016rtvw	3.0	M	2.90° S	78.81° W	77	Ecuador - Azuay	M	9/9/2016 19:14
igeprn2016yuav	3.7	M	2.75° S	79.21° W	42	Ecuador - Azuay	A	18/12/2016 11:59
igeprn2017bepe	3.6	M	2.95° S	79.23° W	46	Ecuador - Azuay	M	17/1/2017 17:45
igeprn2017gwuu	3.6	M	2.77° S	79.42° W	3	Ecuador - Azuay	M	8/4/2017 20:42
igeprn2017hqpx	3.6	M	2.98° S	79.02° W	21	Ecuador - Azuay	M	19/4/2017 16:57
igeprn2017mspz	3.6	M	2.93° S	78.65° W	10	Ecuador - Azuay	M	30/6/2017 22:57
igeprn2017nmwc	3.8	M	2.69° S	78.57° W	78	Ecuador - Azuay	M	12/7/2017 0:45
igeprn2017pwug	4.2	M	2.87° S	78.94° W	32	Ecuador - Azuay	M	14/8/2017 22:15
igeprn2017ypyu	4.3	M	2.99° S	78.88° W	69	Ecuador - Azuay	M	17/12/2017 6:25
igeprn2018cmgg	3.5	MLv	3.27° S	79.04° W	47	Ecuador - Azuay	M	5/2/2018 3:52
igeprn2018nunr	4.5	M	3.06° S	78.76° W	64	Ecuador - Azuay	M	16/7/2018 5:35
igeprn2018qdon	4.0	MLv	3.11° S	79.09° W	58	Ecuador - Azuay	M	18/8/2018 15:18
igeprn2018rcny	3.5	MLv	2.91° S	78.78° W	70	Ecuador - Azuay	M	1/9/2018 7:25
igeprn2018xzia	3.8	ML	2.90° S	79.52° W	2	Ecuador - Azuay	M	8/12/2018 3:46
igeprn2019ahvz	3.5	MLv	3.29° S	79.60° W	22	Ecuador - Azuay	M	5/1/2019 7:03
igeprn2019cmse	4.6	MLv	2.89° S	78.84° W	84	Ecuador - Azuay	M	5/2/2019 9:53
igeprn2019hrcn	3.6	MLv	3.02° S	79.25° W	77	Ecuador - Azuay	M	19/4/2019 23:20
igeprn2019uapb	3.5	MLv	3.24° S	79.05° W	64	Ecuador - Azuay	M	12/10/2019 22:18

Tabla 14: Eventos sísmicos registrados y localizados por la IGEPN, RSA, IRIS.

Fuente: Autores

ID Evento	Mag	Prof	Region	Hora UTC
IRIS	4.2	191.0	Ecuador - Azuay	30/7/1974
IRIS	5.1	95.5	Ecuador - Azuay	26/5/1981
IRIS	4.9	33.0	Ecuador - Azuay	27/6/1995
IRIS	5.2	33.0	Ecuador - Azuay	5/11/1995
RSA	4.2	100.00	Ecuador - Azuay	26/3/1998 11:15
RSA	4.0	62.50	Ecuador - Azuay	16/5/1998 3:54
RSA	4.7	15.00	Ecuador - Azuay	28/5/1998 22:51
RSA	4.9	53.54	Ecuador - Azuay	16/9/1998 6:29
RSA	4.5	68.93	Ecuador - Azuay	16/7/1999 14:44
RSA	5.3	64.11	Ecuador - Azuay	3/8/1999 10:59
RSA	4.3	103.23	Ecuador - Azuay	28/2/2000 8:51
RSA	4.6	70.39	Ecuador - Azuay	6/10/2000 19:00
RSA	4.1	75.00	Ecuador - Azuay	21/3/2001 6:05
RSA	4.1	66.49	Ecuador - Azuay	11/2/2002 21:08
RSA	5.1	70.60	Ecuador - Azuay	17/3/2002 15:22
RSA	5.1	91.05	Ecuador - Azuay	1/9/2003 18:20
RSA	4.1	87.38	Ecuador - Azuay	29/10/2005 21:50
RSA	4.1	75.72	Ecuador - Azuay	29/11/2005 0:49
RSA	4.0	70.96	Ecuador - Azuay	24/1/2006 22:10
RSA	4.1	13.95	Ecuador - Azuay	28/1/2006 18:51
RSA	4.1	102.82	Ecuador - Azuay	22/4/2006 11:07
RSA	4.3	90.48	Ecuador - Azuay	6/10/2006 18:56
RSA	5.1	81.07	Ecuador - Azuay	10/6/2007 19:19
RSA	4.5	18.29	Ecuador - Azuay	13/7/2007 2:20
RSA	4.2	9.88	Ecuador - Azuay	20/9/2007 2:20
RSA	5.9	116.21	Ecuador - Azuay	25/9/2007 23:42
RSA	4.0	88.35	Ecuador - Azuay	27/10/2007 22:32
RSA	4.0	19.81	Ecuador - Azuay	4/1/2008 2:28
IRIS	4.2	95.7	Ecuador - Azuay	21/3/2008
RSA	4.2	81.17	Ecuador - Azuay	21/3/2008 0:31
RSA	4.0	91.68	Ecuador - Azuay	30/5/2008 3:37
IRIS	4.4	14.5	Ecuador - Azuay	24/9/2008
RSA	4.1	10.00	Ecuador - Azuay	15/10/2008 5:16
RSA	4.5	100.12	Ecuador - Azuay	12/12/2008 15:25
RSA	4.1	69.89	Ecuador - Azuay	16/1/2010 22:05
RSA	4.1	30.81	Ecuador - Azuay	27/1/2010 18:38
RSA	4.6	50.81	Ecuador - Azuay	19/3/2010 14:57
RSA	4.0	99.30	Ecuador - Azuay	8/10/2010 5:46
RSA	4.1	51.51	Ecuador - Azuay	12/1/2011 7:20
RSA	4.7	92.10	Ecuador - Azuay	20/4/2011 17:28
RSA	4.9	75.16	Ecuador - Azuay	1/9/2011 22:46
RSA	4.6	82.40	Ecuador - Azuay	30/8/2012 17:57
RSA	4.5	106.25	Ecuador - Azuay	27/2/2013 10:56
RSA	4.0	254.22	Ecuador - Azuay	21/5/2013 13:37
IRIS	4.5	78.4	Ecuador - Azuay	19/12/2015
igeqn2016fzmf	4.3	10	Ecuador - Azuay	26/3/2016 2:17
igeqn2016jxnp	4.0	11	Ecuador - Azuay	20/5/2016 22:49
igeqn2016kejh	5.0	69	Ecuador - Azuay	24/5/2016 16:35
igeqn2017pwug	4.2	32	Ecuador - Azuay	14/8/2017 22:15
igeqn2017ypyu	4.3	69	Ecuador - Azuay	17/12/2017 6:25
igeqn2018nunr	4.5	64	Ecuador - Azuay	16/7/2018 5:35
igeqn2018qdon	4.0	58	Ecuador - Azuay	18/8/2018 15:18
igeqn2019cmse	4.6	84	Ecuador - Azuay	5/2/2019 9:53

Tabla 15: Sismos en el Azuay de magnitud mayor o igual a 4 en la escala de Richter.

Fuente: Autores

ID Evento	Mag	Prof	Region	Hora UTC
RSA	4.7	15.00	Ecuador - Azuay	28/5/1998 22:51
RSA	4.1	13.95	Ecuador - Azuay	28/1/2006 18:51
RSA	4.5	18.29	Ecuador - Azuay	13/7/2007 2:20
RSA	4.2	9.88	Ecuador - Azuay	20/9/2007 2:20
RSA	4.0	19.81	Ecuador - Azuay	4/1/2008 2:28
IRIS	4.4	14.5	Ecuador - Azuay	24/9/2008
RSA	4.1	10.00	Ecuador - Azuay	15/10/2008 5:16
igepn2016fzmfh	4.3	10	Ecuador - Azuay	26/3/2016 2:17
igepn2016jxnp	4.0	11	Ecuador - Azuay	20/5/2016 22:49
igepn2017gwuu	3.6	3	Ecuador - Azuay	8/4/2017 20:42
igepn2017mspz	3.6	10	Ecuador - Azuay	30/6/2017 22:57
igepn2018xzia	3.8	2	Ecuador - Azuay	8/12/2018 3:46

Tabla 16: Sismos en el Azuay de profundidades menores o igual a 20 km.
Fuente: Autores

Cálculo de las probabilidades de ocurrencia.

Se sabe que la magnitud es mayor o igual a 4 (ML) en la escala de Richter. ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de que la profundidad sea menor o igual a los 20 km? ¿Determine el período de retorno?

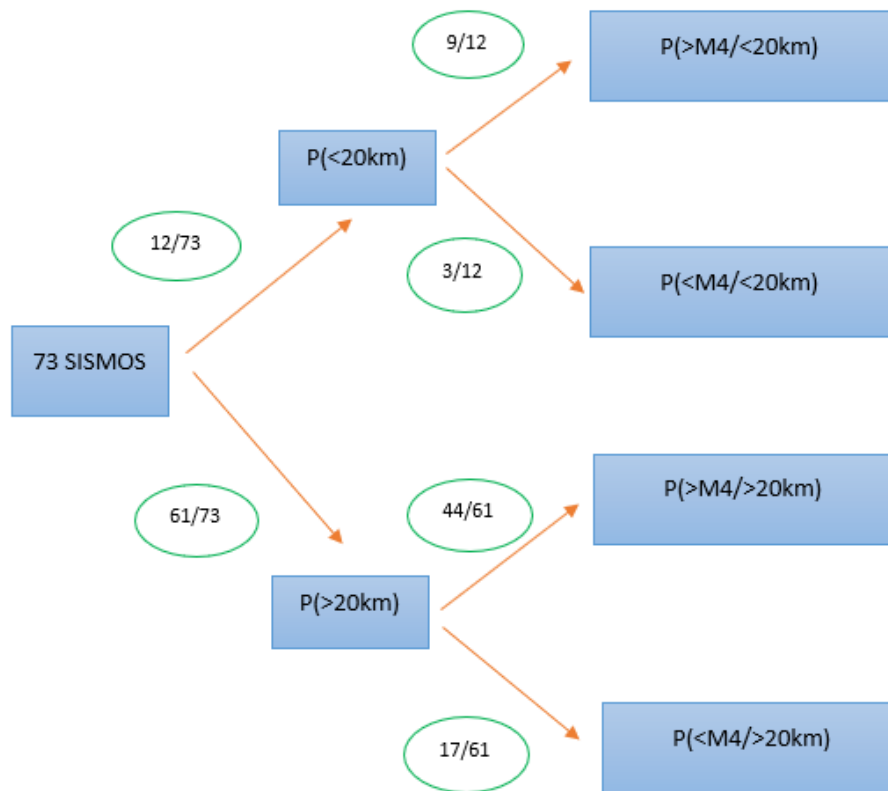


Figura 61: Representación gráfica del diagrama del árbol, para obtener la probabilidad de ocurrencia

Fuente: Autores

$$P(> M4) = \left(\frac{12}{73} * \frac{9}{12}\right) + \left(\frac{61}{73} * \frac{44}{61}\right)$$

$$P(> M4) = \left(\frac{53}{73}\right)$$

$$P(< M4) = 1 - \left(\frac{53}{73}\right)$$

$$P(< M4) = \left(\frac{20}{73}\right)$$

$$P(< 20km | > M4) = \left(\frac{P(< 20km \cap > M4)}{P(> M4)}\right)$$

$$P(< 20km | > M4) = \left(\frac{\left(\frac{12}{73}\right) * \left(\frac{9}{12}\right)}{\left(\frac{53}{73}\right)}\right)$$

$$P(< 20\text{km} | > M4) = \left(\frac{9}{53}\right)$$

$$Tr = \left(\frac{1}{\frac{9}{53}}\right) = 6 \text{ años}$$

Se sabe que la profundidad es menor a los 20 km. ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de que la magnitud sea mayor o igual a 4 (ML) en la escala de Richter? ¿Determine el período de retorno?

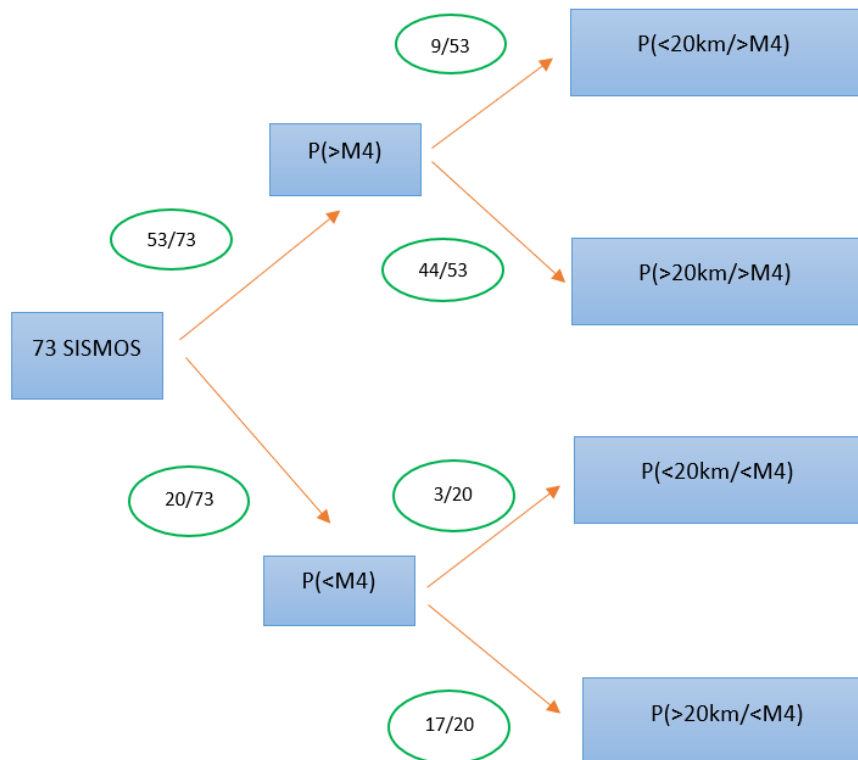


Figura 62: Representación gráfica del diagrama del árbol, para obtener la probabilidad de ocurrencia.

Fuente: Autores

$$P(< 20\text{km}) = \left(\frac{53}{73} * \frac{9}{53}\right) + \left(\frac{20}{73} * \frac{3}{20}\right)$$

$$P(< 20\text{km}) = \left(\frac{12}{73}\right)$$

$$P(> 20\text{km}) = 1 - \left(\frac{6}{29}\right)$$

$$P(> 20\text{km}) = \left(\frac{61}{73}\right)$$

$$P(> M4 | < 20\text{km}) = \left(\frac{P(> M4 \cap < 20\text{km})}{P(< 20\text{km})}\right)$$

$$P(> M4 | < 20\text{km}) = \left(\frac{\left(\frac{53}{73}\right) * \left(\frac{9}{53}\right)}{\left(\frac{12}{73}\right)}\right)$$

$$P(> M4 | < 20\text{km}) = \left(\frac{3}{4}\right)$$

$$Tr = \left(\frac{1}{\frac{3}{4}}\right) = 1 \text{ año } 6 \text{ meses}$$

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Resultados del peligro sísmico de la zona de estudio

Para el cálculo de las probabilidades de ocurrencia se utilizó el diagrama del árbol el cual es un método gráfico que ayuda a relacionar con los diferentes parámetros de los sismos, en esta caso se relacionó las magnitudes que sean iguales o superiores a 4 (ML) en la escala de Richter y profundidades de los eventos sísmicos que sean menores a los 20 km, se tomó estas rangos debido que (Guerrieri y Vittori., 2007) describió que los sismos con estas magnitudes y profundidades “están relacionados con pequeños deslizamientos, caída de rocas en áreas inestables y grietas de anchura milimétrica” y a su vez genera caos en las personas.

De acuerdo a las relaciones de los parámetros sísmicos de cuál es la probabilidad de que se produzca un sismo de profundidad menor a 20 kilómetros, sabiendo que su magnitud será de igual o superior a 4 (ML) en la escala de Richter; se determinó un período de retorno de 6 años, es decir, que cada 6 años se puede presentar un sismo de magnitud igual o superior a 4 (ML) y profundidad menor a 20 kilómetros.

También se hizo la relación de cuál es la probabilidad de que se presente un evento sísmico de magnitud igual o superior a 4 (ML) en la escala de Richter, sabiendo que la profundidad será menor a 20 kilómetros; se determinó un resultado con un período de retorno de 1 año 6 meses, es decir, que cada 1 año 6 meses se puede presentar un sismo de magnitud igual o superior a 4 (ML) en la escala de Richter y profundidad menor a 20 kilómetros.

El peligro sísmico que atraviesa la ciudad de Cuenca, se puede calcular, analizar y visualizar con respecto a los siguientes mapas, como los que se presentan a continuación. Zonificación sísmica de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) y Peligro Sísmico de la Red Sísmica del Austro (RSA), Intensidades máximas, Espectros de respuesta.

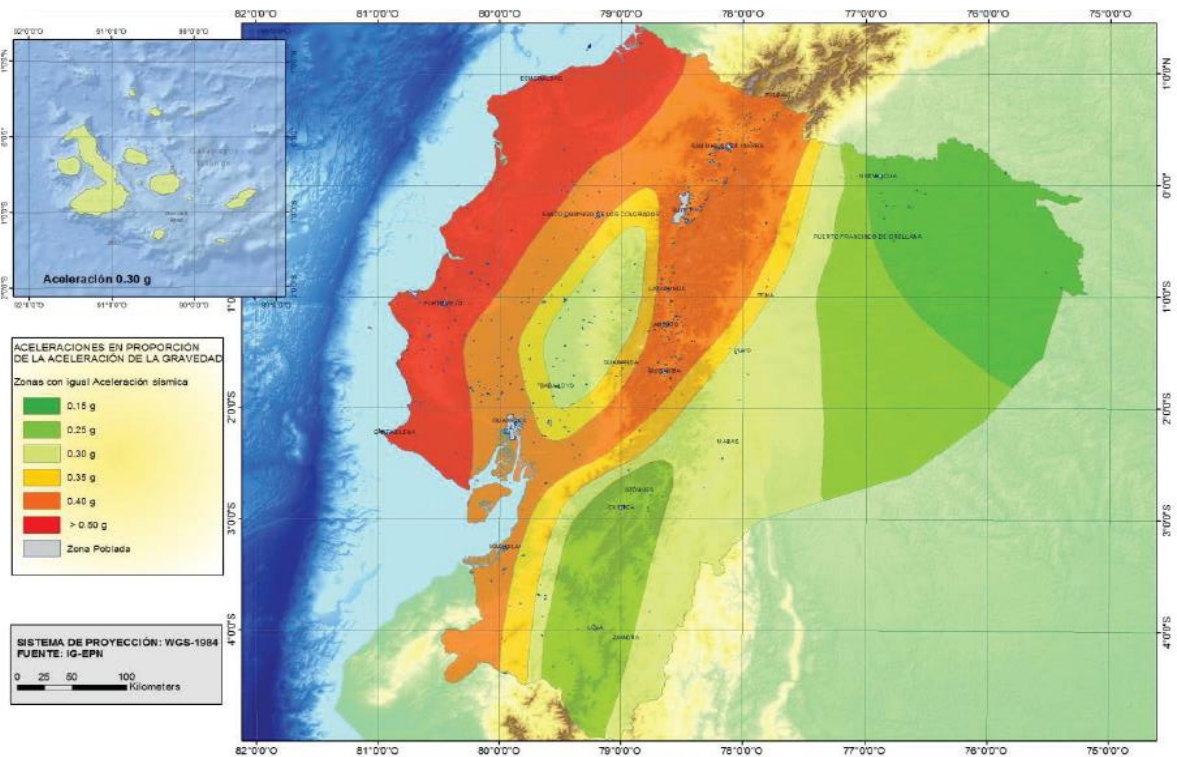


Figura 63: Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z

Fuente: NEC-SE-DS.

El anterior mapa representa la zonificación sísmica para el diseño de estructuras sismorresistentes. Este se origina a partir del resultado de varios estudios de peligro sísmico donde se presente una excedencia del 10% en 50 años con

período de retorno aproximadamente de 475 años, que incluye una saturación mayor a 0.50 g de registros de aceleración sísmica en suelo tipo roca en la zona VI de la región costa del Ecuador.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Tabla 17: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada
Fuente: NEC-SE-DS.

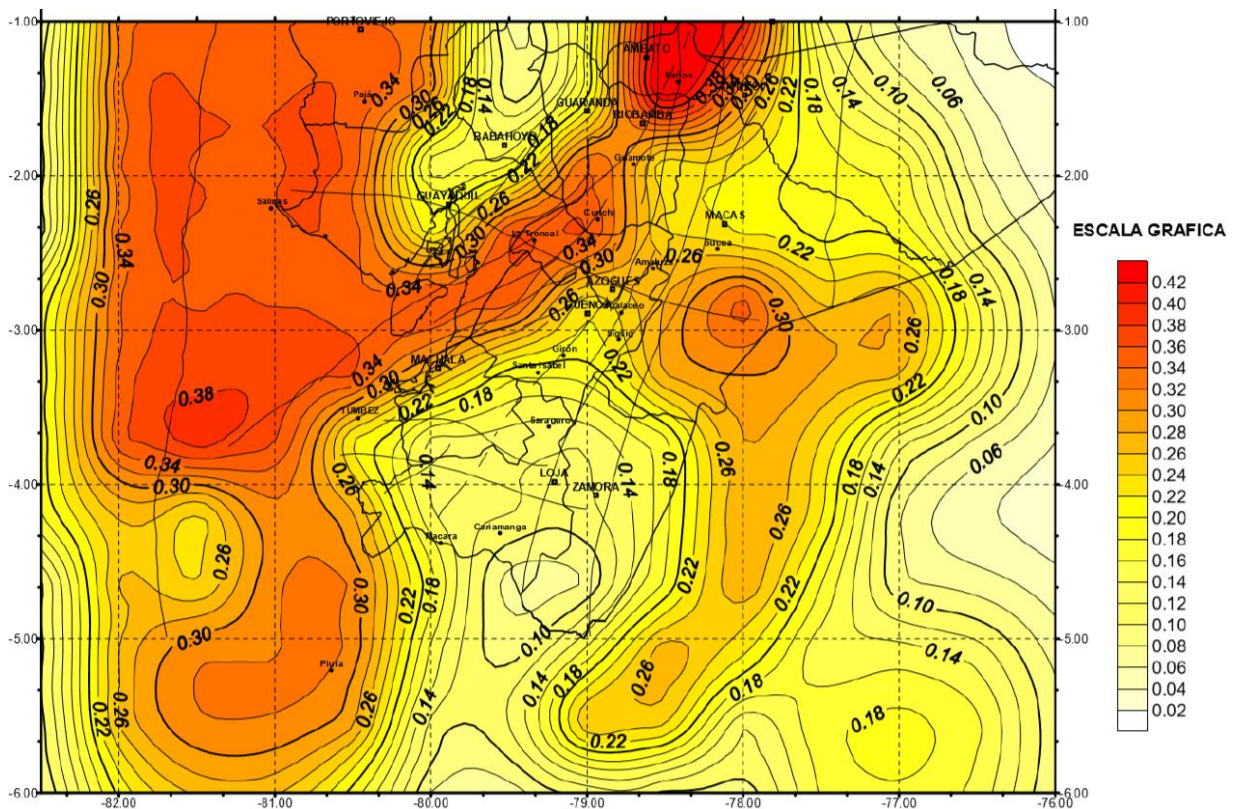


Figura 64: Peligro Sísmico del Austro del Ecuador. (Mapa de aceleraciones máximas para un periodo de retorno de 475 años)

Fuente: Estudio de Peligro Sísmico - RSA - Universidad de Cuenca

Conocer las intensidades máximas para nuestro lugar de estudio es importante porque se evalúa los efectos que ocasionan los sismos en la superficie del suelo que es donde se causan mayores daños a las construcciones y personas. Lo que permite poner énfasis en las construcciones existentes y futuras.

