

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO – CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN SENSOR
SÍSMICO PARA EDIFICACIONES

FRANCISCO FIDEL OLIVARI TAPIA

INFORME FINAL DEL PROYECTO
PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE
LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO

Noviembre 2017

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN SENSOR
SÍSMICO PARA EDIFICACIONES**

INFORME FINAL

Presentado en cumplimiento de los requisitos

para optar al título profesional de

Ingeniero Civil Electrónico

otorgado por la

Escuela de Ingeniería Eléctrica

de la

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Francisco Fidel Olivari Tapia

Noviembre 2017

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

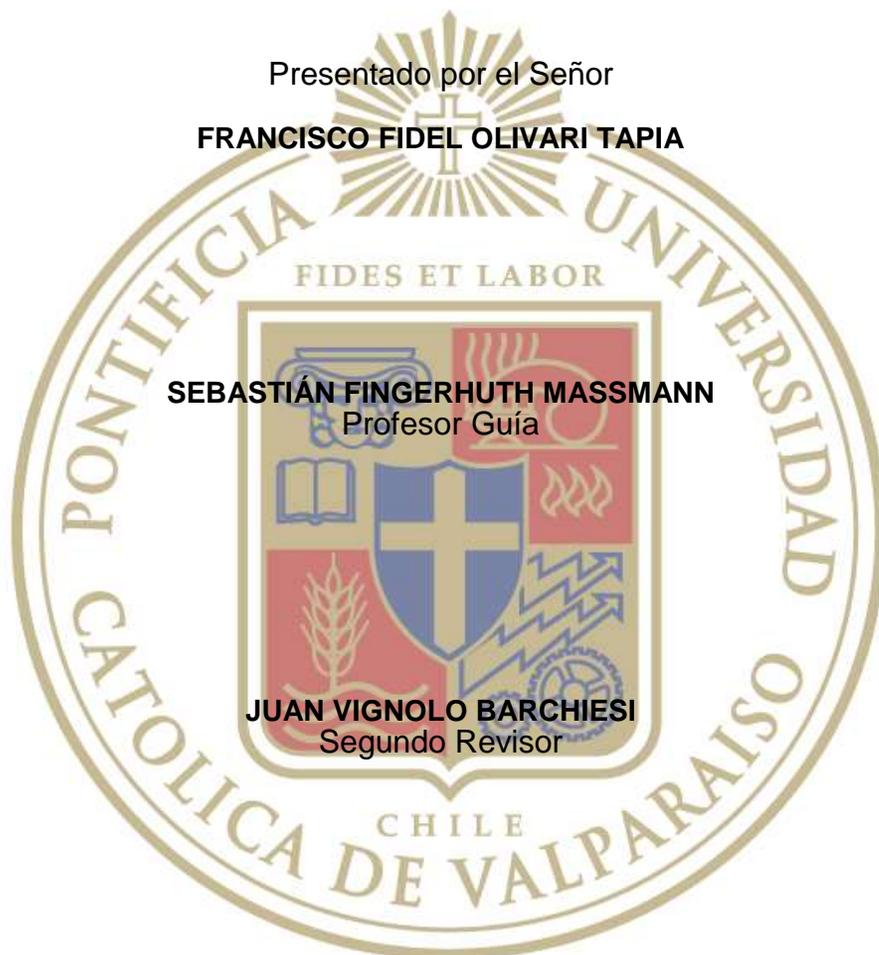
ACTA DE APROBACIÓN

La Comisión Calificadora designada por la Escuela de Ingeniería Eléctrica, ha aprobado el texto del Informe Final del Proyecto de Titulación, desarrollado durante el segundo semestre de 2010 y el primer semestre de 2011, y denominado

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE UN SENSOR
SÍSMICO PARA EDIFICACIONES**

Presentado por el Señor

FRANCISCO FIDEL OLIVARI TAPIA



SEBASTIÁN FINGERHUTH MASSMANN
Profesor Guía

JUAN VIGNOLO BARCHIESI
Segundo Revisor

JORGE MENDOZA BAEZA
Director

Valparaíso, Noviembre de 2017

A mis padres

A mi esposa

A mi hijo

A mis hermanos

A mi familia

A mis amigos...