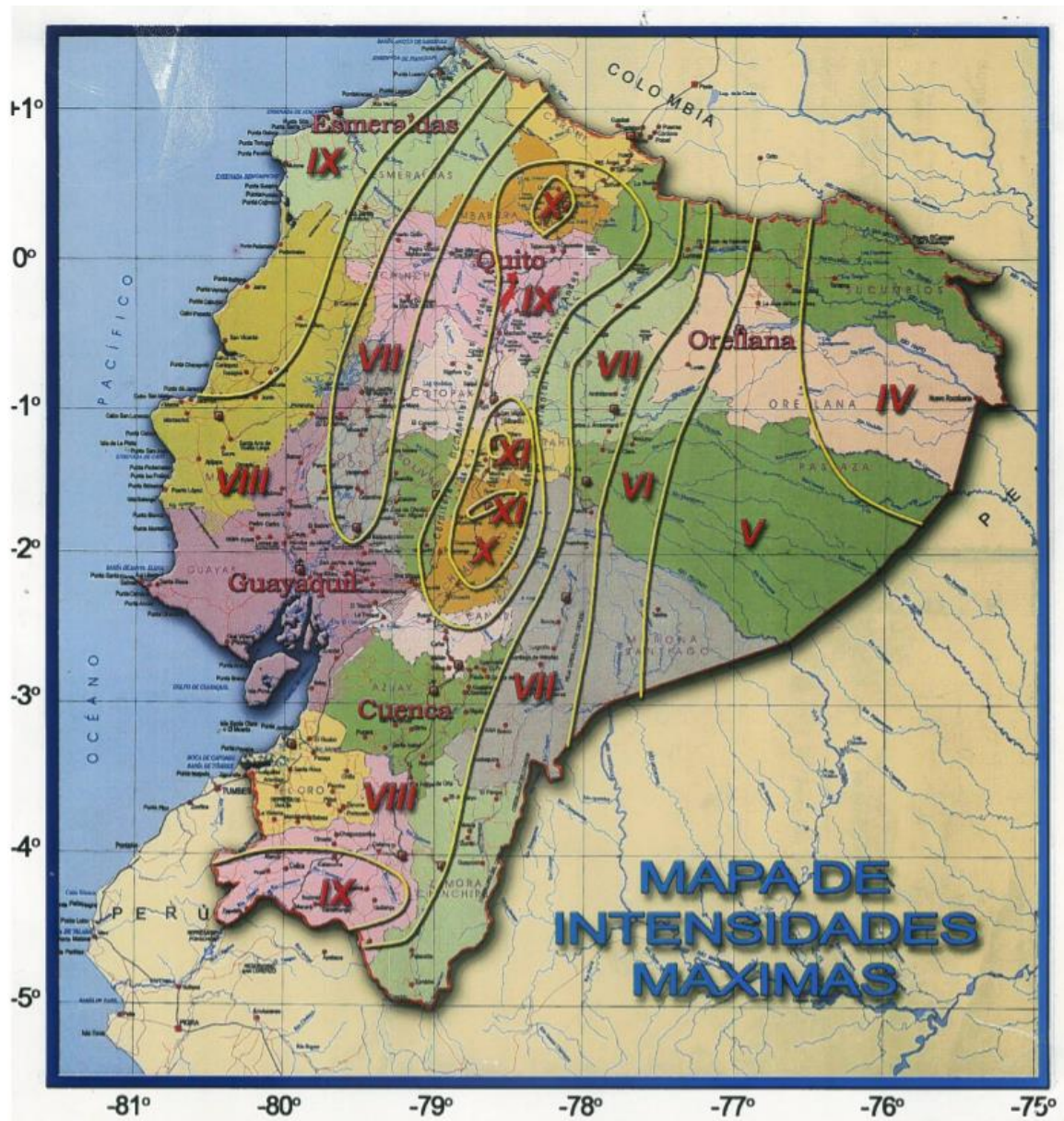


Figura 65: Mapa de Intensidades máximas

Fuente: Egred, 1991

Conocer las fallas geológicas que se encuentran cercanas a la zona de estudio es importante ya que es allí donde los sismos liberan su energía, es aquí donde se producen el agrietamiento y posibles fallos de las estructuras.

Prototipo UCACUE								
Sensor MPU 6050 - Step Time 0.01								
H	M	S	E	Ace(g)	E	Ace(g)	E	Ace(g)
12	14	22,640881	X	0.02066317	Y	-0.00497159	Z	0.94795366
12	14	22,650022	X	0.02046342	Y	-0.003307	Z	0.94748757
12	14	22,658853	X	0.02019709	Y	-0.00670277	Z	0.94593395
12	14	22,667673	X	0.01762251	Y	-0.00654741	Z	0.94340376
12	14	22,676778	X	0.018932	Y	-0.00563743	Z	0.94828658
12	14	22,685653	X	0.01762251	Y	-0.00388406	Z	0.94588956
12	14	22,694727	X	0.01655717	Y	-0.00514915	Z	0.94790927
12	14	22,703742	X	0.02001953	Y	-0.00335138	Z	0.94753196
12	14	22,712586	X	0.01593572	Y	-0.00683594	Z	0.95126065
12	14	22,721342	X	0.01873224	Y	-0.00590376	Z	0.94320401
12	14	22,730078	X	0.02108487	Y	-0.00490501	Z	0.94857511
12	14	22,738861	X	0.01660156	Y	-0.00295188	Z	0.9494407
12	14	22,747623	X	0.02033026	Y	-0.00599254	Z	0.94679954
12	14	22,756444	X	0.01924272	Y	-0.00661399	Z	0.94549006
12	14	22,765229	X	0.01693448	Y	-0.00490501	Z	0.94580078
12	14	22,774042	X	0.01737837	Y	-0.00801225	Z	0.94435813
12	14	22,782888	X	0.01600231	Y	-0.00474964	Z	0.944913
12	14	22,791631	X	0.01411577	Y	-0.00170898	Z	0.94497958
12	14	22,800535	X	0.01970881	Y	-0.0069913	Z	0.94877486
12	14	22,809307	X	0.0164462	Y	-0.00403942	Z	0.94484641
12	14	22,818111	X	0.01864347	Y	-0.00723544	Z	0.94564542
12	14	22,826928	X	0.0184881	Y	-0.00523793	Z	0.9477761
12	14	22,835719	X	0.01780007	Y	-0.00523793	Z	0.94480202
12	14	22,844526	X	0.01935369	Y	-0.00734641	Z	0.94844194
12	14	22,853315	X	0.01680131	Y	-0.00388406	Z	0.94746538
12	14	22,862135	X	0.01908736	Y	-0.00597035	Z	0.94322621
12	14	22,870897	X	0.02037464	Y	-0.00443892	Z	0.94786488
12	14	22,879672	X	0.01722301	Y	-0.00417259	Z	0.94997337
12	14	22,888518	X	0.01873224	Y	-0.00079901	Z	0.95134943
12	14	22,897270	X	0.02070756	Y	-0.00186435	Z	0.94420277

Tabla 18: Datos de registro del prototipo

Fuente: Autores

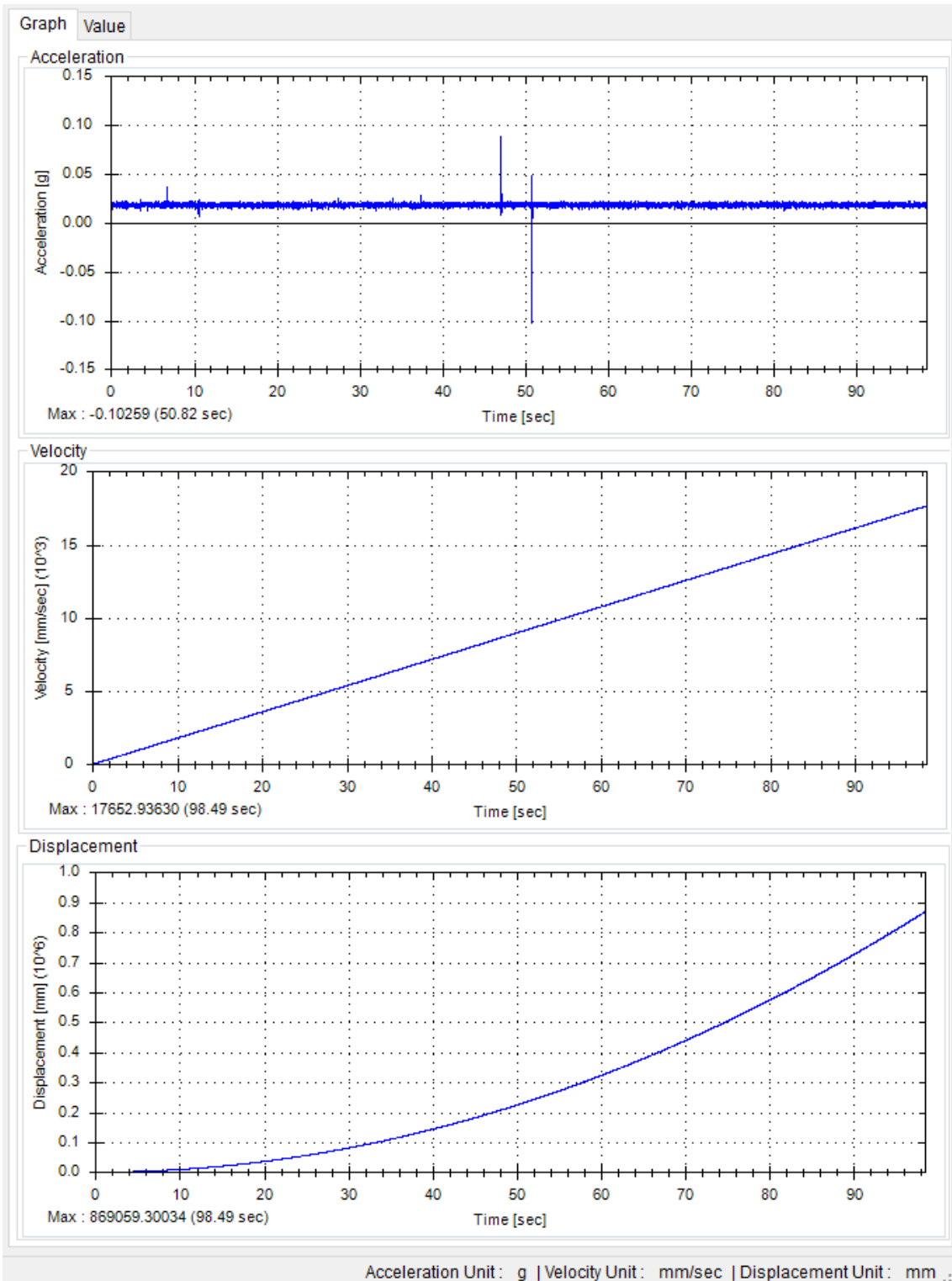


Figura 67: Datos de registro del prototipo del Eje X sin corrección

Fuente: Autores

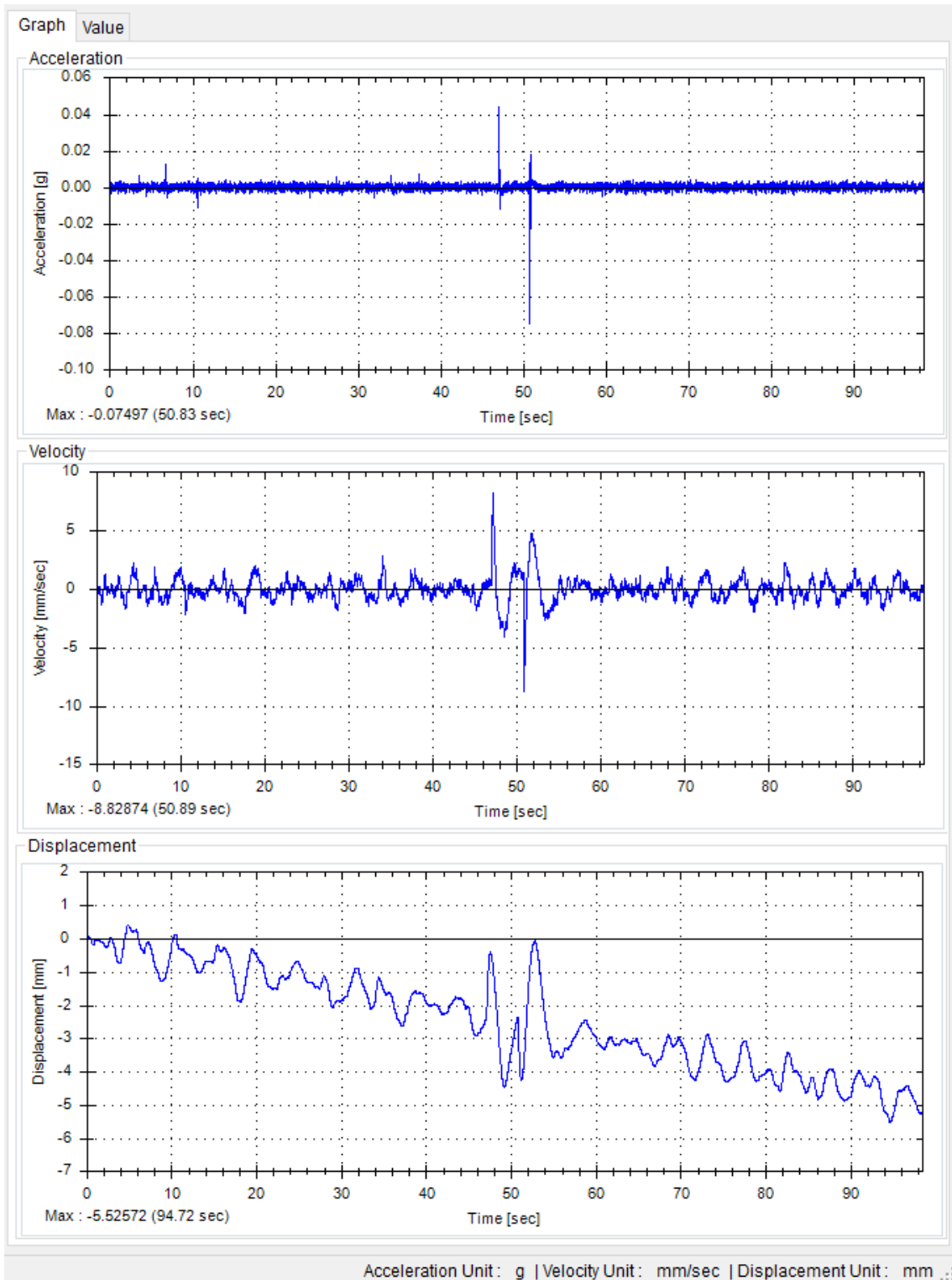


Figura 68: Datos de registro del prototipo del Eje X con corrección

Fuente: Autores

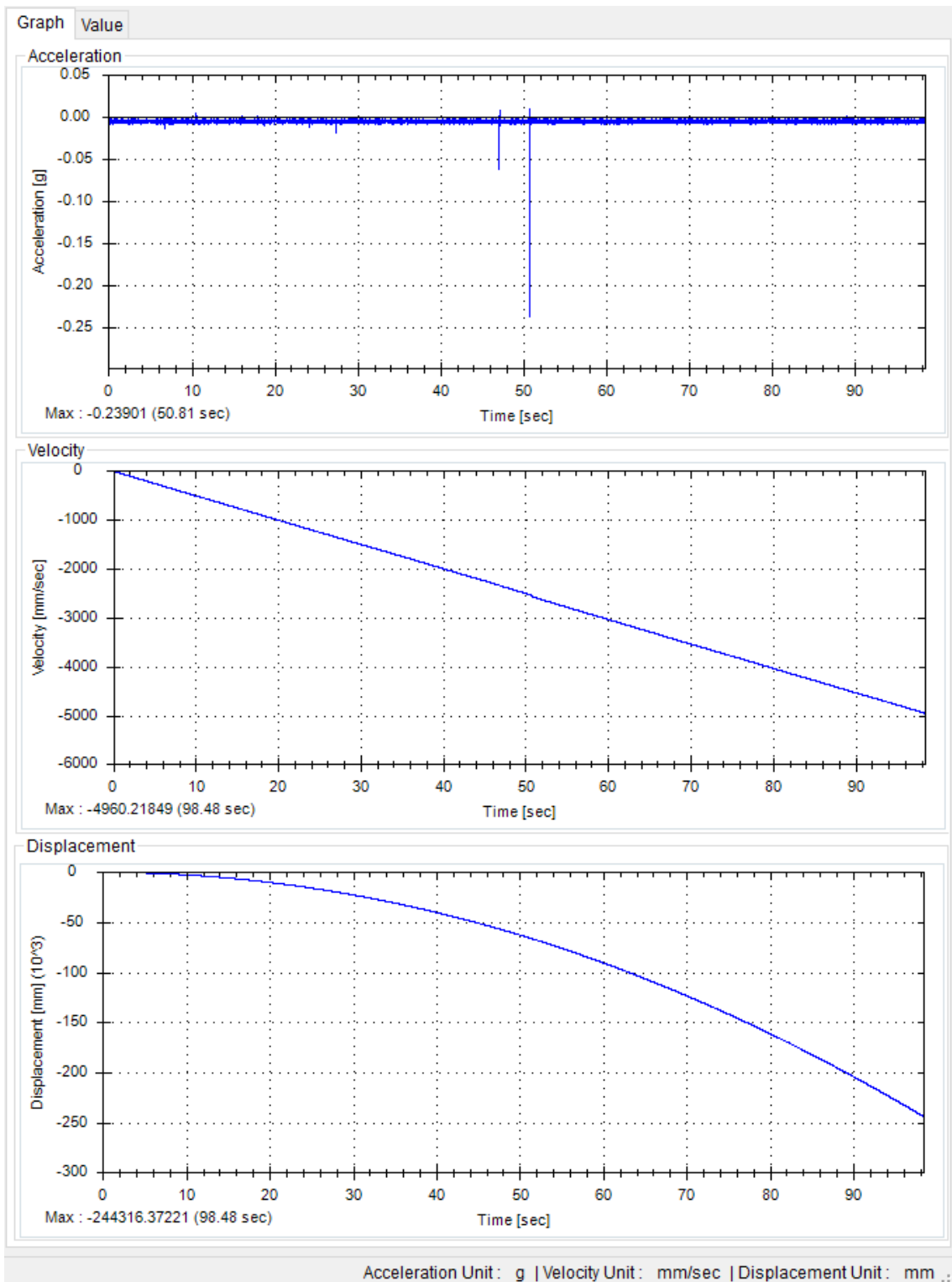


Figura 69: Datos de registro del prototipo del Eje Y sin corrección

Fuente: Autores

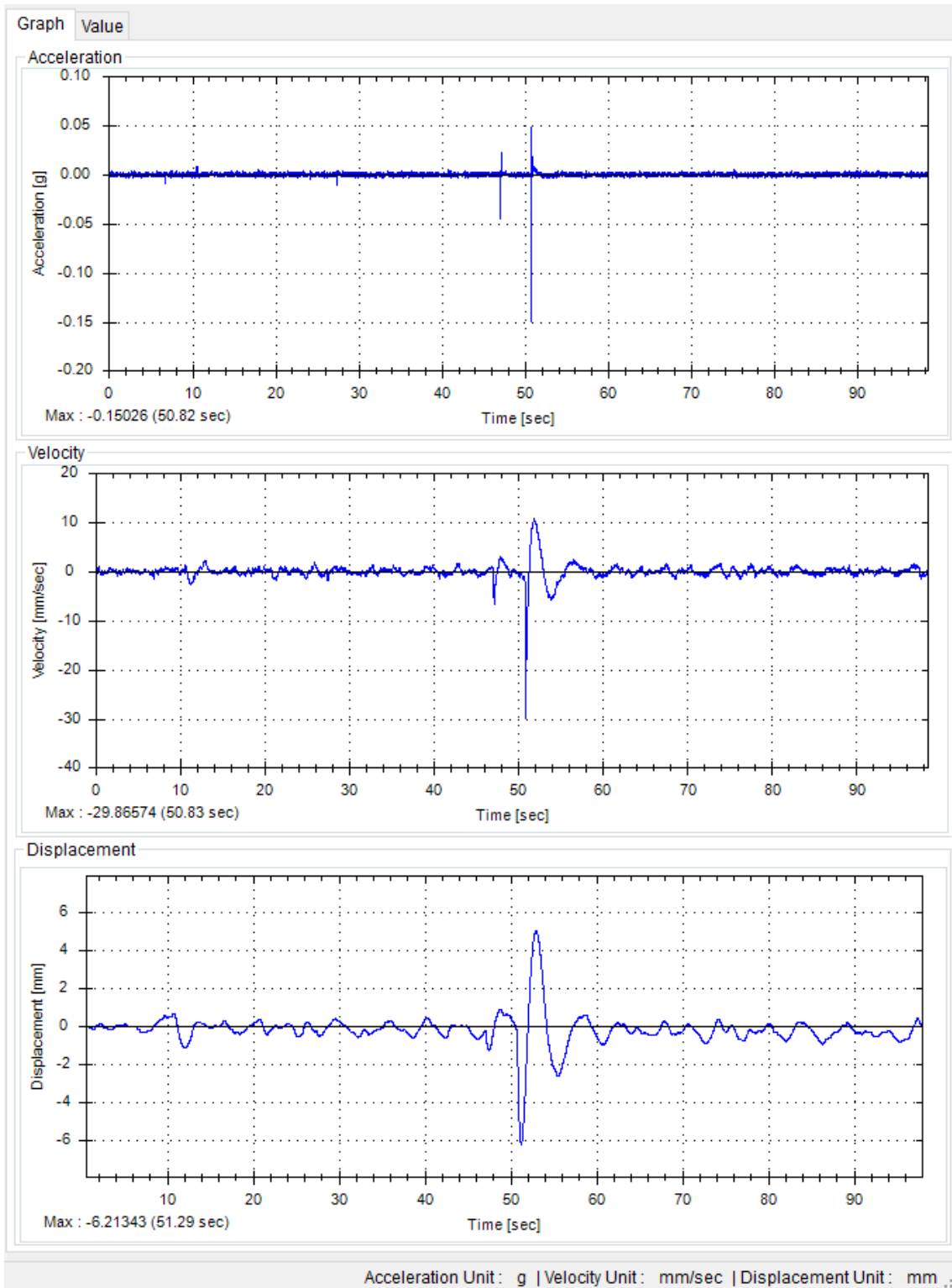


Figura 70: Datos de registro del prototipo del Eje Y con corrección

Fuente: Autores

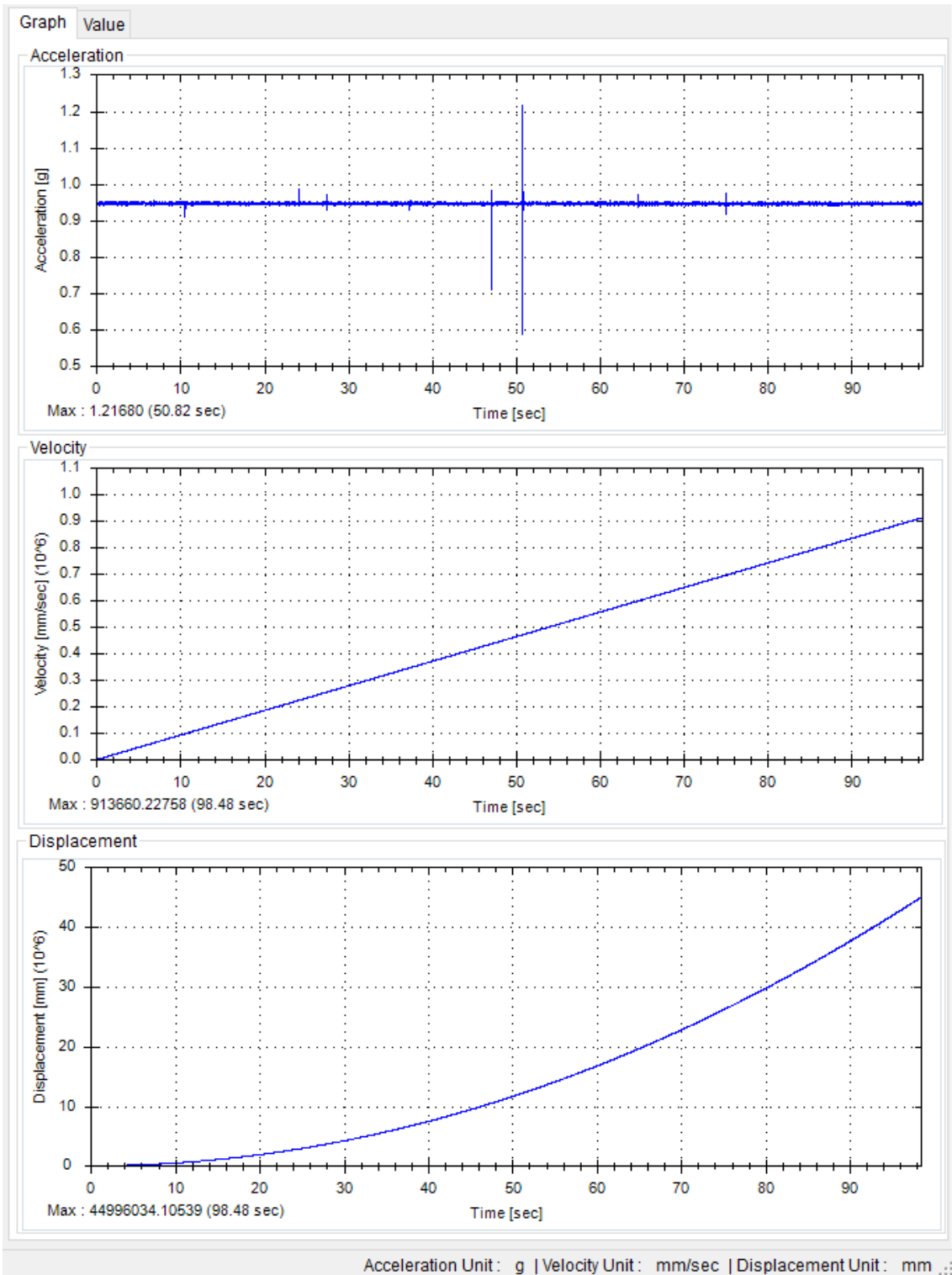


Figura 71: Datos de registro del prototipo del Eje Z sin corrección

Fuente: Autores

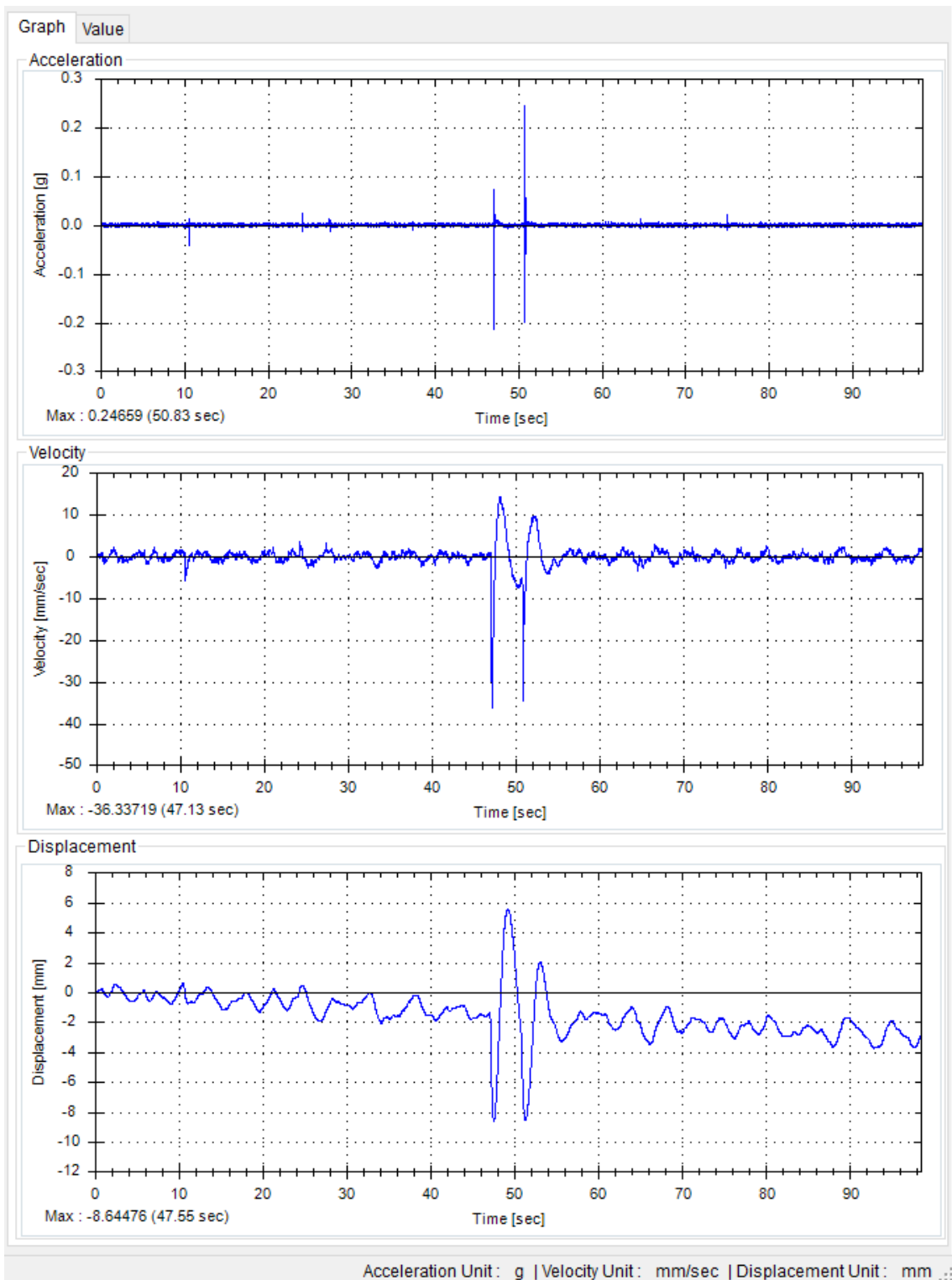


Figura 72: Datos de registro del prototipo del Eje Z con corrección

Fuente: Autores

CONCLUSIONES

- El prototipo final (tercero) consta de 2 módulos, el primero es el registro de datos que está controlado por un Raspberry Pi 3 B y conectado con el sensor acelerométrico MPU 6050, este realiza el almacenamiento de 100 datos por segundo de las 3 direcciones X, Y, Z y las guarda en un archivo de formato texto para el respectivo tratamiento de la señal, el segundo módulo de alerta estará controlado por el Arduino Nano y un sensor acelerométrico MPU 9250, este genera la alerta cuando se adquieran aceleraciones iguales o mayores a 0.092g (IMM-VI), estos valores producen agrietamientos ligeros tanto en el suelo como en estructuras. Se generan 2 tipos de alerta la primera una alerta visual en el display y la segunda una alerta sonora que produce un sonido en el buzzer (zumbido) del prototipo, al mismo tiempo se almacena la hora en que se sobrepasó el límite para acceder de manera más sencilla al registro de datos.
- Las dimensiones del prototipo son de 20cm x 20cm x 8.5cm. su peso es de 1.25 Kg aproximadamente, por su tamaño y peso permite una transportación e instalación de manera más sencilla. La conexión y recolección de datos son de fácil acceso. Los 2 módulos cuentan con una batería propia, en caso de existir alguna falla en el sistema de alimentación eléctrica, puede funcionar por varias horas.
- El prototipo final tiene un costo aproximado de \$130⁰⁰ dólares, este costo varía según la disponibilidad de los componentes siguiendo una tendencia a la baja. En el mercado internacional se pueden adquirir productos tales como el “Raspberry Shake” en sus diferentes presentaciones, en valores aproximadamente que van desde los \$337.50 hasta los \$1204.99 dólares. En México se pueden adquirir dispositivos para sistemas de alerta sísmica desde los \$300.00, \$900.00 hasta los \$1500.00 dólares aproximadamente.

- Se trabajó con varios acelerómetros en las diferentes fases del prototipo siendo los más aptos para nuestras necesidades el MPU 6050 y el MPU 9250 cada uno calibrado en un rango de $\pm 2g$, y con una resolución de 16 bits. Se optó por esos sensores debido a su precisión y dimensiones. Después de realizar el procesamiento de datos en el software libre PRISM aplicando la línea de corrección de base y el filtro Butterworth, se obtuvieron valores promedio de ruido ambiental de los acelerómetros en cada uno de los ejes siendo los valores los siguientes, del eje X de 0.004g, en el eje Y de 0.003g, y finalmente en el eje Z de 0.005g, se considera adecuado para dar la alarma a 0.092g.
- Se analizó la zona de Ricaurte porque fue determinado que el prototipo será colocado en el laboratorio de sismica que está próximo a ser implementado dentro de la Universidad Católica de Cuenca. Se realizó además 2 análisis estadísticos, de la primera probabilidad de que se produzca un sismo de magnitud 4 (ML) o superior en la escala de Richter con una profundidad igual o menor a 20 km dando como resultado un periodo de retorno de 6 años. El segundo análisis de probabilidad que se produzca un sismo a una profundidad menor a 20 km con una magnitud igual o mayor 4 (ML) en la escala de Richter, dando como resultado un periodo de retorno de 1 año 6 meses. Estos análisis se realizaron con registros del IGEPN, IRIS y RSA.
- El proyecto se encuentra en una tercera fase de revisión del prototipo por lo que está sujeto a mejoras que faciliten su uso. Dentro de las fases de prueba no se pudo percibir ningún sismo que afecte de manera directa al prototipo por lo que los ensayos del procesamiento de señales fueron movimientos antrópicos provocados cerca del mismo, esto se hizo con el objetivo de determinar si se activa el sistema de alerta y probar el procesamiento de la señal dentro del software.

RECOMENDACIONES

- El prototipo de sistema de alerta sísmica es un proyecto investigativo con fines de mejorar el control sísmico en nuestra ciudad, provincia y país, para mejorar el prototipo, será necesario contar con la ayuda de un equipo multidisciplinario que intervenga en las fases de implementación y manejo, esto con el objetivo de acceder de manera más sencilla a la información.
- En el caso de los acelerómetros se recomienda buscar el más adecuado, en el cual se registren aceleraciones mínimas y su resolución sea más alta. Para la adquisición de estos acelerómetros se debe considerar que fuera del país existen empresas que comercializan estos productos, pero su costo puede variar de acuerdo a su capacidad. Posteriormente se deben realizar ensayos para determinar su desempeño dentro del prototipo.
- Se recomienda ampliar el trabajo interinstitucional para establecer zonas sísmicas, para la adecuada gestión integral de riesgos, esto con el propósito de elaborar estrategias de prevención y mapas de vulnerabilidad.
- Se debe tener en cuenta la evaluación de los niveles de amenaza sísmica en sitios que presenten condiciones idóneas como es el caso de suelos inestables y fallas geológicas, donde se puedan provocar deslizamientos, efectos de licuefacción y amplificación de las ondas sísmicas que se pueden producir en suelos blandos, esto con el fin de desarrollar registros sísmicos adecuados, lo que ayudará en una microzonificación actualizada.

- Se debe considerar implementar una red sísmica para la Universidad Católica de Cuenca que sirva para futuros proyectos investigativos, por lo que se propone generar varios prototipos conectados a un centro de monitoreo, obteniendo una red de registro y almacenamiento de datos. La red puede más campos de aplicación y desarrollo como es el caso de la salud estructural y la microzonificación.
- Generar estudios de salud estructural con varios prototipos, en las zonas más propensas a amenazas sísmicas en el país, con el propósito de realizar análisis de las edificaciones y determinar si estas son seguras y confiables, además se puede dar un diagnóstico mediante el monitoreo con la ayuda de sensores de vibración ambiental y la modelación de la estructura en software especializado, con esto se detecta si tiene un comportamiento adecuado o se deberá dar paso a una intervención proponiendo soluciones.

Bibliografía

- Agudelo Zapata, J. A. (2016). *¿Qué relación existe entre la aceleración de cálculo del sismo y la escala sísmológica de Richter y la de Mercalli?* Granada: CGI.
- Aguiar, R., & Mieles, Y. (2016). *ANÁLISIS DE LOS EDIFICIOS QUE COLAPSARON EN PORTOVIEJO DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DE 2016*. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras.
- alliedelec. (01 de 11 de 2018). *alliedelec*. Obtenido de alliedelec: <https://www.alliedelec.com/m/d/4252b1ecd92888dbb9d8a39b536e7bf2.pdf>
- AnalogDevices. (2009). *ADXL335*. Obtenido de analog: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>
- Aurel A, B., Mihail D, I., & A. García, Y. (1975). *Elementos de ingeniería sísmica*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Cajamarca, D. (Octubre de 2018). *ResearchGate*. Obtenido de Octubre: https://www.researchgate.net/publication/333699652_CONSECUENCIAS_DEL_TERREMOTO_DE_ECUADOR_16042016_E_INFLUENCIA_DE_LA_CORDILLERA_DE_CARNEGIE_EN_LA_ZONIFICACION_DEL_RIESGO_SISMICO/citation/download
- Campbell, K. (1982). *Bayesian Analysis of extreme earthquake occurrences*.
- Carranza Gómez, M. (2007). *Sistema de alerta sísmica temprana para el sur de la Península Ibérica: determinación de los parámetros de la alerta*. Madrid.
- Colot, J. C., & Gutscher, M. (1999, 2002). *Exploring the Ecuador-Colombia active margin and interplate seismogenic zone*.
- components101Nano. (12 de 03 de 2018). *components101Nano*. Obtenido de components101Nano: <https://components101.com/microcontrollers/arduino-nano>
- components101RTC. (27 de 03 de 2018). *components101RTC*. Obtenido de components101RTC: <https://components101.com/modules/ds3231-rtc-module-pinout-circuit-datasheet>
- components101UNO. (28 de 02 de 2018). *components101UNO*. Obtenido de components101UNO: <https://components101.com/microcontrollers/arduino-uno>
- Egbue & Kellogg. (2010). *Pleistocene to Present North Andean "escape" Tectonophysics*.
- Esteva, L. (1970). *"Consideraciones prácticas en la estimación bayesiana de riesgo sísmico"*.
- Ferrín, A., Pilligua, M., & Aguiar, R. (2016). *COMPORTAMIENTO DEL BLOQUE ESTRUCTURAL DE LA FACULTAD DE COMERCIO EXTERIOR DE LA ULEAM DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DE 2016*. Revista Ciencia.
- Freescale. (08 de 2011). *NXP*. Obtenido de NXP: <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/MMA7361LC.pdf>
- Grunthal, G., & Lorenzo, F. (2009). *Escala Macrosísmica Europea*. Luxembourg.
- Guerrieri y Vittori. (2007). *Intensity Scale ESI2007*. Obtenido de http://tierra.rediris.es/aequa/doc/ESI_07_v_Espanyol_2010_B0.pdf

- IG-EPN. (2018). *Informe Sísmico*.
- IGEPN, & Manosalvas, S. (26 de Junio de 2014). *IGEPN*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-sismografos>
- IGEPN, G. P. (07 de Julio de 2014). *IGEPN*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-acelerografos>
- Invensense. (08 de 19 de 2013). *invensense*. Obtenido de invensense: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>
- invensense. (20 de 06 de 2016). *invensense*. Obtenido de invensense: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- Macías Castillo, M. A., & Ayala Hernández, M. (10 de 09 de 2018). *UNAM*. Obtenido de <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/Septiembre-Octubre2018/Paginas/LaredacelerograficadellIUNAM.aspx>
- Muñoz, D. (s.f.). *Conceptos básicos en riesgo sísmico*. Madrid: Universidad Complutense.
- NEC-SE-DS. (2015). Peligro Sísmico Diseño Sismoresistente. *Norma Ecuatoriana de la Construcción* .
- NEC-SE-RE. (2015). Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras. *Norma Ecuatoriana de la Construcción*.
- Petak y Atkinson. (1982). *Natural hazard Risk Assessment and Public Policy: Anticipating the Unexpected*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/292981920_UTILIDAD_DE_LOS_FRACTALES_EN_LA_PREVENCION_DE_RIESGOS_NATURALES_SU_APLICACION_EN_SISMICIDAD_DESLIZAMIENTOS_E_INUNDACIONES/link/56b381ea08ae636a540d1366/download
- SÁEZ ARIAS, M. A. (2016). *CORRELACIÓN CRUZADA DE RUIDO SÍSMICO PARA LA OBTENCIÓN DE*. Santiago de Chile.
- Seong-Hoon Jeong, Kwang-Ho Lee, & Won-Seok Jang. (2011). *PRISM for Earthquake Engineering*. Yonghyun-Dong: INHA University.
- Undro. (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Report of Expert Group Meeting Geneve.
- Vera Lizcano, B. E. (2003). *Evaluación de errores de datos sísmológicos y sus efectos sobre los parámetros y modelos derivados de estos para una región determinada cubierta por la red del Observatorio Sísmológico del Suroccidente – OSSO*. Cali.
- Yepes Hugo. (2016). Claves para entender los movimientos telúricos en Ecuador. *El Comercio*, págs. <https://www.elcomercio.com/afull/ecuador-terremoto-replicas-manabi-institutogeofisico.html>.

ANEXOS

Anexo A: Diagramas

Diagrama de Almacenamiento

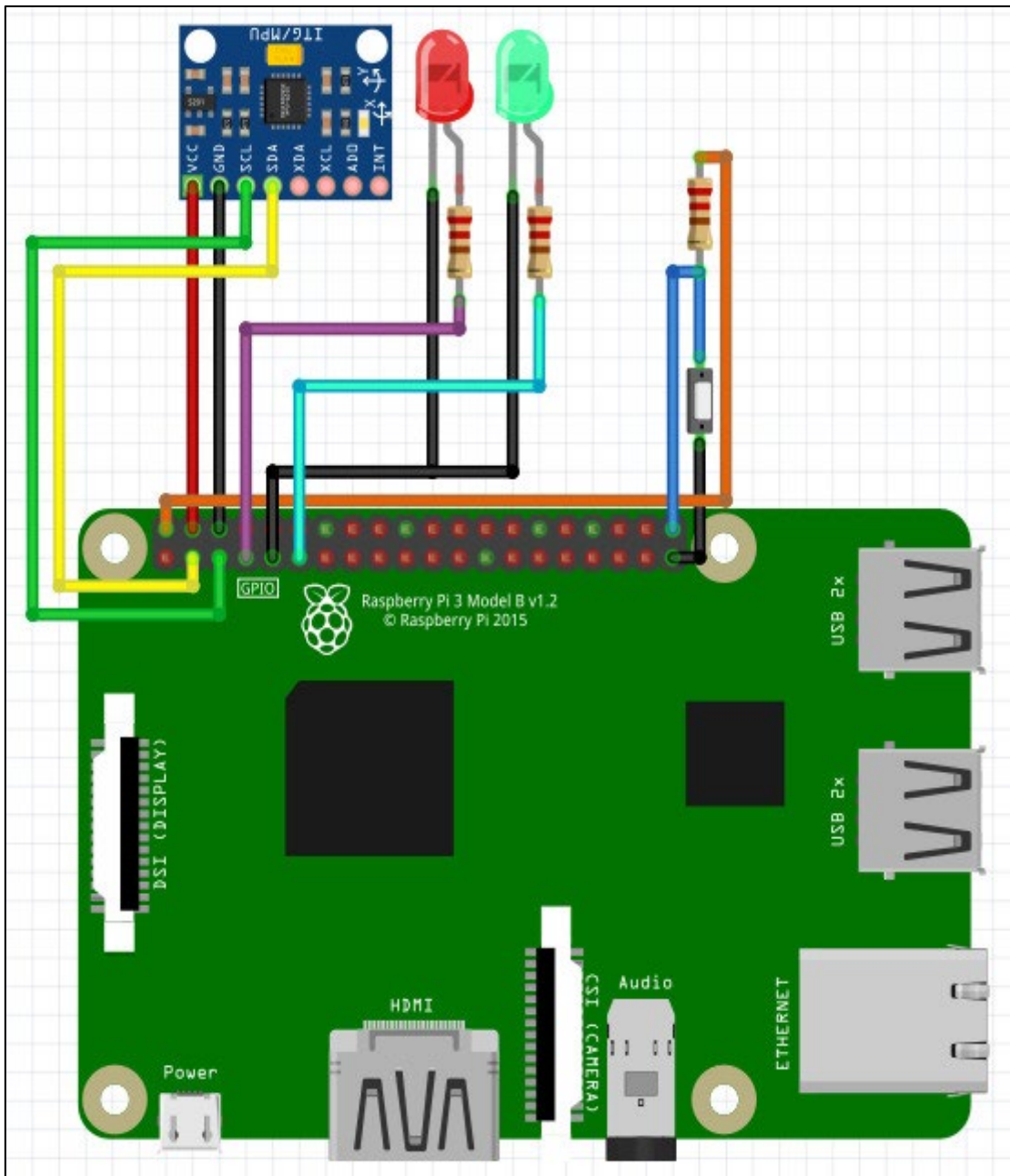
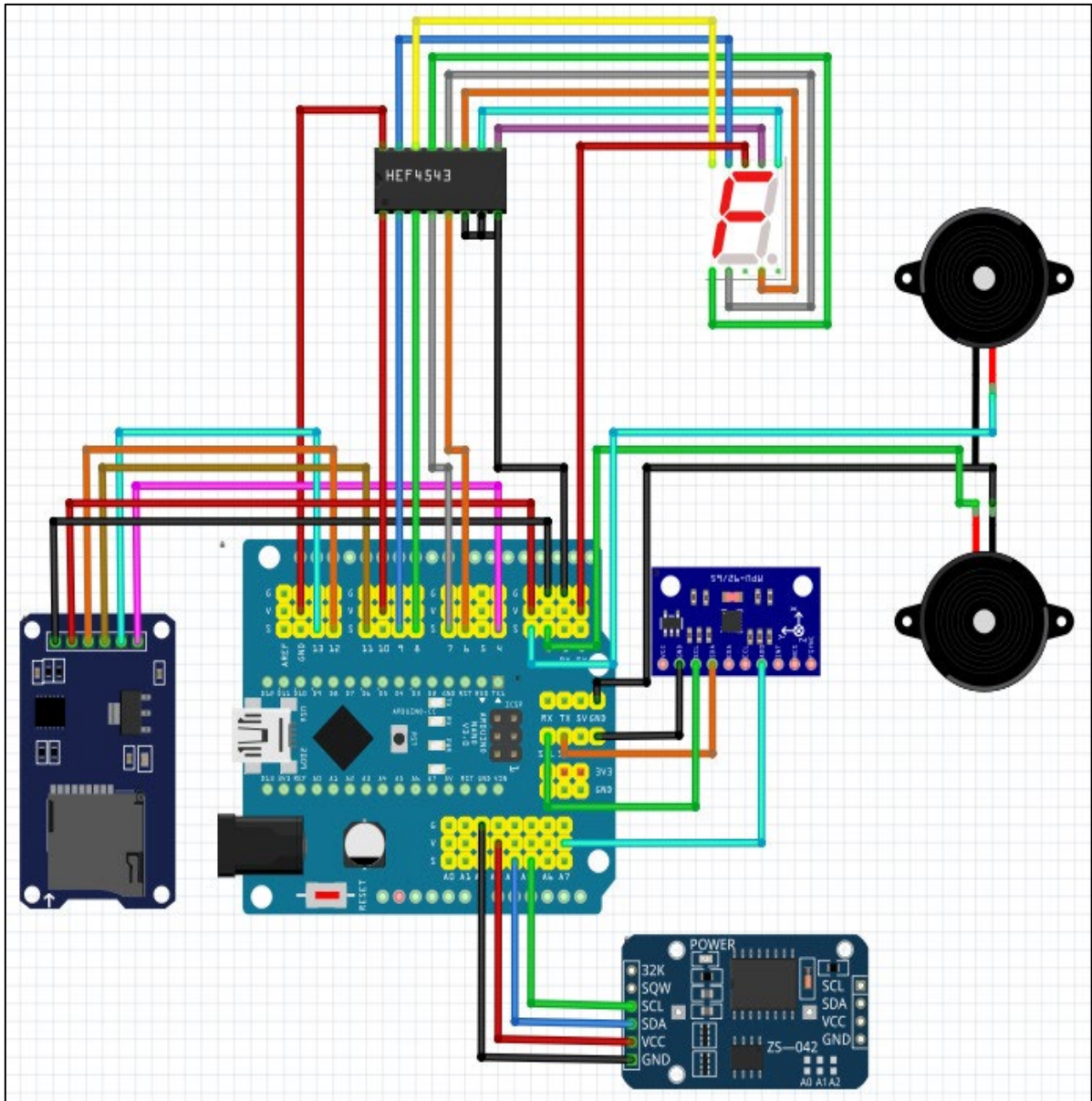