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN SENSOR SÍSMICO PARA EDIFICACIONES

FRANCISCO FIDEL OLIVARI TAPIA

RESUMEN

Debido a la continua actividad sísmica presente en Chile, se vuelve de vital importancia el estudio del comportamiento y respuesta de las edificaciones ante la presencia de un movimiento telúrico.

Una de las formas de evaluar este comportamiento es mediante el registro de los niveles de aceleración a los que se ve sometida la estructura en sus distintos puntos de interés durante un evento sísmico. En base a la señal de aceleración se pueden determinar otros datos útiles como la velocidad y el desplazamiento de ésta, con lo que se puede obtener un modelo de la forma en que oscila, permitiendo identificar, por ejemplo, posibles fallas en el diseño de la estructura.

El trabajo desarrollado está centrado en el diseño e implementación de un sistema que permita masificar la adquisición de los datos de aceleración presentes durante la exposición de una edificación a un movimiento telúrico. Se puede describir en forma general el funcionamiento del sistema en base a sensores de aceleración que envían los datos registrados a un microcontrolador. Este se encarga de interpretar las señales enviadas por los acelerómetros y almacenar los datos en una memoria externa.

En base a los resultados obtenidos, se puede implementar un sensor sísmico de bajo costo, que permite almacenar los niveles de aceleración, pudiendo ser instalado en diferentes lugares de cualquier obra civil que se pretendan estudiar para posteriormente ser analizados.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS GENERALES	10
CAPÍTULO 1	
ACTIVIDAD SÍSMICA	12
1.1 CAUSAS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA	13
1.2 ACTIVIDAD SÍSMICA EN CHILE	16
1.2.1 Evento del 27 de Diciembre del 2010	17
1.2.2 Otros eventos registrados	19
CAPÍTULO 2	
SENSOR SÍSMICO PARA EDIFICACIONES	22
2.1 SISTEMAS ACELERÓGRAFOS ACTUALMENTE UTILIZADOS	24
2.2 NECESIDADES A CUBRIR POR EL SISTEMA	25
2.2.1 Características necesarias del sistema	26
2.2.2 Necesidad de sincronización	27
2.3 DEFINICIÓN DEL HARDWARE	28
2.3.1 Microcontrolador	29
2.3.2 Acelerómetros	31
2.3.3 Memoria de almacenamiento de datos	32
2.4 SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN	33
CAPÍTULO 3	
IMPLEMENTACIÓN FINAL DESARROLLADA	35
3.1 ETAPA INICIAL DE DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN	36
3.2 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA	37
3.2.1 Frecuencia de muestreo	39
3.3 PRUEBAS DE MEDICIÓN	42
CAPÍTULO 4	
MEJORAS A REALIZAR EN UNA PRÓXIMA ETAPA	46
4.1 PRE EVENTO	46

4.1.1 Uso de memoria RAM externa	46
4.1.2 Uso de memoria RAM interna del Microcontrolador	47
4.2 DESARROLLO DE UNA NUEVA VERSIÓN	48
CONCLUSIÓN	51
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

1-1	Capas de la Tierra.	13
1-2	Placas Tectónicas.	14
1-3	Sismicidad Mundial	16
1-4	Extracto de los registros del 27 de Febrero de 2010	20
1-5	Registro de aceleraciones, Hospital de Mejillones.	21
1-6	Registro de aceleraciones, Estación de PICA	21
2-1	Diagrama de bloques simplificado	23
2-2	Ejemplos de posibles oscilaciones de una edificación.	28
2-3	Arduino Mega	30
2-4	Acelerómetro BMA180	33
3-1	Diagrama de flujo del sistema.	40
3-2	Diagrama de bloques del sistema	41
3-3	Simulación de un evento Sísmico en la “shake table II”	42
3-4	Simulación variación de amplitud en la “shake table II”	43
3-5	Registro de la pasarela peatonal ubicada en la estación Portales del Metro Valparaíso, tramo Valparaíso-Viña del mar.	44