Diagrama de Alerta



Anexo B: Código de Almacenamiento

Código de Almacenamiento (Raspberry)

```
import smbus
import math

import RPi.GPIO as GPIO

import os
import time
import datetime
from time import sleep
from datetime import datetime

power_mgmt_1 = 0x6b
power_mgmt_2 = 0x6c

GPIO.setmode(GPIO.BCM) #BCM por nombre de los pines, no por orden numerico
#GPIO.setmode(GPIO.BOARD) #BOARD por número ordenado de pin
GPIO.setwarnings(False)
GPIO.setup(21,GPIO.IN)

GPIO.setup(4,GPIO.OUT) #Led Verde
GPIO.setup(17,GPIO.OUT) #Led Rojo

def read_byte(reg):
    return bus.read_byte_data(address, reg)

def read_word(reg):
    h = bus.read_byte_data(address, reg)
    l = bus.read_byte_data(address, reg+1)
    value = (h << 8) + l
    return value

def read_word_2c(reg):
    val = read_word(reg)
    if (val >= 0x8000):
        return -((65535 - val) + 1)
    else:
        return val

def dist(a,b):
    return math.sqrt((a*a)+(b*b))

def get_y_rotation(x,y,z):
    radians = math.atan2(x, dist(y,z))
    return -math.degrees(radians)

def get_x_rotation(x,y,z):
    radians = math.atan2(y, dist(x,z))
    return math.degrees(radians)

print ("PRUEBA ACELEROMETRO")
```

```

print ("-----")

#creamos dos variables string para la ruta de guardado del
#archivo, se suman esas dos direcciones para crear la ruta
#en funcion a la hora y la fecha

bus = smbus.SMBus(1) # bus = smbus.SMBus(0) fuer Revision 1
address = 0x68 # via i2cdetect
bus.write_byte_data(address, power_mgmt_1, 0)

var1 = GPIO.input(21)

def AcelRead():
    ACx = 0
    ACy = 0
    ACz = 0

    valFil = 11

    for xfil in range(0,valFil):
        MPU_X = read_word_2c(0x3b)
        MPU_Y = read_word_2c(0x3d)
        MPU_Z = read_word_2c(0x3f)

        ACEL_X = MPU_X / 16384.0
        ACEL_Y = MPU_Y / 16384.0
        ACEL_Z = MPU_Z / 16384.0

        ACx = ACx+ACEL_X
        ACy = ACy+ACEL_Y
        ACz = ACz+ACEL_Z

    ACEL_X = ACx/valFil
    ACEL_Y = ACy/valFil
    ACEL_Z = ACz/valFil

    carpeta = "/home/pi/SismGraf/"
    archivo = now.strftime("%d-%m-%Y %Hh")
    horanow = now.strftime("%H:%M:%S,%f")
    extension = ".txt"
    ruta = carpeta + archivo + extension
    FileName = ruta
    file = open(FileName, "a")
    file.write(horanow+" X:"+str(ACEL_X)+" Y: "+str(ACEL_Y)+" Z: "+str(ACEL_Z)+"\n")
    file.flush()

while var1 == True:
    try:
        var1 = GPIO.input(21)
        now = datetime.now()
        AcelRead()
        GPIO.output(4,GPIO.HIGH) #VERDE ON

```

```
GPIO.output(17,GPIO.LOW) #ROJO OFF

except OSError:
    print("Error en el programa")
    carpeta = "/home/pi/SismGraf/"
    archivo = now.strftime("%d-%m-%Y %Hh")
    horanow = now.strftime("%H:%M:%S")
    extension = ".txt"
    ruta = carpeta + archivo + extension
    FileName = ruta
    file = open(FileName, "a")
    file.write(horanow+" ***** ERROR DE LECTURA DEL SENSOR *****+"\n")
    file.flush()
    GPIO.output(4,GPIO.LOW) #VERDE OFF
    GPIO.output(17,GPIO.HIGH) #ROJO ON

print ("Programa terminado")
GPIO.output(4,GPIO.LOW) #VERDE OFF
GPIO.output(17,GPIO.LOW) #ROJO ON
```

Anexo C: Código de la Alarma

Código de la Alarma (Arduino)

```
//Para el modulo acelerómetro y reloj los pines son los mismos ya
//que comparten el mismo bus de comunicación
//El acelerómetro se conecta el pin ADO a 5V
//SDA - Pin A4
//SCL - Pin A5
//GND - GND
//VCC - VCC

//Para el módulo de MicroSD
// Modulo - Arduino nano
// CS PIN 4
// SCK PIN 13
// MOSI PIN 11
// MISO PIN 12

#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

#include <DS3231.h> // Se tiene que incluir la libreria DS3231

DS3231 rtc(SDA, SCL);

#define MPU9250_ADDRESS 0x69
#define MAG_ADDRESS 0x0C

#define GYRO_FULL_SCALE_250_DPS 0x00
#define GYRO_FULL_SCALE_500_DPS 0x08
#define GYRO_FULL_SCALE_1000_DPS 0x10
#define GYRO_FULL_SCALE_2000_DPS 0x18

#define ACC_FULL_SCALE_2_G 0x00
#define ACC_FULL_SCALE_4_G 0x08
#define ACC_FULL_SCALE_8_G 0x10
#define ACC_FULL_SCALE_16_G 0x18

int mag = 0;
double ax2 = 0;
double ay2 = 0;
double az2 = 0;

float axFx = 0;
float ayFx = 0;
float azFx = 0;

int axSet = 0;
int aySet = 0;
int azSet = 0;

String Magnit;
String Fecha;
String Hora;
String Texto;

File myFile;

//Funcion auxiliar lectura
void I2Cread(uint8_t Address, uint8_t Register, uint8_t Nbytes,
uint8_t* Data)
```

```

{
    Wire.beginTransaction(Address);
    Wire.write(Register);
    Wire.endTransmission();

    Wire.requestFrom(Address, Nbytes);
    uint8_t index = 0;
    while (Wire.available())
        Data[index++] = Wire.read();
}

// Funcion auxiliar de escritura
void I2CwriteByte(uint8_t Address, uint8_t Register, uint8_t Data)
{
    Wire.beginTransaction(Address);
    Wire.write(Register);
    Wire.write(Data);
    Wire.endTransmission();
}

void setup()
{
    Wire.begin();
    Serial.begin(115200);
    delay(10);
    pinMode(12, OUTPUT);

    pinMode(6, OUTPUT);
    pinMode(7, OUTPUT);
    pinMode(8, OUTPUT);
    pinMode(9, OUTPUT);

    rtc.begin();

    delay(10);

    Serial.print("Initializing SD card...");
    if (!SD.begin(4)) {
        Serial.println("initialization failed!");
        while (1);
    }
    Serial.println("initialization done.");

    delay(10);

    // Configurar acelerometro
    I2CwriteByte(MPU9250_ADDRESS, 28, ACC_FULL_SCALE_2_G);
    // Configurar giroscopio
    I2CwriteByte(MPU9250_ADDRESS, 27, GYRO_FULL_SCALE_2000_DPS);
    // Configurar magnetometro
    I2CwriteByte(MPU9250_ADDRESS, 0x37, 0x02);
    I2CwriteByte(MAG_ADDRESS, 0x0A, 0x01);
    delay(10);
}

void loop()
{
    // --- Lectura acelerometro y giroscopio ---

```

```

uint8_t Buf[14];
I2Cread(MPU9250_ADDRESS, 0x3B, 14, Buf);
delayMicroseconds(100);
//Serial.print("paso ");

// Convertir registros acelerometro
int16_t ax = -(Buf[0] << 8 | Buf[1]);
int16_t ay = -(Buf[2] << 8 | Buf[3]);
int16_t az = Buf[4] << 8 | Buf[5];

// --- Mostrar valores ---

axSet = (ax+507.0);
aySet = (ay+35.0);
azSet = (az-16832);

axSet = abs(axSet);
aySet = abs(aySet);
azSet = abs(azSet);

if(axSet>aySet && axSet>azSet)
{
    mag = axSet;
}
if(aySet>axSet && aySet>azSet)
{
    mag = aySet;
}
if(azSet>axSet && azSet>aySet)
{
    mag = azSet;
}

if (mag > 0 && mag < 28){
    Serial.print("M1  :");
    digitalWrite(6, HIGH);//1
    digitalWrite(7, LOW);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
}
if (mag > 28 && mag < 229){
    Serial.print("M2,3 :");
    digitalWrite(6, HIGH);//3
    digitalWrite(7, HIGH);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
}
if (mag > 229 && mag < 639){
    Serial.print("M4  :");
    digitalWrite(6, LOW);//4
    digitalWrite(7, LOW);
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(9, LOW);
}
if (mag > 639 && mag < 1507){
    Serial.print("M5  :");
    digitalWrite(6, HIGH);//5
    digitalWrite(7, LOW);
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(9, LOW);
}
}

```

```
if (mag > 1507 && mag < 2949){
  Serial.print("M6  :");
  digitalWrite(6, LOW);//6
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(9, LOW);
  Magnit = "Magnitud 6";
  Fecha = rtc.getDateStr();
  Hora = rtc.getTimeStr();
  Texto = Fecha + " " + Hora + " " + Magnit;
  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
    dataFile.println(Texto);
    dataFile.close();
  }
}
if (mag > 2949 && mag < 5570){
  Serial.print("M7  :");
  digitalWrite(6, HIGH);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(9, LOW);
  Magnit = "Magnitud 7";
  Fecha = rtc.getDateStr();
  Hora = rtc.getTimeStr();
  Texto = Fecha + " " + Hora + " " + Magnit;
  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
    dataFile.println(Texto);
    dataFile.close();
  }
}
if (mag > 5570 && mag < 5734){
  Serial.print("M8  :");
  digitalWrite(6, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(9, HIGH);
  Magnit = "Magnitud 8";
  Fecha = rtc.getDateStr();
  Hora = rtc.getTimeStr();
  Texto = Fecha + " " + Hora + " " + Magnit;
  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
    dataFile.println(Texto);
    dataFile.close();
  }
}
if (mag > 5734 && mag < 20315){
  Serial.print("M9  :");
  digitalWrite(6, HIGH);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(9, HIGH);
  Magnit = "Magnitud 9";
  Fecha = rtc.getDateStr();
  Hora = rtc.getTimeStr();
  Texto = Fecha + " " + Hora + " " + Magnit;
  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
    dataFile.println(Texto);
```

```
        dataFile.close();
    }
}
if (mag > 20315){
    Serial.print("M10 :");
    digitalWrite(6, LOW);
    digitalWrite(7, LOW);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    Magnit = "Magnitud 10";
    Fecha = rtc.getDateStr();
    Hora = rtc.getTimeStr();
    Texto = Fecha + " " + Hora + " " + Magnit;
    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
        dataFile.println(Texto);
        dataFile.close();
    }
}

Serial.print("\t");

// Acelerometro
Serial.print(axSet);
Serial.print("\t");
Serial.print(aySet);
Serial.print("\t");
Serial.print(azSet);

Serial.print("\t");
Serial.println(mag);

// delay(10);
}
```

PRISM for Earthquake Engineering

A Program for seismic response analysis of SDOF systems

User Manual

Version 2.0.0

Seong-Hoon Jeong

Kwang-Ho Lee

Won-Seok Jang

Contents

1. Introduction.....	3
2. Ground motion	5
2.1 Properties.....	5
2.2 Correction	6
2.3 Arias Intensity.....	6
2.4 Filtering (Butterworth, Bandpass).....	6
3. Ground motion	8
3.1 Linear Elastic model.....	8
3.2 Bi-linear model	9
3.3 Tri-linear model.....	10
3.4 Bouc-Wen model.....	11
3.5 Modified Takeda model	12
3.6 Al-Bermani model	13
4. Response Spectra	14
5. Setting	14

1. Introduction

PRISM is a program for seismic response analysis of single-degree-of-freedom systems. It is capable of (i) processing and filtering earthquake ground motions, (ii) calculating response-histories of a structure with various hysteresis models, and (iii) generating elastic and inelastic response spectra. Scaling, cropping and baseline correction can be performed on earthquake records prior to time-integration. Numerical and graphical results can be exported to the clipboard.

System requirements for PRISM:

- Windows® XP/Vista/7/8
- 512MB or more available ram space
- 100MB or more available hard disk space
- 1280x800 or more higher resolution

Main features of PRISM are as follows:

- Processing earthquake ground motions [Fig. 1.1]
 - Scaling and cropping
 - Baseline correction
 - Noise filtering
 - Monitoring arias intensity
- Dynamic response history analysis [Fig. 1.2]
 - Numerical and graphical results on acceleration, velocity and displacement
 - Monitoring force-displacement relationship of an inelastic structure
 - Inelastic dynamic analysis with various hysteresis curves
Linear elastic, Bi-linear, Tri-linear, Bouc-Wen, Modified Takeda, and Al-Bermani models can be used.
- Response spectra [Fig. 1.3]
 - Elastic response spectra with various viscous damping values
 - Inelastic response spectra with various ductility demands
 - Numerical and graphical results in various formats including the ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum).



Fig. 1.1 Ground Motion Menu

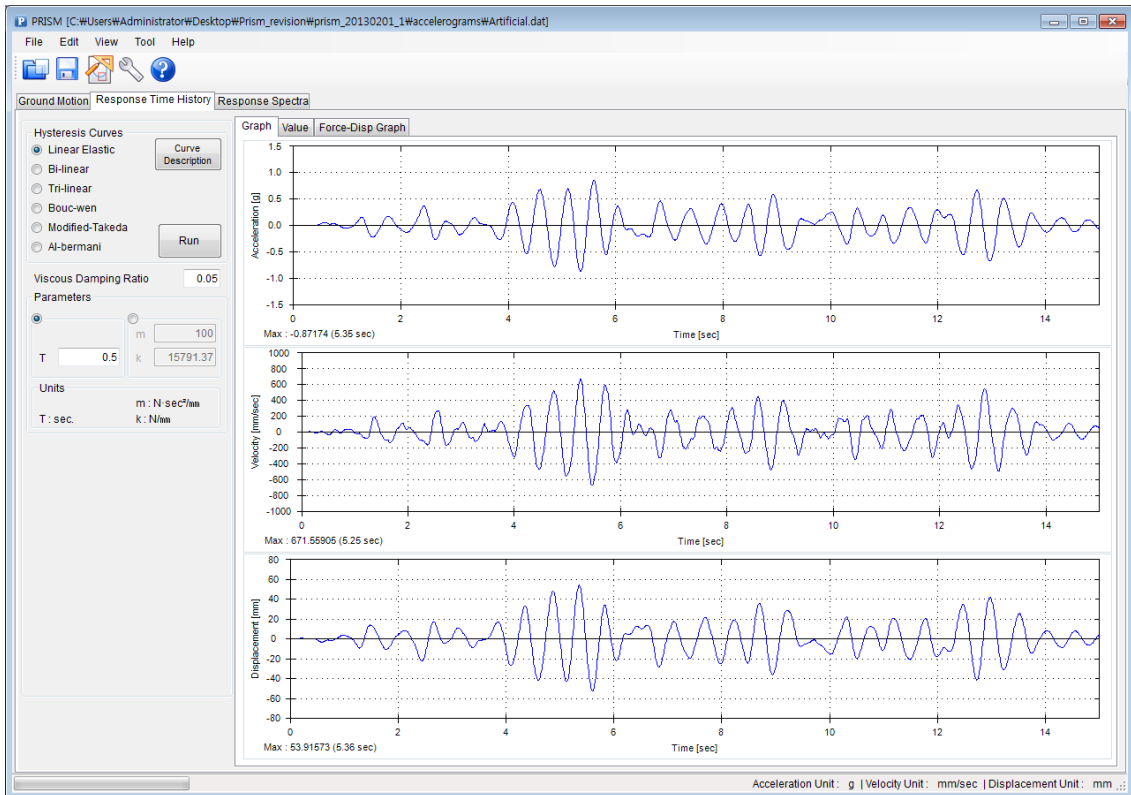


Fig. 1.2 Response Time History Menu

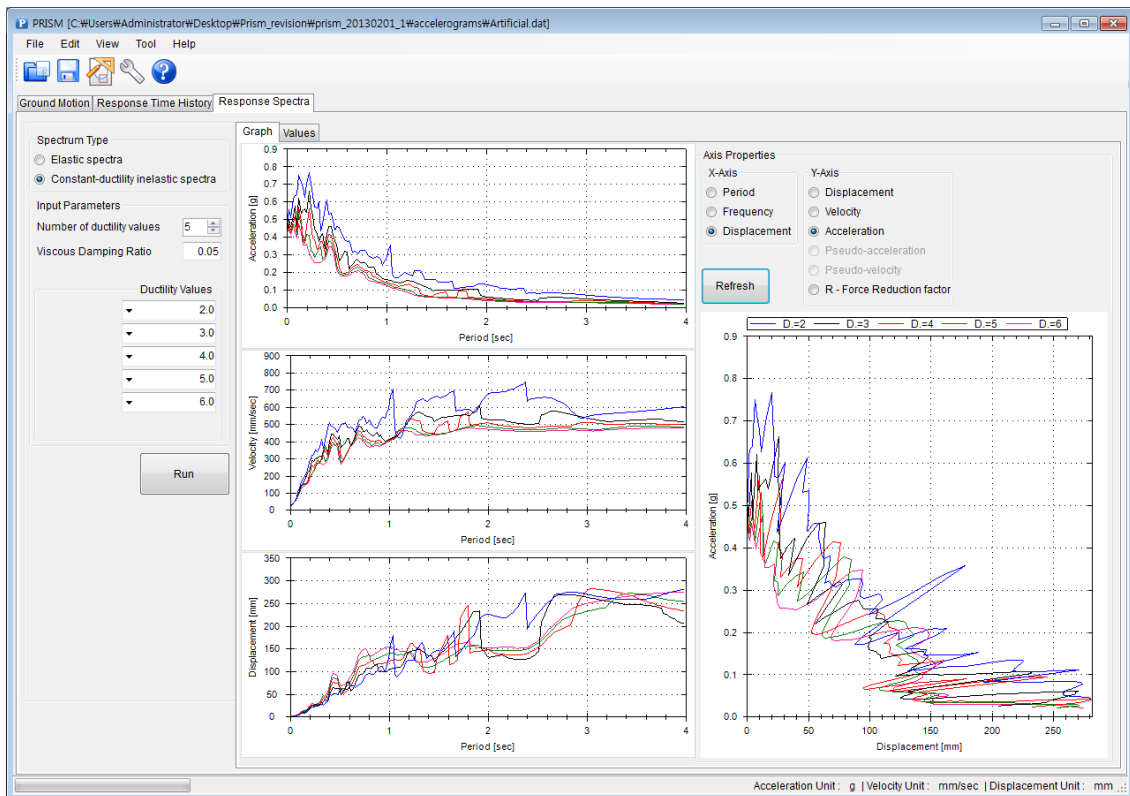


Fig. 1.3 Response Spectra Menu

Prism is developed to provide engineers, researchers and students with a tool to easily investigate seismic responses of structures. Users may make and distribute unlimited copies of the program in its original form. The free PRISM license expires on 31 December of each year, and new version can be downloaded on 1 January of the following year.

2. Ground motion

PRISM can read accelerograms saved in two most-widely used formats as follows:

(1) Format 1: 1st column for time and 2nd column for acceleration

[Fig. 2.1]

(2) Format 2: NGDC (National Geographical Data Center of NOAA) or NGA (Next Generation Attenuation Model) [Fig. 2.2]

Once an accelerogram has been imported, the corresponding velocity and displacement time-histories are automatically computed and plotted in the main window. Prism provides a convenient feature for correcting accelerograms such as scaling, cropping the signal and baseline correction.

2.1 Properties

No. of Raw data line : The number of acceleration data points

2.2 Correction

- Scaling to target PGA** : Magnify the given accelerogram
- Crop Signal** : Truncate the given accelerogram
- Baseline Correction** : By default, baseline correction of time-history is not carried out before integration. The user can decide whether this operation is to be carried out or not. Further information and discussion on baseline correction can be found in the work by Chiu.
- Unit change** : When user saves the values, saved the values in unit that has been converted.
- Apply Filtering** : Device for filtering a value of the noise occurred by the ambient vibration.

2.3 Arias Intensity

- Arias Intensity** : A measure of the strength of a ground motion. It was proposed by Chilean engineer Arturo Arias in 1970. I_A (Arias Intensity) is derived from the integration of the square of the entire acceleration record; thus, I_A includes the characteristics of amplitude, frequency content and duration of ground motion

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \quad (m/s)$$

Where, g is the acceleration due to gravity

T_d is the duration of signal above threshold

2.4 Filtering (Butterworth, Bandpass)

- Order** : Degree of equation define expression mode of curve. Polynomials of up to the 8th order may be used.
- Cut Freq [Hz]** : Determine the cut-off frequency of the bandpass filter.

References

- Chiu, H.-C., "Stable baseline correction of digital strong-motion data", Bulletin of the Seismological Society of America, V.87 (4), p932-944, 1997
- Arias, A., "A measure of earthquake intensity", In : Hansen, R.J. (Ed.), Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press, Cambridge, MA, p.438-483

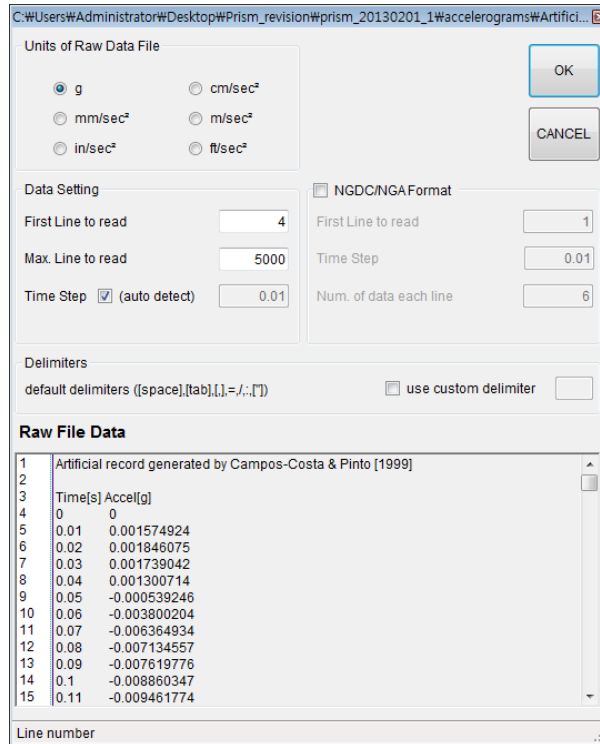


Fig. 2.1 Accelerogram format 1

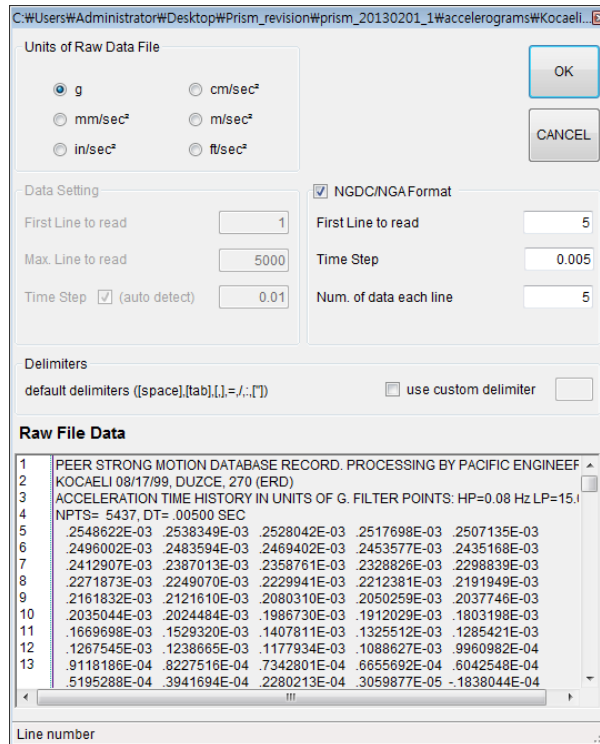


Fig. 2.2 Accelerogram format 2

4. Response Spectra

Elastic and Inelastic response spectra are computed by means of the Newmark time integration method. The parameters of the Newmark method can be modified in the setting menu of the program. Users can define up to five different levels of viscous damping ratio. Inelastic spectra are calculated based on bi-linear oscillators and post-yield stiffness ratio can be modified in the setting menu of the program. By default, post-yield stiffness ratio is 0 (Elastic Perfectly Plastic hysteresis). The user can modify the post-yield stiffness ratio between 0 and 1.0. Up to five target ductility values can be given for the calculation of inelastic spectra. In the calculation, if more than one R-factor (Force reduction factor) corresponds to a given ductility value, the smallest factor is chosen. After determining the input parameters (viscous damping ratio and ductility value), users need to click "Run" button to commence the required calculation. The minimum and maximum periods of the spectra are 0.02 and 4.0 seconds, respectively.

5. Setting

This program modifying function is available from the Setting screen. User can access through Tool > Setting or through toolbar button.

The program may define the number of decimal points to be used in the display of results. Further, it will stop if the displacement is larger than the limit displacement. [Fig. 5.1]

The program provides an option to guarantee the accuracy of the analysis results by limiting the integration time step as small enough to avoid numerical errors. The ratio of dt/T (integration time step to the period of a structure) needs to be less than a certain value to reduce numerical errors. This limitation is useful only for oscillators with very short periods. While the program's default option is off (not to apply the limitation) for the rapid process, users can apply the limit by marking the check box in the setting menu as shown in the below figure. [Fig. 5.2]

For the computation of constant-ductility spectra by bilinear curves, the post-yield stiffness ratio needs to be defined. Further, when accomplish bilinear analysis, it is required for a convergence criterion to be set, in order for the bilinear analysis to progress from one step to the other. For this reason, a 'Convergence tolerance' is defined, with default values amply small to warrant very good accuracy. If users wish to speed, their analysis may obviously define larger convergence tolerance values. [Fig. 5.3]

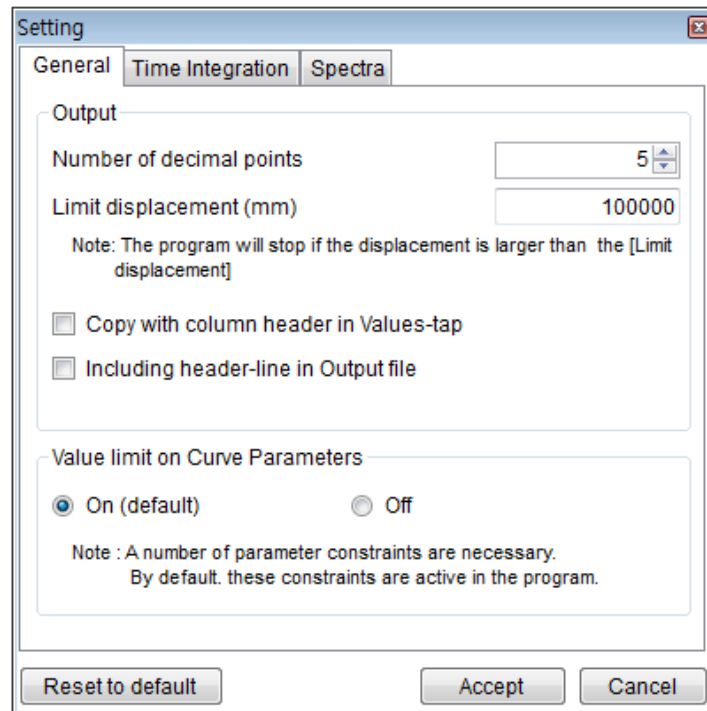


Fig. 5.1 Setting General

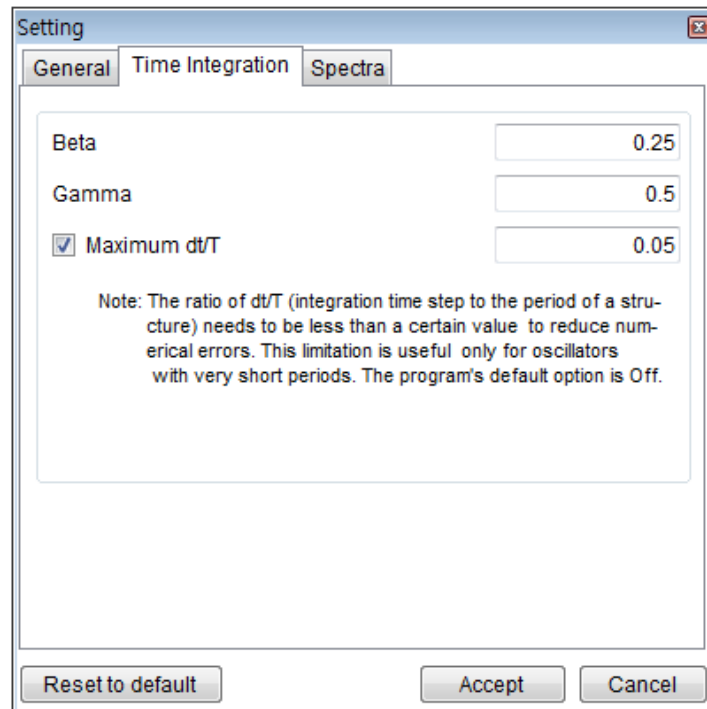


Fig. 5.2 Setting Time Integration

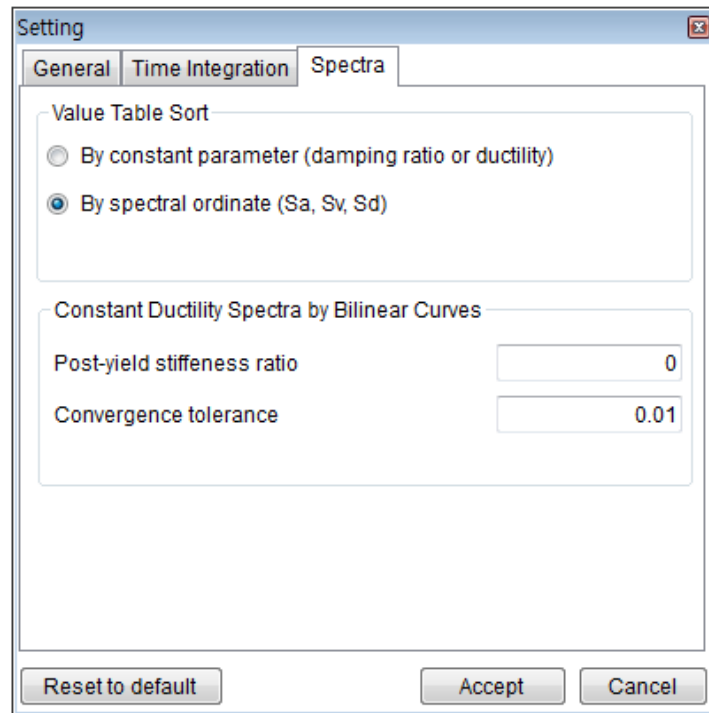


Fig. 5.3 Setting Spectra



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

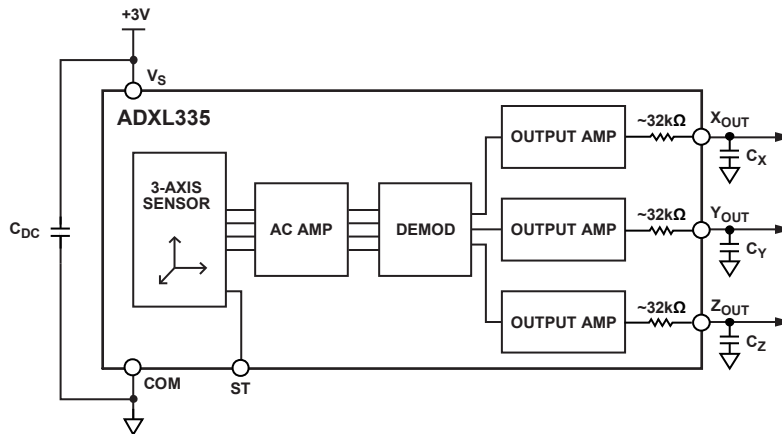


Figure 1.

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.

SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3\text{ V}$, $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$, acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT	Each axis				
Measurement Range		± 3	± 3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		± 0.3		%
Package Alignment Error			± 1		Degrees
Interaxis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ¹			± 1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC) ²	Each axis				
Sensitivity at X_{OUT} , Y_{OUT} , Z_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature ³	$V_S = 3\text{ V}$		± 0.01		%/°C
ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)					
0 g Voltage at X_{OUT} , Y_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at Z_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			± 1		mg/°C
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density X_{OUT} , Y_{OUT}			150		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Noise Density Z_{OUT}			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
FREQUENCY RESPONSE ⁴					
Bandwidth X_{OUT} , Y_{OUT} ⁵	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z_{OUT} ⁵	No external filter		550		Hz
R_{FILT} Tolerance			$32 \pm 15\%$		k Ω
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
SELF-TEST ⁶					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		μA
Output Change at X_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	-150	-325	-600	mV
Output Change at Y_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at Z_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+550	+1000	mV
OUTPUT AMPLIFIER					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		μA
Turn-On Time ⁷	No external filter		1		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C

¹ Defined as coupling between any two axes.

² Sensitivity is essentially ratiometric to V_S .

³ Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.

⁴ Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors (C_X , C_Y , C_Z).

⁵ Bandwidth with external capacitors = $1/(2 \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C)$. For C_X , $C_Y = 0.003\ \mu\text{F}$, bandwidth = 1.6 kHz. For $C_Z = 0.01\ \mu\text{F}$, bandwidth = 500 Hz. For C_X , C_Y , $C_Z = 10\ \mu\text{F}$, bandwidth = 0.5 Hz.

⁶ Self-test response changes cubically with V_S .

⁷ Turn-on time is dependent on C_X , C_Y , C_Z and is approximately $160 \times C_X$ or C_Y or $C_Z + 1\text{ ms}$, where C_X , C_Y , C_Z are in microfarads (μF).

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

Parameter	Rating
Acceleration (Any Axis, Unpowered)	10,000 <i>g</i>
Acceleration (Any Axis, Powered)	10,000 <i>g</i>
V_s	-0.3 V to +3.6 V
All Other Pins	(COM - 0.3 V) to (V_s + 0.3 V)
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Common)	Indefinite
Temperature Range (Powered)	-55°C to +125°C
Temperature Range (Storage)	-65°C to +150°C

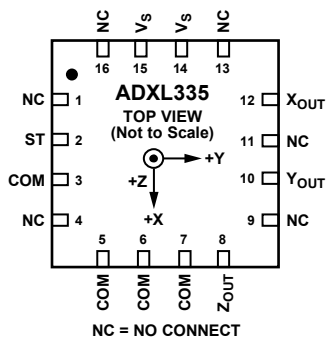
Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



NOTES
 1. EXPOSED PAD IS NOT INTERNALLY CONNECTED BUT SHOULD BE SOLDERED FOR MECHANICAL INTEGRITY.

075108-003

Figure 2. Pin Configuration

Table 3. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	NC	No Connect ¹ .
2	ST	Self-Test.
3	COM	Common.
4	NC	No Connect ¹ .
5	COM	Common.
6	COM	Common.
7	COM	Common.
8	Z _{OUT}	Z Channel Output.
9	NC	No Connect ¹ .
10	Y _{OUT}	Y Channel Output.
11	NC	No Connect ¹ .
12	X _{OUT}	X Channel Output.
13	NC	No Connect ¹ .
14	V _S	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
15	V _S	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
16	NC	No Connect ¹ .
EP	Exposed Pad	Not internally connected. Solder for mechanical integrity.

¹NC pins are not internally connected and can be tied to COM pins, unless otherwise noted.



±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer

The MMA7361L is a low power, low profile capacitive micromachined accelerometer featuring signal conditioning, a 1-pole low pass filter, temperature compensation, self test, 0g-Detect which detects linear freefall, and g-Select which allows for the selection between 2 sensitivities. Zero-g offset and sensitivity are factory set and require no external devices. The MMA7361L includes a Sleep Mode that makes it ideal for handheld battery powered electronics.

Features

- 3mm x 5mm x 1.0mm LGA-14 Package
- Low Current Consumption: 400 μ A
- Sleep Mode: 3 μ A
- Low Voltage Operation: 2.2 V – 3.6 V
- High Sensitivity (800 mV/g @ 1.5g)
- Selectable Sensitivity (\pm 1.5g, \pm 6g)
- Fast Turn On Time (0.5 ms Enable Response Time)
- Self Test for Freefall Detect Diagnosis
- 0g-Detect for Freefall Protection
- Signal Conditioning with Low Pass Filter
- Robust Design, High Shocks Survivability
- RoHS Compliant
- Environmentally Preferred Product
- Low Cost

Typical Applications

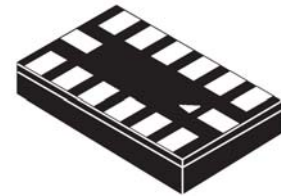
- 3D Gaming: Tilt and Motion Sensing, Event Recorder
- HDD MP3 Player: Freefall Detection
- Laptop PC: Freefall Detection, Anti-Theft
- Cell Phone: Image Stability, Text Scroll, Motion Dialing, E-Compass
- Pedometer: Motion Sensing
- PDA: Text Scroll
- Navigation and Dead Reckoning: E-Compass Tilt Compensation
- Robotics: Motion Sensing

ORDERING INFORMATION				
Part Number	Temperature Range	Package Drawing	Package	Shipping
MMA7361LT	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	Tray
MMA7361LR1	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	7" Tape & Reel
MMA7361LR2	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	13" Tape & Reel

MMA7361L

**MMA7361L: XYZ AXIS
 ACCELEROMETER
 ±1.5g, ±6g**

Bottom View



**14 LEAD
 LGA
 CASE 1977-01**

Top View

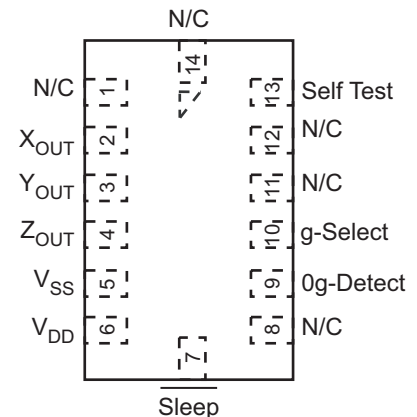


Figure 1. Pin Connections

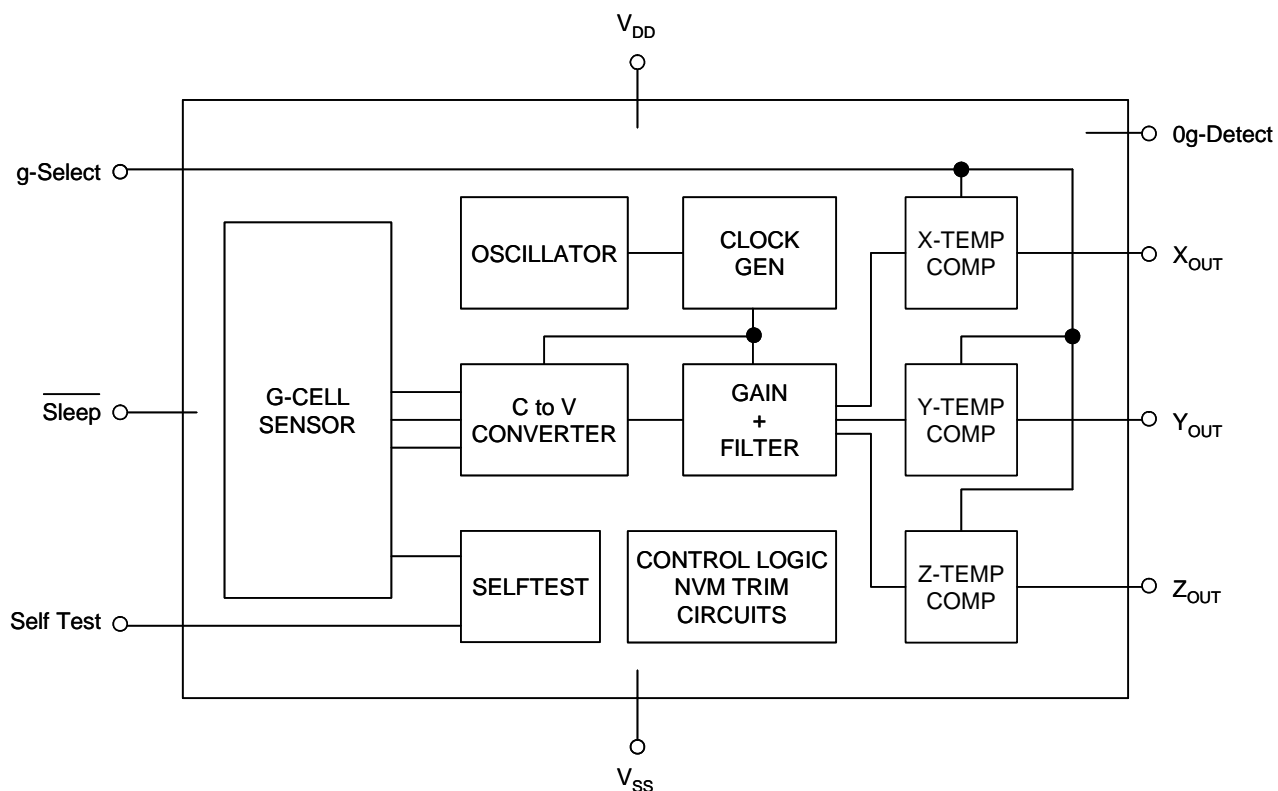


Figure 2. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

Table 1. Maximum Ratings

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Acceleration (all axis)	g_{max}	± 5000	g
Supply Voltage	V_{DD}	-0.3 to +3.6	V
Drop Test ⁽¹⁾	D_{drop}	1.8	m
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.

Although the Freescale accelerometer contains internal 2000 V ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can

alter the performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

Table 2. Operating CharacteristicsUnless otherwise noted: $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 85^{\circ}\text{C}$, $2.2\text{ V} \leq V_{\text{DD}} \leq 3.6\text{ V}$, Acceleration = 0g, Loaded output⁽¹⁾

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range ⁽²⁾					
Supply Voltage ⁽³⁾	V_{DD}	2.2	3.3	3.6	V
Supply Current ⁽⁴⁾	I_{DD}	—	400	600	μA
Supply Current at Sleep Mode ⁽⁴⁾	I_{DD}	—	3	10	μA
Operating Temperature Range	T_A	-40	—	+85	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range, X-Axis, Y-Axis, Z-Axis					
g-Select: 0	g_{FS}	—	± 1.5	—	g
g-Select: 1	g_{FS}	—	± 6.0	—	g
Output Signal					
Zero-g ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{DD}} = 3.3\text{ V}$) ^{(5), (6)}	V_{OFF}	1.485	1.65	1.815	V
Zero-g ⁽⁴⁾	V_{OFF}, T_A	-2.0	± 0.5	+2.0	$\text{mg}/^{\circ}\text{C}$
Sensitivity ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{DD}} = 3.3\text{ V}$)					
1.5g	$S_{1.5\text{g}}$	740	800	860	mV/g
6g	$S_{6\text{g}}$	190.6	206	221.5	mV/g
Sensitivity ⁽⁴⁾	S, T_A	-0.0075	± 0.002	+0.0075	$\%/^{\circ}\text{C}$
Bandwidth Response					
XY	$f_{-3\text{dBXY}}$	—	400	—	Hz
Z	$f_{-3\text{dBZ}}$	—	300	—	Hz
Output Impedance	Z_O	—	32	—	$\text{k}\Omega$
0g-Detect	$0g_{\text{detect}}$	-0.4	0	+0.4	g
Self Test					
Output Response					
$X_{\text{OUT}}, Y_{\text{OUT}}$	Δg_{STXY}	+0.05	-0.1	—	g
Z_{OUT}	Δg_{STZ}	+0.8	+1.0	+1.2	g
Input Low	V_{IL}	V_{SS}	—	$0.3 V_{\text{DD}}$	V
Input High	V_{IH}	$0.7 V_{\text{DD}}$	—	V_{DD}	V
Noise					
Power Spectral Density RMS (0.1 Hz – 1 kHz) ⁽⁴⁾	n_{PSD}	—	350	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Control Timing					
Power-Up Response Time ⁽⁷⁾	t_{RESPONSE}	—	1.0	2.0	ms
Enable Response Time ⁽⁸⁾	t_{ENABLE}	—	0.5	2.0	ms
Self Test Response Time ⁽⁹⁾	t_{ST}	—	2.0	5.0	ms
Sensing Element Resonant Frequency					
XY	f_{GCELLXY}	—	6.0	—	kHz
Z	f_{GCELLZ}	—	3.4	—	kHz
Internal Sampling Frequency	f_{CLK}	—	11	—	kHz
Output Stage Performance					
Full-Scale Output Range ($I_{\text{OUT}} = 3\ \mu\text{A}$)	V_{FSO}	$V_{\text{SS}}+0.1$	—	$V_{\text{DD}}-0.1$	V
Nonlinearity, $X_{\text{OUT}}, Y_{\text{OUT}}, Z_{\text{OUT}}$	NL_{OUT}	-1.0	—	+1.0	%FSO
Cross-Axis Sensitivity ⁽¹⁰⁾	$V_{\text{XY}, \text{XZ}, \text{YZ}}$	-5.0	—	+5.0	%

- For a loaded output, the measurements are observed after an RC filter consisting of an internal 32k Ω resistor and an external 3.3nF capacitor (recommended as a minimum to filter clock noise) on the analog output for each axis and a 0.1 μF capacitor on $V_{\text{DD}} - \text{GND}$. The output sensor bandwidth is determined by the Capacitor added on the output. $f = 1/2\pi * (32 \times 10^3) * C$. $C = 3.3\text{ nF}$ corresponds to $\text{BW} = 1507\text{HZ}$, which is the minimum to filter out internal clock noise.
- These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
- Within the supply range of 2.2 and 3.6 V, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
- This value is measured with g-Select in 1.5g mode.
- The device can measure both + and – acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above $V_{\text{DD}}/2$. For negative acceleration, the output will decrease below $V_{\text{DD}}/2$.
- For optimal 0g offset performance, adhere to AN3484 and AN3447
- The response time between 10% of full scale V_{DD} input voltage and 90% of the final operating output voltage.
- The response time between 10% of full scale Sleep Mode input voltage and 90% of the final operating output voltage.
- The response time between 10% of the full scale self test input voltage and 90% of the self test output voltage.
- A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90° from the true axis of sensitivity.

BASIC CONNECTIONS

Pin Descriptions

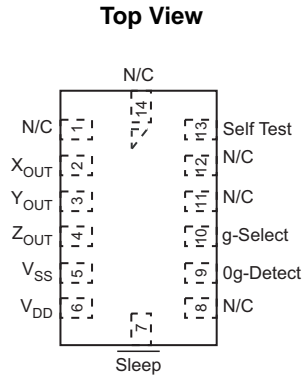


Figure 4. Pinout Description

Table 4. Pin Descriptions

Pin No.	Pin Name	Description
1	N/C	No internal connection Leave unconnected
2	X _{OUT}	X direction output voltage
3	Y _{OUT}	Y direction output voltage
4	Z _{OUT}	Z direction output voltage
5	V _{SS}	Power Supply Ground
6	V _{DD}	Power Supply Input
7	Sleep	Logic input pin to enable product or Sleep Mode
8	NC	No internal connection Leave unconnected
9	0g-Detect	Linear Freefall digital logic output signal
10	g-Select	Logic input pin to select g level
11	N/C	Unused for factory trim Leave unconnected
12	N/C	Unused for factory trim Leave unconnected
13	Self Test	Input pin to initiate Self Test
14	N/C	Unused for factory trim Leave unconnected

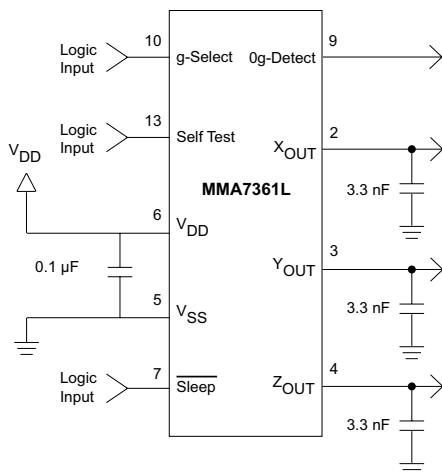


Figure 5. Accelerometer with Recommended Connection Diagram

PCB Layout

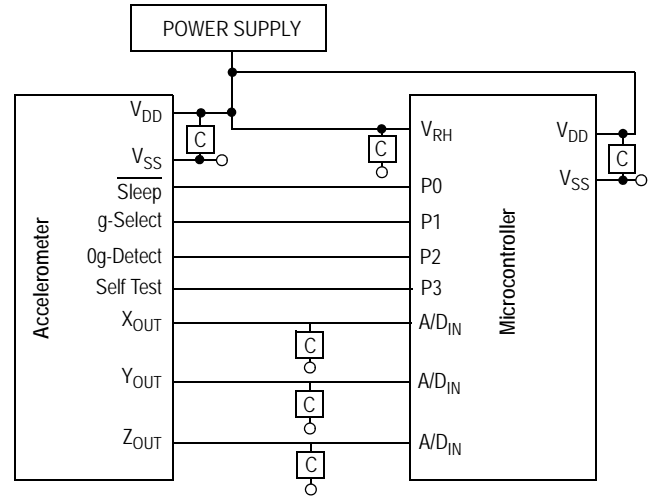


Figure 6. Recommended PCB Layout for Interfacing Accelerometer to Microcontroller

NOTES:

1. Use 0.1 μF capacitor on V_{DD} to decouple the power source.
2. Physical coupling distance of the accelerometer to the microcontroller should be minimal.
3. Place a ground plane beneath the accelerometer to reduce noise, the ground plane should be attached to all of the open ended terminals shown in [Figure 6](#).
4. Use a 3.3nF capacitor on the outputs of the accelerometer to minimize clock noise (from the switched capacitor filter circuit).
5. PCB layout of power and ground should not couple power supply noise.
6. Accelerometer and microcontroller should not be a high current path.
7. A/D sampling rate and any external power supply switching frequency should be selected such that they do not interfere with the internal accelerometer sampling frequency (11 kHz for the sampling frequency). This will prevent aliasing errors.
8. 10M Ω or higher is recommended on X_{OUT}, Y_{OUT} and Z_{OUT} to prevent loss due to the voltage divider relationship between the internal 32 k Ω resistor and the measurement input impedance.

FEATURES

- Ultralow power:** as low as 23 μA in measurement mode and 0.1 μA in standby mode at $V_s = 2.5\text{ V}$ (typical)
- Power consumption scales automatically with bandwidth**
- User-selectable resolution**
 - Fixed 10-bit resolution
 - Full resolution, where resolution increases with g range, up to 13-bit resolution at $\pm 16\text{ g}$ (maintaining 4 mg/LSB scale factor in all g ranges)
- Embedded memory management system with FIFO technology** minimizes host processor load
- Single tap/double tap detection**
- Activity/inactivity monitoring**
- Free-fall detection**
- Supply voltage range:** 2.0 V to 3.6 V
- I/O voltage range:** 1.7 V to V_s
- SPI (3- and 4-wire) and I²C digital interfaces**
- Flexible interrupt modes mappable to either interrupt pin**
- Measurement ranges selectable via serial command**
- Bandwidth selectable via serial command**
- Wide temperature range** (-40°C to $+85^\circ\text{C}$)
- 10,000 g shock survival**
- Pb free/RoHS compliant**
- Small and thin:** 3 mm \times 5 mm \times 1 mm LGA package

APPLICATIONS

- Handsets
- Medical instrumentation
- Gaming and pointing devices
- Industrial instrumentation
- Personal navigation devices
- Hard disk drive (HDD) protection

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL345 is a small, thin, ultralow power, 3-axis accelerometer with high resolution (13-bit) measurement at up to $\pm 16\text{ g}$. Digital output data is formatted as 16-bit twos complement and is accessible through either a SPI (3- or 4-wire) or I²C digital interface.

The ADXL345 is well suited for mobile device applications. It measures the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion or shock. Its high resolution (3.9 mg/LSB) enables measurement of inclination changes less than 1.0° .

Several special sensing functions are provided. Activity and inactivity sensing detect the presence or lack of motion by comparing the acceleration on any axis with user-set thresholds. Tap sensing detects single and double taps in any direction. Free-fall sensing detects if the device is falling. These functions can be mapped individually to either of two interrupt output pins. An integrated memory management system with a 32-level first in, first out (FIFO) buffer can be used to store data to minimize host processor activity and lower overall system power consumption.

Low power modes enable intelligent motion-based power management with threshold sensing and active acceleration measurement at extremely low power dissipation.

The ADXL345 is supplied in a small, thin, 3 mm \times 5 mm \times 1 mm, 14-lead, plastic package.

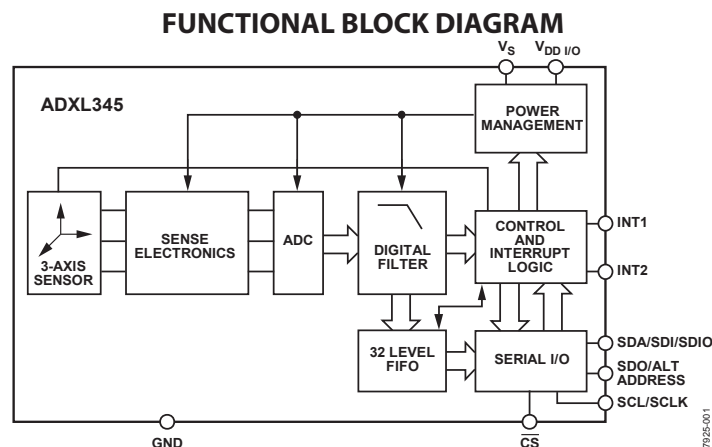


Figure 1.

Rev. E

Document Feedback

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.

SPECIFICATIONS

T_A = 25°C, V_S = 2.5 V, V_{DD I/O} = 1.8 V, acceleration = 0 g, C_S = 10 μF tantalum, C_{I/O} = 0.1 μF, output data rate (ODR) = 800 Hz, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Test Conditions	Min	Typ ¹	Max	Unit
SENSOR INPUT	Each axis				
Measurement Range	User selectable		±2, ±4, ±8, ±16		g
Nonlinearity	Percentage of full scale		±0.5		%
Inter-Axis Alignment Error			±0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ²			±1		%
OUTPUT RESOLUTION	Each axis				
All g Ranges	10-bit resolution		10		Bits
±2 g Range	Full resolution		10		Bits
±4 g Range	Full resolution		11		Bits
±8 g Range	Full resolution		12		Bits
±16 g Range	Full resolution		13		Bits
SENSITIVITY	Each axis				
Sensitivity at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	All g-ranges, full resolution	230	256	282	LSB/g
	±2 g, 10-bit resolution	230	256	282	LSB/g
	±4 g, 10-bit resolution	115	128	141	LSB/g
	±8 g, 10-bit resolution	57	64	71	LSB/g
	±16 g, 10-bit resolution	29	32	35	LSB/g
Sensitivity Deviation from Ideal	All g-ranges		±1.0		%
Scale Factor at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	All g-ranges, full resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	±2 g, 10-bit resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	±4 g, 10-bit resolution	7.1	7.8	8.7	mg/LSB
	±8 g, 10-bit resolution	14.1	15.6	17.5	mg/LSB
	±16 g, 10-bit resolution	28.6	31.2	34.5	mg/LSB
Sensitivity Change Due to Temperature			±0.01		%/°C
0 g OFFSET	Each axis				
0 g Output for X _{OUT} , Y _{OUT}		-150	0	+150	mg
0 g Output for Z _{OUT}		-250	0	+250	mg
0 g Output Deviation from Ideal, X _{OUT} , Y _{OUT}			±35		mg
0 g Output Deviation from Ideal, Z _{OUT}			±40		mg
0 g Offset vs. Temperature for X-, Y-Axes			±0.4		mg/°C
0 g Offset vs. Temperature for Z-Axis			±1.2		mg/°C
NOISE					
X-, Y-Axes	ODR = 100 Hz for ±2 g, 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution		0.75		LSB rms
Z-Axis	ODR = 100 Hz for ±2 g, 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution		1.1		LSB rms
OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH	User selectable				
Output Data Rate (ODR) ^{3,4,5}		0.1		3200	Hz
SELF-TEST ⁶					
Output Change in X-Axis		0.20		2.10	g
Output Change in Y-Axis		-2.10		-0.20	g
Output Change in Z-Axis		0.30		3.40	g
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range (V _S)		2.0	2.5	3.6	V
Interface Voltage Range (V _{DD I/O})		1.7	1.8	V _S	V
Supply Current	ODR ≥ 100 Hz		140		μA
	ODR < 10 Hz		30		μA
Standby Mode Leakage Current			0.1		μA
Turn-On and Wake-Up Time ⁷	ODR = 3200 Hz		1.4		ms

Parameter	Test Conditions	Min	Typ ¹	Max	Unit
TEMPERATURE Operating Temperature Range		-40		+85	°C
WEIGHT Device Weight			30		mg

¹ The typical specifications shown are for at least 68% of the population of parts and are based on the worst case of mean $\pm 1 \sigma$, except for 0 g output and sensitivity, which represents the target value. For 0 g offset and sensitivity, the deviation from the ideal describes the worst case of mean $\pm 1 \sigma$.

² Cross-axis sensitivity is defined as coupling between any two axes.

³ Bandwidth is the -3 dB frequency and is half the output data rate, bandwidth = ODR/2.

⁴ The output format for the 3200 Hz and 1600 Hz ODRs is different than the output format for the remaining ODRs. This difference is described in the Data Formatting of Upper Data Rates section.

⁵ Output data rates below 6.25 Hz exhibit additional offset shift with increased temperature, depending on selected output data rate. Refer to the Offset Performance at Lowest Data Rates section for details.

⁶ Self-test change is defined as the output (g) when the SELF_TEST bit = 1 (in the DATA_FORMAT register, Address 0x31) minus the output (g) when the SELF_TEST bit = 0. Due to device filtering, the output reaches its final value after $4 \times \tau$ when enabling or disabling self-test, where $\tau = 1/(\text{data rate})$. The part must be in normal power operation (LOW_POWER bit = 0 in the BW_RATE register, Address 0x2C) for self-test to operate correctly.

⁷ Turn-on and wake-up times are determined by the user-defined bandwidth. At a 100 Hz data rate, the turn-on and wake-up times are each approximately 11.1 ms. For other data rates, the turn-on and wake-up times are each approximately $\tau + 1.1$ in milliseconds, where $\tau = 1/(\text{data rate})$.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

Parameter	Rating
Acceleration	
Any Axis, Unpowered	10,000 g
Any Axis, Powered	10,000 g
V _S	-0.3 V to +3.9 V
V _{DD I/O}	-0.3 V to +3.9 V
Digital Pins	-0.3 V to V _{DD I/O} + 0.3 V or 3.9 V, whichever is less
All Other Pins	-0.3 V to +3.9 V
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Ground)	Indefinite
Temperature Range	
Powered	-40°C to +105°C
Storage	-40°C to +105°C

Stresses at or above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the product. This is a stress rating only; functional operation of the product at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Operation beyond the maximum operating conditions for extended periods may affect product reliability.

THERMAL RESISTANCE

Table 3. Package Characteristics

Package Type	θ _{JA}	θ _{JC}	Device Weight
14-Terminal LGA	150°C/W	85°C/W	30 mg

PACKAGE INFORMATION

The information in Figure 2 and Table 4 provide details about the package branding for the ADXL345. For a complete listing of product availability, see the Ordering Guide section.



Figure 2. Product Information on Package (Top View)

Table 4. Package Branding Information

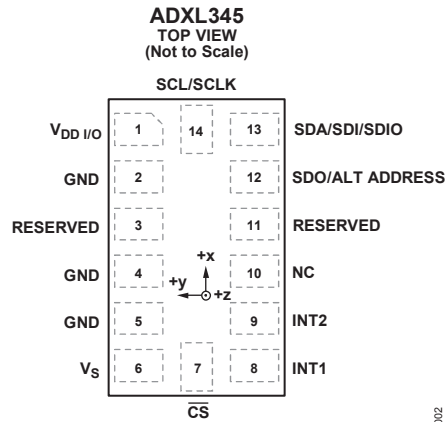
Branding Key	Field Description
345B	Part identifier for ADXL345
#	RoHS-compliant designation
yww	Date code
vvvv	Factory lot code
CNTY	Country of origin

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



NOTES
1. NC = NO INTERNAL CONNECTION.

Figure 3. Pin Configuration (Top View)

07925-002

Table 5. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	V _{DD I/O}	Digital Interface Supply Voltage.
2	GND	This pin must be connected to ground.
3	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to V _S or left open.
4	GND	This pin must be connected to ground.
5	GND	This pin must be connected to ground.
6	V _S	Supply Voltage.
7	$\overline{\text{CS}}$	Chip Select.
8	INT1	Interrupt 1 Output.
9	INT2	Interrupt 2 Output.
10	NC	Not Internally Connected.
11	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to ground or left open.
12	SDO/ALT ADDRESS	Serial Data Output (SPI 4-Wire)/Alternate I ² C Address Select (I ² C).
13	SDA/SDI/SDIO	Serial Data (I ² C)/Serial Data Input (SPI 4-Wire)/Serial Data Input and Output (SPI 3-Wire).
14	SCL/SCLK	Serial Communications Clock. SCL is the clock for I ² C, and SCLK is the clock for SPI.

3 Product Overview

3.1 MPU-60X0 Overview

MotionInterface™ is becoming a “must-have” function being adopted by smartphone and tablet manufacturers due to the enormous value it adds to the end user experience. In smartphones, it finds use in applications such as gesture commands for applications and phone control, enhanced gaming, augmented reality, panoramic photo capture and viewing, and pedestrian and vehicle navigation. With its ability to precisely and accurately track user motions, MotionTracking technology can convert handsets and tablets into powerful 3D intelligent devices that can be used in applications ranging from health and fitness monitoring to location-based services. Key requirements for MotionInterface enabled devices are small package size, low power consumption, high accuracy and repeatability, high shock tolerance, and application specific performance programmability – all at a low consumer price point.

The MPU-60X0 is the world’s first integrated 6-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, and a Digital Motion Processor™ (DMP) all in a small 4x4x0.9mm package. With its dedicated I²C sensor bus, it directly accepts inputs from an external 3-axis compass to provide a complete 9-axis MotionFusion™ output. The MPU-60X0 MotionTracking device, with its 6-axis integration, on-board MotionFusion™, and run-time calibration firmware, enables manufacturers to eliminate the costly and complex selection, qualification, and system level integration of discrete devices, guaranteeing optimal motion performance for consumers. The MPU-60X0 is also designed to interface with multiple non-inertial digital sensors, such as pressure sensors, on its auxiliary I²C port. The MPU-60X0 is footprint compatible with the MPU-30X0 family.

The MPU-60X0 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyroscope outputs and three 16-bit ADCs for digitizing the accelerometer outputs. For precision tracking of both fast and slow motions, the parts feature a user-programmable gyroscope full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ (dps) and a user-programmable accelerometer full-scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, and $\pm 16g$.

An on-chip 1024 Byte FIFO buffer helps lower system power consumption by allowing the system processor to read the sensor data in bursts and then enter a low-power mode as the MPU collects more data. With all the necessary on-chip processing and sensor components required to support many motion-based use cases, the MPU-60X0 uniquely enables low-power MotionInterface applications in portable applications with reduced processing requirements for the system processor. By providing an integrated MotionFusion output, the DMP in the MPU-60X0 offloads the intensive MotionProcessing computation requirements from the system processor, minimizing the need for frequent polling of the motion sensor output.

Communication with all registers of the device is performed using either I²C at 400kHz or SPI at 1MHz (MPU-6000 only). For applications requiring faster communications, the sensor and interrupt registers may be read using SPI at 20MHz (MPU-6000 only). Additional features include an embedded temperature sensor and an on-chip oscillator with $\pm 1\%$ variation over the operating temperature range.

By leveraging its patented and volume-proven Nasiri-Fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the MPU-60X0 package size down to a revolutionary footprint of 4x4x0.9mm (QFN), while providing the highest performance, lowest noise, and the lowest cost semiconductor packaging required for handheld consumer electronic devices. The part features a robust 10,000g shock tolerance, and has programmable low-pass filters for the gyroscopes, accelerometers, and the on-chip temperature sensor.

For power supply flexibility, the MPU-60X0 operates from VDD power supply voltage range of 2.375V-3.46V. Additionally, the MPU-6050 provides a VLOGIC reference pin (in addition to its analog supply pin: VDD), which sets the logic levels of its I²C interface. The VLOGIC voltage may be $1.8V \pm 5\%$ or VDD.

The MPU-6000 and MPU-6050 are identical, except that the MPU-6050 supports the I²C serial interface only, and has a separate VLOGIC reference pin. The MPU-6000 supports both I²C and SPI interfaces and has a single supply pin, VDD, which is both the device’s logic reference supply and the analog supply for the part. The table below outlines these differences:

5 Features

5.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- External sync signal connected to the FSYNC pin supports image, video and GPS synchronization
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of gyros
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Improved low-frequency noise performance
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.6mA
- Standby current: 5 μ A
- Factory calibrated sensitivity scale factor
- User self-test

5.2 Accelerometer Features

The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ and $\pm 16g$
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of accelerometers while requiring no external multiplexer
- Accelerometer normal operating current: 500 μ A
- Low power accelerometer mode current: 10 μ A at 1.25Hz, 20 μ A at 5Hz, 60 μ A at 20Hz, 110 μ A at 40Hz
- Orientation detection and signaling
- Tap detection
- User-programmable interrupts
- High-G interrupt
- User self-test

5.3 Additional Features

The MPU-60X0 includes the following additional features:

- 9-Axis MotionFusion by the on-chip Digital Motion Processor (DMP)
- Auxiliary master I²C bus for reading data from external sensors (e.g., magnetometer)
- 3.9mA operating current when all 6 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.375V-3.46V
- Flexible VLOGIC reference voltage supports multiple I²C interface voltages (MPU-6050 only)
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 4x4x0.9mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer and gyroscope axes
- 1024 byte FIFO buffer reduces power consumption by allowing host processor to read the data in bursts and then go into a low-power mode as the MPU collects more data
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 g shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I²C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers (MPU-6000 only)
- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers (MPU-6000 only)



- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

5.4 MotionProcessing

- Internal Digital Motion Processing™ (DMP™) engine supports 3D MotionProcessing and gesture recognition algorithms
- The MPU-60X0 collects gyroscope and accelerometer data while synchronizing data sampling at a user defined rate. The total dataset obtained by the MPU-60X0 includes 3-Axis gyroscope data, 3-Axis accelerometer data, and temperature data. The MPU's calculated output to the system processor can also include heading data from a digital 3-axis third party magnetometer.
- The FIFO buffers the complete data set, reducing timing requirements on the system processor by allowing the processor burst read the FIFO data. After burst reading the FIFO data, the system processor can save power by entering a low-power sleep mode while the MPU collects more data.
- Programmable interrupt supports features such as gesture recognition, panning, zooming, scrolling, tap detection, and shake detection
- Digitally-programmable low-pass filters
- Low-power pedometer functionality allows the host processor to sleep while the DMP maintains the step count.

5.5 Clocking

- On-chip timing generator $\pm 1\%$ frequency variation over full temperature range
- Optional external clock inputs of 32.768kHz or 19.2MHz



6 Electrical Characteristics

6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY						
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s	
	FS_SEL=1		±500		°/s	
	FS_SEL=2		±1000		°/s	
	FS_SEL=3		±2000		°/s	
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)	
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-3		+3	%	
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			±2		%	
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)						
Initial ZRO Tolerance	25°C		±20		°/s	
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±20		°/s	
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		°/s/g	
SELF-TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	1
GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE	FS_SEL=0					
Total RMS Noise	DLPCFG=2 (100Hz)		0.05		°/s-rms	
Low-frequency RMS noise	Bandwidth 1Hz to10Hz		0.033		°/s-rms	
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.005		°/s/√Hz	
GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES						
X-Axis		30	33	36	kHz	
Y-Axis		27	30	33	kHz	
Z-Axis		24	27	30	kHz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		256	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable	4		8,000	Hz	
GYROSCOPE START-UP TIME	DLPCFG=0					
ZRO Settling (from power-on)	to ±1°/s of Final		30		ms	

1. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*



6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35			
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
SELF TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		μg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		260	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*



6.3 Electrical and Other Common Specifications

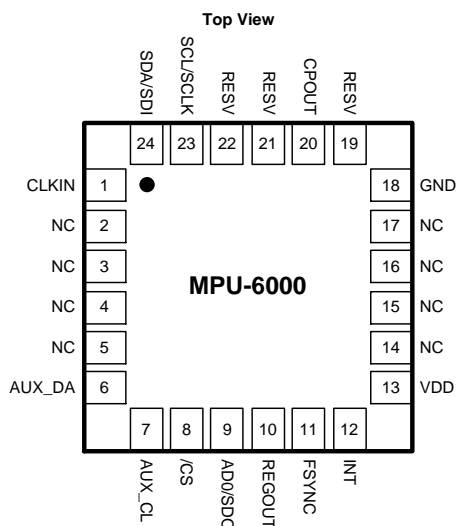
VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
TEMPERATURE SENSOR						
Range			-40 to +85		°C	
Sensitivity	Untrimmed		340		LSB/°C	
Temperature Offset	35°C		-521		LSB	
Linearity	Best fit straight line (-40°C to +85°C)		±1		°C	
VDD POWER SUPPLY						
Operating Voltages		2.375		3.46	V	
Normal Operating Current	Gyroscope + Accelerometer + DMP		3.9		mA	
	Gyroscope + Accelerometer (DMP disabled)		3.8		mA	
	Gyroscope + DMP (Accelerometer disabled)		3.7		mA	
	Gyroscope only (DMP & Accelerometer disabled)		3.6		mA	
	Accelerometer only (DMP & Gyroscope disabled)		500		µA	
Accelerometer Low Power Mode Current	1.25 Hz update rate		10		µA	
	5 Hz update rate		20		µA	
	20 Hz update rate		70		µA	
	40 Hz update rate		140		µA	
Full-Chip Idle Mode Supply Current			5		µA	
Power Supply Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value			100	ms	
VLOGIC REFERENCE VOLTAGE						
Voltage Range	MPU-6050 only	1.71		VDD	V	
Power Supply Ramp Rate	VLOGIC must be ≤VDD at all times			3	ms	
Normal Operating Current	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value		100		µA	
TEMPERATURE RANGE						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	°C	

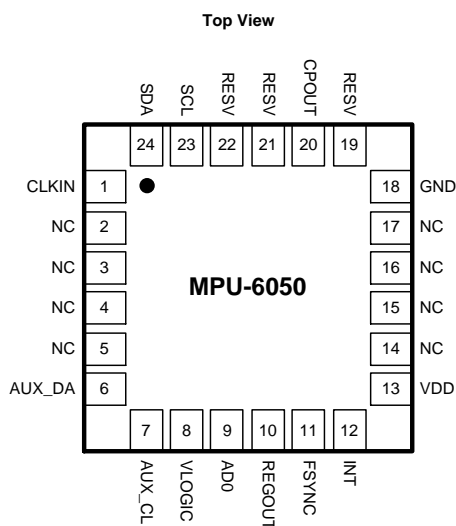
7 Applications Information

7.1 Pin Out and Signal Description

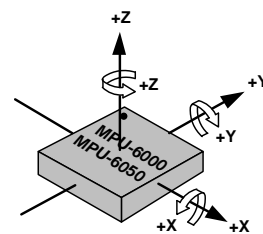
Pin Number	MPU-6000	MPU-6050	Pin Name	Pin Description
1	Y	Y	CLKIN	Optional external reference clock input. Connect to GND if unused.
6	Y	Y	AUX_DA	I ² C master serial data, for connecting to external sensors
7	Y	Y	AUX_CL	I ² C Master serial clock, for connecting to external sensors
8	Y		/CS	SPI chip select (0=SPI mode)
8		Y	VLOGIC	Digital I/O supply voltage
9	Y		AD0 / SDO	I ² C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
9		Y	AD0	I ² C Slave Address LSB (AD0)
10	Y	Y	REGOUT	Regulator filter capacitor connection
11	Y	Y	FSYNC	Frame synchronization digital input. Connect to GND if unused.
12	Y	Y	INT	Interrupt digital output (totem pole or open-drain)
13	Y	Y	VDD	Power supply voltage and Digital I/O supply voltage
18	Y	Y	GND	Power supply ground
19, 21	Y	Y	RESV	Reserved. Do not connect.
20	Y	Y	CPOUT	Charge pump capacitor connection
22	Y	Y	RESV	Reserved. Do not connect.
23	Y		SCL / SCLK	I ² C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
23		Y	SCL	I ² C serial clock (SCL)
24	Y		SDA / SDI	I ² C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)
24		Y	SDA	I ² C serial data (SDA)
2, 3, 4, 5, 14, 15, 16, 17	Y	Y	NC	Not internally connected. May be used for PCB trace routing.



QFN Package
24-pin, 4mm x 4mm x 0.9mm

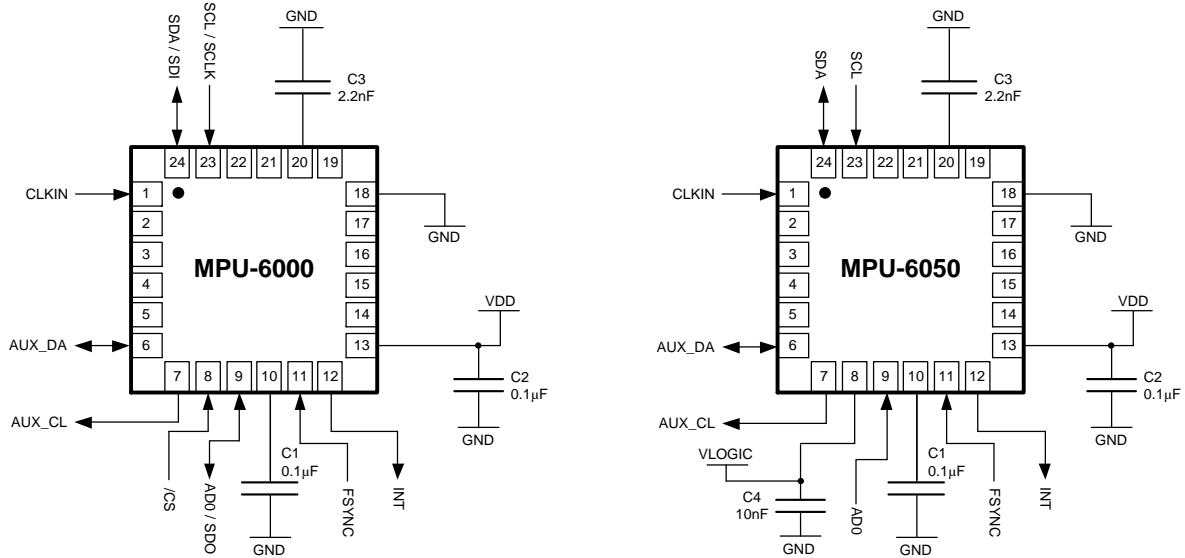


QFN Package
24-pin, 4mm x 4mm x 0.9mm



Orientation of Axes of Sensitivity and
Polarity of Rotation

7.2 Typical Operating Circuit



Typical Operating Circuits

7.3 Bill of Materials for External Components

Component	Label	Specification	Quantity
Regulator Filter Capacitor (Pin 10)	C1	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 2V	1
VDD Bypass Capacitor (Pin 13)	C2	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 4V	1
Charge Pump Capacitor (Pin 20)	C3	Ceramic, X7R, 2.2nF ±10%, 50V	1
VLOGIC Bypass Capacitor (Pin 8)	C4*	Ceramic, X7R, 10nF ±10%, 4V	1

* MPU-6050 Only.

1.2 Purpose and Scope

This document provides a description, specifications, and design related information on the MPU-9250 MotionTracking device. The device is housed in a small 3x3x1mm QFN package.

Specifications are subject to change without notice. Final specifications will be updated based upon characterization of production silicon. For references to register map and descriptions of individual registers, please refer to the MPU-9250 Register Map and Register Descriptions document.

1.3 Product Overview

MPU-9250 is a multi-chip module (MCM) consisting of two dies integrated into a single QFN package. One die houses the 3-Axis gyroscope and the 3-Axis accelerometer. The other die houses the AK8963 3-Axis magnetometer from Asahi Kasei Microdevices Corporation. Hence, the MPU-9250 is a 9-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, 3-axis magnetometer and a Digital Motion Processor™ (DMP) all in a small 3x3x1mm package available as a pin-compatible upgrade from the MPU-6515. With its dedicated I²C sensor bus, the MPU-9250 directly provides complete 9-axis MotionFusion™ output. The MPU-9250 MotionTracking device, with its 9-axis integration, on-chip MotionFusion™, and run-time calibration firmware, enables manufacturers to eliminate the costly and complex selection, qualification, and system level integration of discrete devices, guaranteeing optimal motion performance for consumers. MPU-9250 is also designed to interface with multiple non-inertial digital sensors, such as pressure sensors, on its auxiliary I²C port.

MPU-9250 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyroscope outputs, three 16-bit ADCs for digitizing the accelerometer outputs, and three 16-bit ADCs for digitizing the magnetometer outputs. For precision tracking of both fast and slow motions, the parts feature a user-programmable gyroscope full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ (dps), a user-programmable accelerometer full-scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, and $\pm 16g$, and a magnetometer full-scale range of $\pm 4800\mu\text{T}$.

Other industry-leading features include programmable digital filters, a precision clock with 1% drift from -40°C to 85°C , an embedded temperature sensor, and programmable interrupts. The device features I²C and SPI serial interfaces, a VDD operating range of 2.4V to 3.6V, and a separate digital IO supply, VDDIO from 1.71V to VDD.

Communication with all registers of the device is performed using either I²C at 400kHz or SPI at 1MHz. For applications requiring faster communications, the sensor and interrupt registers may be read using SPI at 20MHz.

By leveraging its patented and volume-proven CMOS-MEMS fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the package size down to a footprint and thickness of 3x3x1mm, to provide a very small yet high performance low cost package. The device provides high robustness by supporting 10,000g shock reliability.

1.4 Applications

- Location based services, points of interest, and dead reckoning
- Handset and portable gaming
- Motion-based game controllers
- 3D remote controls for Internet connected DTVs and set top boxes, 3D mice
- Wearable sensors for health, fitness and sports

2 Features

2.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-9250 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ and integrated 16-bit ADCs
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.2mA
- Sleep mode current: $8\mu\text{A}$
- Factory calibrated sensitivity scale factor
- Self-test

2.2 Accelerometer Features

The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-9250 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ and $\pm 16g$ and integrated 16-bit ADCs
- Accelerometer normal operating current: $450\mu\text{A}$
- Low power accelerometer mode current: $8.4\mu\text{A}$ at 0.98Hz, $19.8\mu\text{A}$ at 31.25Hz
- Sleep mode current: $8\mu\text{A}$
- User-programmable interrupts
- Wake-on-motion interrupt for low power operation of applications processor
- Self-test

2.3 Magnetometer Features

The triple-axis MEMS magnetometer in MPU-9250 includes a wide range of features:

- 3-axis silicon monolithic Hall-effect magnetic sensor with magnetic concentrator
- Wide dynamic measurement range and high resolution with lower current consumption.
- Output data resolution of 14 bit ($0.6\mu\text{T}/\text{LSB}$)
- Full scale measurement range is $\pm 4800\mu\text{T}$
- Magnetometer normal operating current: $280\mu\text{A}$ at 8Hz repetition rate
- Self-test function with internal magnetic source to confirm magnetic sensor operation on end products

2.4 Additional Features

The MPU-9250 includes the following additional features:

- Auxiliary master I²C bus for reading data from external sensors (e.g. pressure sensor)
- 3.5mA operating current when all 9 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.4 – 3.6V
- VDDIO reference voltage for auxiliary I²C devices
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 3x3x1mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer, gyroscope and magnetometer axes
- 512 byte FIFO buffer enables the applications processor to read the data in bursts
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 g shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I²C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers

- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers
- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

2.5 MotionProcessing

- Internal Digital Motion Processing™ (DMP™) engine supports advanced MotionProcessing and low power functions such as gesture recognition using programmable interrupts
- Low-power pedometer functionality allows the host processor to sleep while the DMP maintains the step count.

3 Electrical Characteristics

3.1 Gyroscope Specifications

Typical Operating Circuit of section [4.2](#), VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s
	FS_SEL=1		±500		°/s
	FS_SEL=2		±1000		°/s
	FS_SEL=3		±2000		°/s
Gyroscope ADC Word Length			16		bits
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C		±3		%
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±4		%
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		±0.1		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Initial ZRO Tolerance	25°C		±5		°/s
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±30		°/s
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (92 Hz)		0.1		°/s-rms
Rate Noise Spectral Density			0.01		°/s/√Hz
Gyroscope Mechanical Frequencies		25	27	29	KHz
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		250	Hz
Gyroscope Startup Time	From Sleep mode		35		ms
Output Data Rate	Programmable, Normal mode	4		8000	Hz

Table 1 Gyroscope Specifications

3.2 Accelerometer Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g
	AFS_SEL=1		±4		g
	AFS_SEL=2		±8		g
	AFS_SEL=3		±16		g
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g
Initial Tolerance	Component-Level		±3		%
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C AFS_SEL=0 Component-level		±0.026		%/°C
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Zero-G Initial Calibration Tolerance	Component-level, X,Y		±60		mg
	Component-level, Z		±80		mg
Zero-G Level Change vs. Temperature	-40°C to +85°C		±1.5		mg/°C
Noise Power Spectral Density	Low noise mode		300		µg/√Hz
Total RMS Noise	DLPCFG=2 (94Hz)			8	mg-rms
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		260	Hz
Intelligence Function Increment			4		mg/LSB
Accelerometer Startup Time	From Sleep mode		20		ms
	From Cold Start, 1ms V _{DD} ramp		30		ms
Output Data Rate	Low power (duty-cycled)	0.24		500	Hz
	Duty-cycled, over temp		±15		%
	Low noise (active)	4		4000	Hz

Table 2 Accelerometer Specifications

4 Applications Information

4.1 Pin Out and Signal Description

Pin Number	Pin Name	Pin Description
1	RESV	Reserved. Connect to VDDIO.
7	AUX_CL	I ² C Master serial clock, for connecting to external sensors
8	VDDIO	Digital I/O supply voltage
9	AD0 / SDO	I ² C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
10	REGOUT	Regulator filter capacitor connection
11	FSYNC	Frame synchronization digital input. Connect to GND if unused.
12	INT	Interrupt digital output (totem pole or open-drain)
13	VDD	Power supply voltage and Digital I/O supply voltage
18	GND	Power supply ground
19	RESV	Reserved. Do not connect.
20	RESV	Reserved. Connect to GND.
21	AUX_DA	I ² C master serial data, for connecting to external sensors
22	nCS	Chip select (SPI mode only)
23	SCL / SCLK	I ² C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
24	SDA / SDI	I ² C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)
2 - 6, 14 - 17	NC	Not internally connected. May be used for PCB trace routing.

Table 9 Signal Descriptions

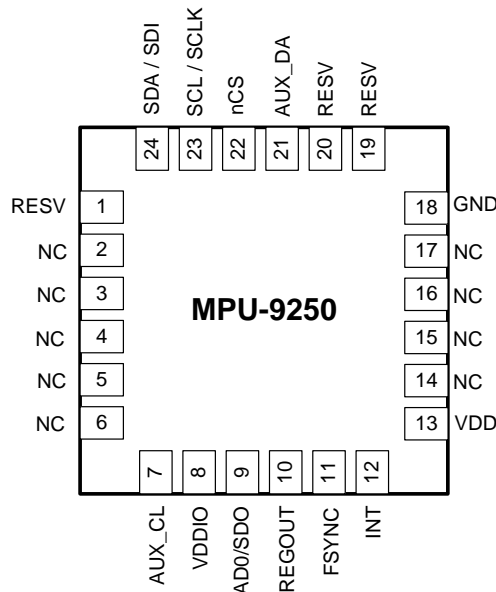


Figure 1 Pin Out Diagram for MPU-9250 3.0x3.0x1.0mm QFN

4.2 Typical Operating Circuit

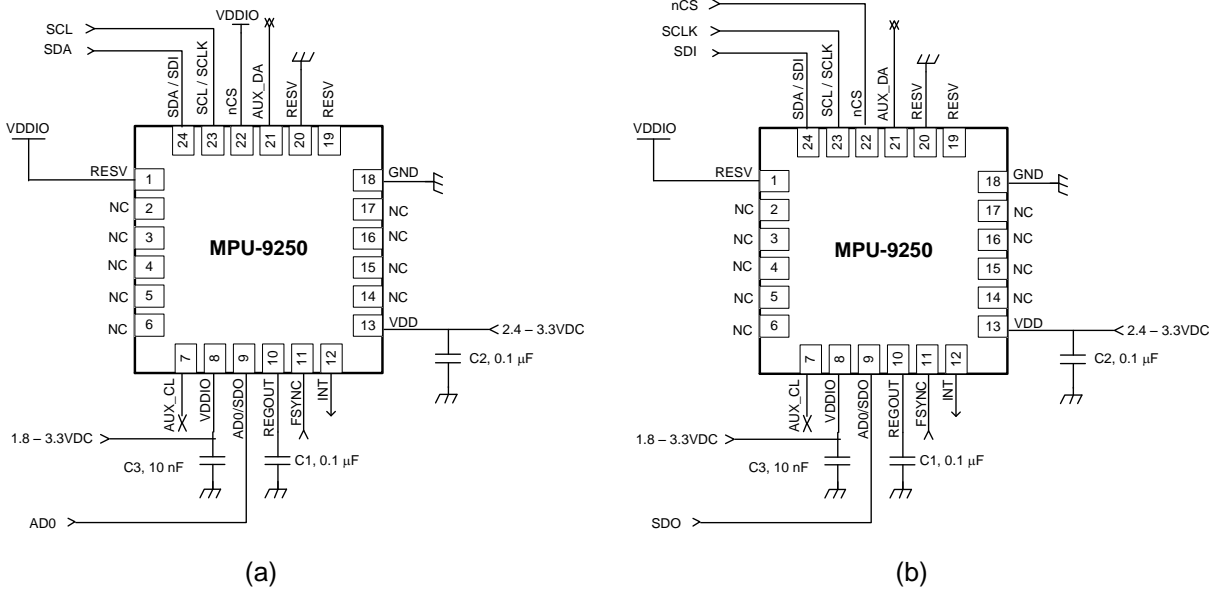


Figure 2 MPU-9250 QFN Application Schematic: (a) I2C operation, (b) SPI operation

Note that the INT pin should be connected to a GPIO pin on the system processor that is capable of waking the system processor from suspend mode.

4.3 Bill of Materials for External Components

Component	Label	Specification	Quantity
Regulator Filter Capacitor	C1	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 2V	1
VDD Bypass Capacitor	C2	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 4V	1
VDDIO Bypass Capacitor	C3	Ceramic, X7R, 10nF ±10%, 4V	1

Table 10 Bill of Materials

DS3231

Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

General Description

The DS3231 is a low-cost, extremely accurate I²C real-time clock (RTC) with an integrated temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) and crystal. The device incorporates a battery input, and maintains accurate timekeeping when main power to the device is interrupted. The integration of the crystal resonator enhances the long-term accuracy of the device as well as reduces the piece-part count in a manufacturing line. The DS3231 is available in commercial and industrial temperature ranges, and is offered in a 16-pin, 300-mil SO package.

The RTC maintains seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The date at the end of the month is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. Two programmable time-of-day alarms and a programmable square-wave output are provided. Address and data are transferred serially through an I²C bidirectional bus.

A precision temperature-compensated voltage reference and comparator circuit monitors the status of V_{CC} to detect power failures, to provide a reset output, and to automatically switch to the backup supply when necessary. Additionally, the RST pin is monitored as a pushbutton input for generating a µP reset.

Benefits and Features

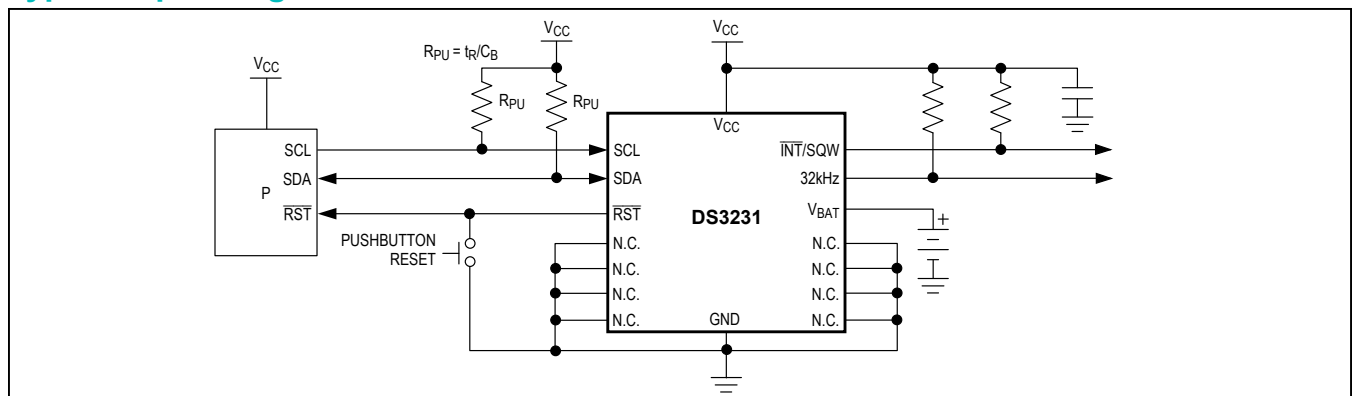
- Highly Accurate RTC Completely Manages All Timekeeping Functions
 - Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Date of the Month, Month, Day of the Week, and Year, with Leap-Year Compensation Valid Up to 2100
 - Accuracy ±2ppm from 0°C to +40°C
 - Accuracy ±3.5ppm from -40°C to +85°C
 - Digital Temp Sensor Output: ±3°C Accuracy
 - Register for Aging Trim
 - RST Output/Pushbutton Reset Debounce Input
 - Two Time-of-Day Alarms
 - Programmable Square-Wave Output Signal
- Simple Serial Interface Connects to Most Microcontrollers
 - Fast (400kHz) I²C Interface
- Battery-Backup Input for Continuous Timekeeping
 - Low Power Operation Extends Battery-Backup Run Time
 - 3.3V Operation
- Operating Temperature Ranges: Commercial (0°C to +70°C) and Industrial (-40°C to +85°C)
- Underwriters Laboratories® (UL) Recognized

Applications

- Servers
- Telematics
- Utility Power Meters
- GPS

Ordering Information and Pin Configuration appear at end of data sheet.

Typical Operating Circuit



Underwriters Laboratories is a registered certification mark of Underwriters Laboratories Inc.



Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground-0.3V to +6.0V
 Junction-to-Ambient Thermal Resistance (θ_{JA}) (Note 1)73°C/W
 Junction-to-Case Thermal Resistance (θ_{JC}) (Note 1).....23°C/W
 Operating Temperature Range
 DS3231S0°C to +70°C
 DS3231SN.....-40°C to +85°C

Junction Temperature+125°C
 Storage Temperature Range-40°C to +85°C
 Lead Temperature (soldering, 10s)+260°C
 Soldering Temperature (reflow, 2 times max)+260°C
 (see the *Handling, PCB Layout, and Assembly* section)

Note 1: Package thermal resistances were obtained using the method described in JEDEC specification JESD51-7, using a four-layer board. For detailed information on package thermal considerations, refer to www.maximintegrated.com/thermal-tutorial.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Recommended Operating Conditions

($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Notes 2, 3)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{CC}		2.3	3.3	5.5	V
	V_{BAT}		2.3	3.0	5.5	V
Logic 1 Input SDA, SCL	V_{IH}		0.7 x V_{CC}		$V_{CC} + 0.3$	V
Logic 0 Input SDA, SCL	V_{IL}		-0.3		0.3 x V_{CC}	V

Electrical Characteristics

($V_{CC} = 2.3V$ to $5.5V$, $V_{CC} =$ Active Supply (see Table 1), $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Typical values are at $V_{CC} = 3.3V$, $V_{BAT} = 3.0V$, and $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.) (Notes 2, 3)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Active Supply Current	I_{CCA}	(Notes 4, 5)	$V_{CC} = 3.63V$		200	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		300	
Standby Supply Current	I_{CCS}	I2C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off (Note 5)	$V_{CC} = 3.63V$		110	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		170	
Temperature Conversion Current	$I_{CCSCONV}$	I2C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off	$V_{CC} = 3.63V$		575	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		650	
Power-Fail Voltage	V_{PF}		2.45	2.575	2.70	V
Logic 0 Output, 32kHz, \overline{INT}/SQW , SDA	V_{OL}	$I_{OL} = 3mA$			0.4	V
Logic 0 Output, \overline{RST}	V_{OL}	$I_{OL} = 1mA$			0.4	V
Output Leakage Current 32kHz, \overline{INT}/SQW , SDA	I_{LO}	Output high impedance	-1	0	+1	μA
Input Leakage SCL	I_{LI}		-1		+1	μA
\overline{RST} Pin I/O Leakage	I_{OL}	\overline{RST} high impedance (Note 6)	-200		+10	μA
V_{BAT} Leakage Current (V_{CC} Active)	I_{BATLKG}			25	100	nA

Electrical Characteristics (continued)

($V_{CC} = 2.3V$ to $5.5V$, V_{CC} = Active Supply (see Table 1), $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Typical values are at $V_{CC} = 3.3V$, $V_{BAT} = 3.0V$, and $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.) (Notes 2, 3)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Output Frequency	f_{OUT}	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$		32.768		kHz
Frequency Stability vs. Temperature (Commercial)	$\Delta f/f_{OUT}$	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$, aging offset = 00h	$0^\circ C$ to $+40^\circ C$		± 2	ppm
			$>40^\circ C$ to $+70^\circ C$		± 3.5	
Frequency Stability vs. Temperature (Industrial)	$\Delta f/f_{OUT}$	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$, aging offset = 00h	$-40^\circ C$ to $<0^\circ C$		± 3.5	ppm
			$0^\circ C$ to $+40^\circ C$		± 2	
			$>40^\circ C$ to $+85^\circ C$		± 3.5	
Frequency Stability vs. Voltage	$\Delta f/V$			1		ppm/V
Trim Register Frequency Sensitivity per LSB	$\Delta f/LSB$	Specified at:	$-40^\circ C$		0.7	ppm
			$+25^\circ C$		0.1	
			$+70^\circ C$		0.4	
			$+85^\circ C$		0.8	
Temperature Accuracy	Temp	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$	-3		+3	$^\circ C$
Crystal Aging	$\Delta f/f_O$	After reflow, not production tested	First year		± 1.0	ppm
			0–10 years		± 5.0	

Electrical Characteristics

($V_{CC} = 0V$, $V_{BAT} = 2.3V$ to $5.5V$, $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Note 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Active Battery Current	I_{BATA}	$\overline{EOSC} = 0$, BBSQW = 0, SCL = 400kHz (Note 5)	$V_{BAT} = 3.63V$		70	μA
			$V_{BAT} = 5.5V$		150	
Timekeeping Battery Current	I_{BATT}	$\overline{EOSC} = 0$, BBSQW = 0, EN32kHz = 1, SCL = SDA = 0V or SCL = SDA = V_{BAT} (Note 5)	$V_{BAT} = 3.63V$	0.84	3.0	μA
			$V_{BAT} = 5.5V$	1.0	3.5	
Temperature Conversion Current	I_{BATTCC}	$\overline{EOSC} = 0$, BBSQW = 0, SCL = SDA = 0V or SCL = SDA = V_{BAT}	$V_{BAT} = 3.63V$		575	μA
			$V_{BAT} = 5.5V$		650	
Data-Retention Current	I_{BATTDR}	$\overline{EOSC} = 1$, SCL = SDA = 0V, $+25^\circ C$			100	nA

AC Electrical Characteristics(V_{CC} = V_{CC(MIN)} to V_{CC(MAX)} or V_{BAT} = V_{BAT(MIN)} to V_{BAT(MAX)}, V_{BAT} > V_{CC}, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.) (Note 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
SCL Clock Frequency	f _{SCL}	Fast mode	100		400	kHz
		Standard mode	0		100	
Bus Free Time Between STOP and START Conditions	t _{BUF}	Fast mode	1.3			μs
		Standard mode	4.7			
Hold Time (Repeated) START Condition (Note 7)	t _{HD:STA}	Fast mode	0.6			μs
		Standard mode	4.0			
Low Period of SCL Clock	t _{LOW}	Fast mode	1.3			μs
		Standard mode	4.7			
High Period of SCL Clock	t _{HIGH}	Fast mode	0.6			μs
		Standard mode	4.0			
Data Hold Time (Notes 8, 9)	t _{HD:DAT}	Fast mode	0		0.9	μs
		Standard mode	0		0.9	
Data Setup Time (Note 10)	t _{SU:DAT}	Fast mode	100			ns
		Standard mode	250			
START Setup Time	t _{SU:STA}	Fast mode	0.6			μs
		Standard mode	4.7			
Rise Time of Both SDA and SCL Signals (Note 11)	t _R	Fast mode	20 +		300	ns
		Standard mode	0.1C _B		1000	
Fall Time of Both SDA and SCL Signals (Note 11)	t _F	Fast mode	20 +		300	ns
		Standard mode	0.1C _B		300	
Setup Time for STOP Condition	t _{SU:STO}	Fast mode	0.6			μs
		Standard mode	4.7			
Capacitive Load for Each Bus Line	C _B	(Note 11)			400	pF
Capacitance for SDA, SCL	C _{I/O}			10		pF
Pulse Width of Spikes That Must Be Suppressed by the Input Filter	t _{SP}			30		ns
Pushbutton Debounce	PB _{DB}			250		ms
Reset Active Time	t _{RST}			250		ms
Oscillator Stop Flag (OSF) Delay	t _{OSF}	(Note 12)		100		ms
Temperature Conversion Time	t _{CONV}			125	200	ms

Power-Switch Characteristics(T_A = T_{MIN} to T_{MAX})

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
V _{CC} Fall Time; V _{PF(MAX)} to V _{PF(MIN)}	t _{VCCF}		300			μs
V _{CC} Rise Time; V _{PF(MIN)} to V _{PF(MAX)}	t _{VCCR}		0			μs
Recovery at Power-Up	t _{REC}	(Note 13)		250	300	ms

Handling, PCB Layout, and Assembly

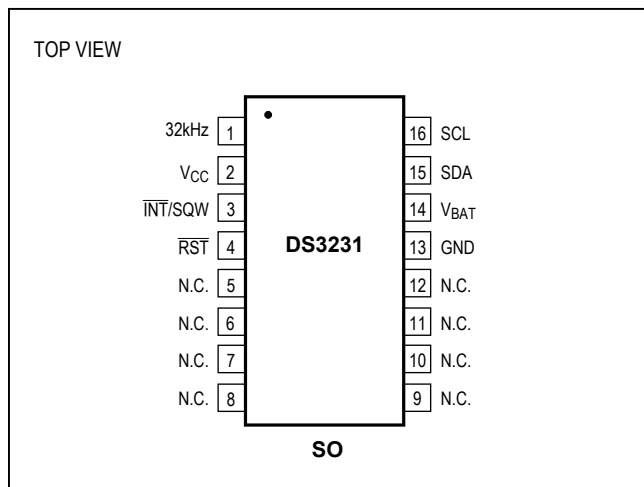
The DS3231 package contains a quartz tuning-fork crystal. Pick-and-place equipment can be used, but precautions should be taken to ensure that excessive shocks are avoided. Ultrasonic cleaning should be avoided to prevent damage to the crystal.

Avoid running signal traces under the package, unless a ground plane is placed between the package and the

signal line. All N.C. (no connect) pins must be connected to ground.

Moisture-sensitive packages are shipped from the factory dry packed. Handling instructions listed on the package label must be followed to prevent damage during reflow. Refer to the IPC/JEDEC J-STD-020 standard for moisture-sensitive device (MSD) classifications and reflow profiles. Exposure to reflow is limited to 2 times maximum.

Pin Configuration



Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
DS3231S#	0°C to +70°C	16 SO
DS3231SN#	-40°C to +85°C	16 SO

#Denotes an RoHS-compliant device that may include lead (Pb) that is exempt under RoHS requirements. The lead finish is JESD97 category e3, and is compatible with both lead-based and lead-free soldering processes. A “#” anywhere on the top mark denotes an RoHS-compliant device.

Package Information

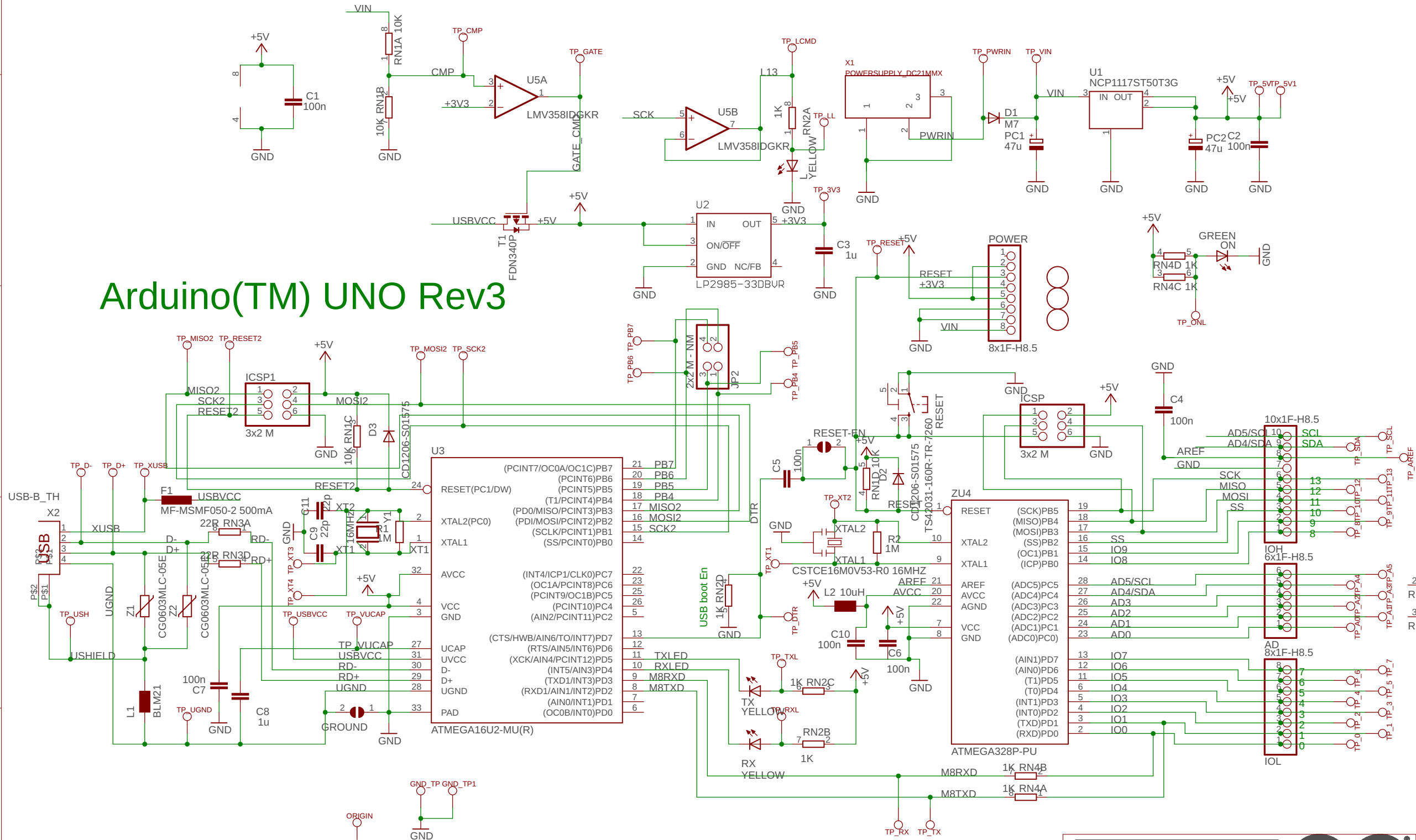
For the latest package outline information and land patterns (footprints), go to www.maximintegrated.com/packages. Note that a “+”, “#”, or “-” in the package code indicates RoHS status only. Package drawings may show a different suffix character, but the drawing pertains to the package regardless of RoHS status.

PACKAGE TYPE	PACKAGE CODE	OUTLINE NO.	LAND PATTERN NO.
16 SO	W16#H2	21-0042	90-0107

Chip Information

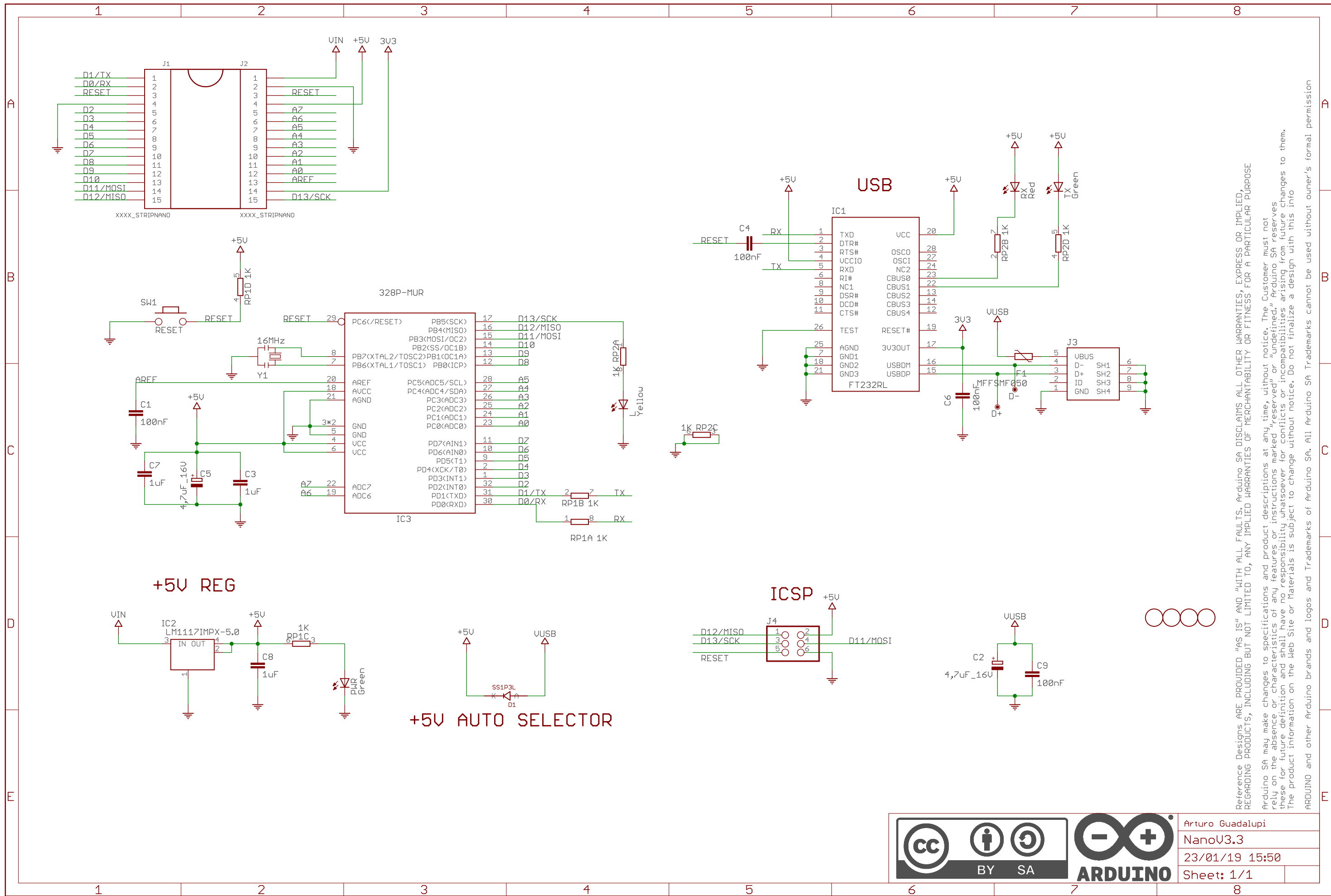
SUBSTRATE CONNECTED TO GROUND
PROCESS: CMOS

Arduino(TM) UNO Rev3



Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino SA DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino SA may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined". Arduino SA reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this info. ARDUINO and other Arduino brands and logos and Trademarks of Arduino SA. All Arduino SA Trademarks cannot be used without owner's formal permission.

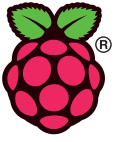




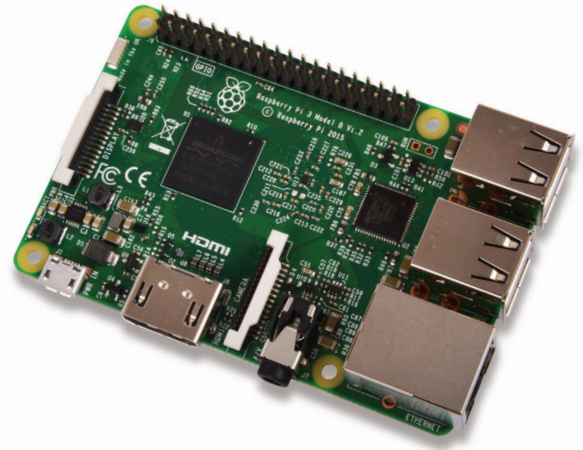
Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino SA DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE

Arduino SA may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino SA reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this info

ARDUINO and other Arduino brands and Logos and Trademarks of Arduino SA. All Arduino SA Trademarks cannot be used without owner's formal permission



Raspberry Pi

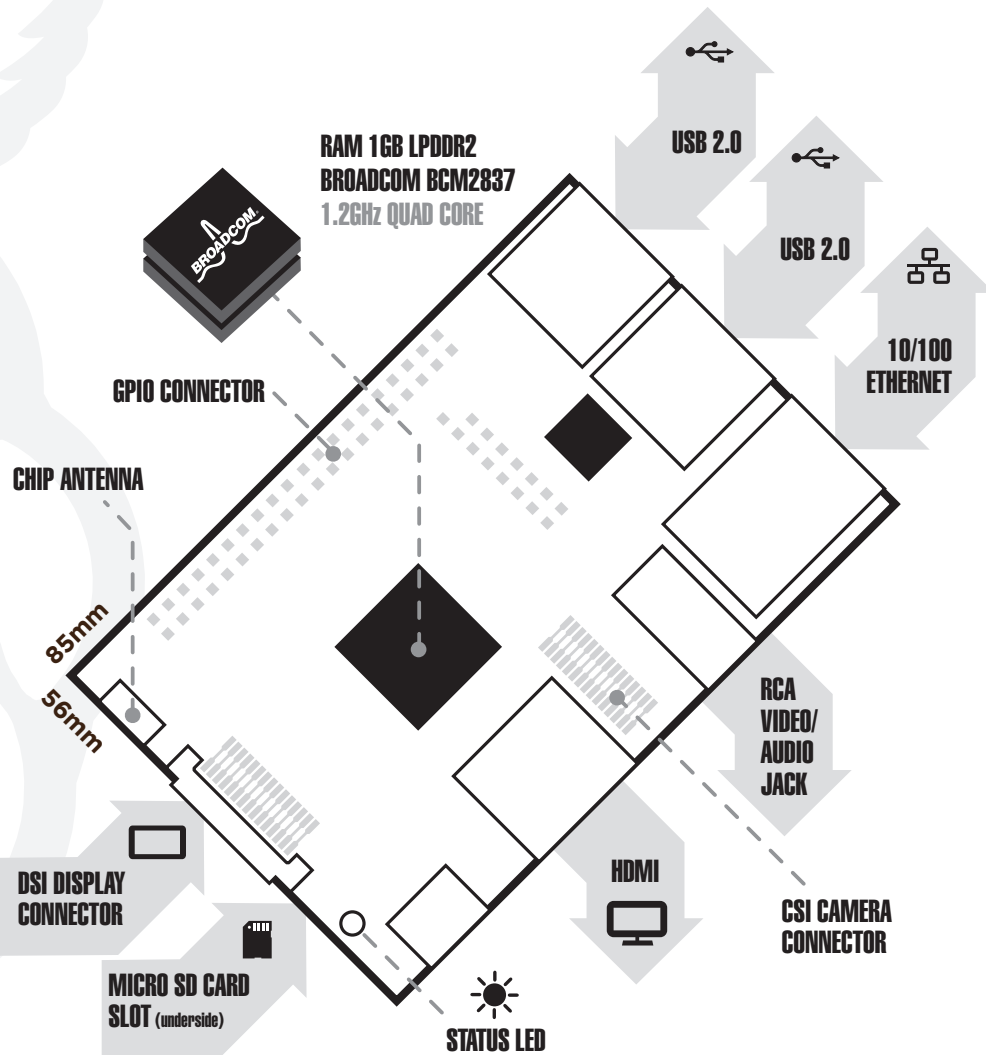


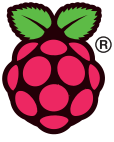
Raspberry Pi 3 Model B

Product Name Raspberry Pi 3

Product Description The Raspberry Pi 3 Model B is the third generation Raspberry Pi. This powerful credit-card sized single board computer can be used for many applications and supersedes the original Raspberry Pi Model B+ and Raspberry Pi 2 Model B. Whilst maintaining the popular board format the Raspberry Pi 3 Model B brings you a more powerful processor, 10x faster than the first generation Raspberry Pi. Additionally it adds wireless LAN & Bluetooth connectivity making it the ideal solution for powerful connected designs.

RS Part Number 896-8660





Raspberry Pi

Raspberry Pi 3 Model B

Specifications

Processor	Broadcom BCM2387 chipset. 1.2GHz Quad-Core ARM Cortex-A53 802.11 b/g/n Wireless LAN and Bluetooth 4.1 (Bluetooth Classic and LE)
GPU	Dual Core VideoCore IV® Multimedia Co-Processor. Provides Open GL ES 2.0, hardware-accelerated OpenVG, and 1080p30 H.264 high-profile decode. Capable of 1Gpixel/s, 1.5Gtexel/s or 24GFLOPs with texture filtering and DMA infrastructure
Memory	1GB LPDDR2
Operating System	Boots from Micro SD card, running a version of the Linux operating system or Windows 10 IoT
Dimensions	85 x 56 x 17mm
Power	Micro USB socket 5V1, 2.5A

Connectors:

Ethernet	10/100 BaseT Ethernet socket
Video Output	HDMI (rev 1.3 & 1.4) Composite RCA (PAL and NTSC)
Audio Output	Audio Output 3.5mm jack, HDMI USB 4 x USB 2.0 Connector
GPIO Connector	40-pin 2.54 mm (100 mil) expansion header: 2x20 strip Providing 27 GPIO pins as well as +3.3 V, +5 V and GND supply lines
Camera Connector	15-pin MIPI Camera Serial Interface (CSI-2)
Display Connector	Display Serial Interface (DSI) 15 way flat flex cable connector with two data lanes and a clock lane
Memory Card Slot	Push/pull Micro SDIO

Key Benefits

- Low cost
- 10x faster processing
- Consistent board format
- Added connectivity

Key Applications

- Low cost PC/tablet/laptop
- Media centre
- Industrial/Home automation
- Print server
- Web camera
- Wireless access point
- Environmental sensing/monitoring (e.g. weather station)
- IoT applications
- Robotics
- Server/cloud server
- Security monitoring
- Gaming



AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Diego Enrique Cárdenas Berzosa** portador de la cédula de ciudadanía N° 0105893408, y **Diego Paúl Salazar Baculima** portador de la cédula de ciudadanía N° 0106909658. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "**Construcción y Emplazamiento de un Prototipo de Sistema de Alerta Sísmica para la Universidad Católica de Cuenca**" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de junio de 2020


F:.....
Diego Enrique Cárdenas Berzosa
0105893408


F:.....
Diego Paúl Salazar Baculima
0106909658