INTRODUCCIÓN

Chile es un país sísmico por naturaleza ya que se ubica geográficamente sobre la unión de dos placas tectónicas, las placas de Nazca y Sudamericana. Estas se encuentran en constante desplazamiento, produciendo movimientos telúricos frecuentemente. Estos movimientos en su mayoría son imperceptibles para el hombre, pero ocasionalmente, el mayor movimiento de las placas tectónicas produce una liberación brusca de energía, lo que provoca grandes sismos y en menores ocasiones grandes terremotos, como el pasado 27 de febrero del 2010, día en que la zona centro sur de Chile fue sacudida por un terremoto de 8,8 grados en la escala de Richter, ocasionando daños que ascienden a aproximadamente 30.000 millones de dólares, según declaraciones del presidente Sebastián Piñera.

Debido al constante desplazamiento de las placas tectónicas, Chile se verá permanentemente expuesto a este tipo de movimientos telúricos. Por esta razón la necesidad de estudiar el comportamiento de los suelos, edificaciones y grandes estructuras en general, se vuelve muy importante, tanto al momento de diseñar, como también para analizar la respuesta de estos ante la presencia de un movimiento sísmico.

Actualmente, en el mercado existen distintos sistemas que permiten realizar las mediciones necesarias para el registro y estudio de los eventos sísmicos, sin embargo, estos sistemas no están desarrollados para masificar las mediciones, ya que por su alto valor comercial resulta difícil y poco conveniente la instalación de una gran cantidad de sensores en una edificación en particular.

Debido a lo anterior, normalmente no se cuenta con el estudio del comportamiento y respuesta de cada obra civil en particular, lo que significa que este comportamiento generalmente se estudia en base a modelos a escala u otro tipo de modelos matemáticos.

Por esta razón, este proyecto se enfoca en el desarrollo de un sensor sísmico de bajo costo que permita masificar la adquisición de estos datos en cualquier punto de interés, especialmente en grandes estructuras o edificaciones.

OBJETIVOS GENERALES DEL PROYECTO

En base a la investigación realizada previamente, se establecen como objetivos principales para el desarrollo de este proyecto los siguientes puntos:

- Diseño e implementación de un equipo de adquisición de datos basado en acelerómetros triaxiales para instrumentación de obras civiles en general.
- Estudio y selección de los acelerómetros que cumplan con las características necesarias para registrar los posibles niveles de aceleración presentes durante el desarrollo de un evento sísmico.
- Estudio y selección del hardware adecuado para implementar un sistema capaz de registrar y almacenar las señales de aceleración presentes durante un movimiento telúrico.
- El sistema desarrollado debe considerarse de bajo costo en comparación a los sistemas actualmente utilizados, permitiendo aumentar la cantidad de sensores instalados en cada zona, incluyendo la posibilidad de su instalación en masa en una construcción en particular.
- Diseño y desarrollo de un sistema que permita a los distintos sensores mantener una sincronización al momento de capturar los datos de aceleración.

- Construcción de un sistema acelerógrafo finalizado, que pueda ser utilizado como alternativa al momento de instrumentar una obra civil con la finalidad de estudiar su comportamiento ante eventos sísmicos.

CAPÍTULO 1

ACTIVIDAD SÍSMICA

En el planeta Tierra es posible apreciar con bastante frecuencia eventos sísmicos de distintas magnitudes distribuidos alrededor de éste, pero la distribución de estos eventos no es uniforme, sino más bien se concentra en zonas específicas de la superficie terrestre. Esta continua actividad sísmica puede explicarse en base a la estructura que forma este planeta, el que está dividido en una serie de capas que en líneas generales y nombrando desde el exterior al interior, se pueden dividir en corteza, manto y núcleo, las que pueden describirse de la siguiente forma:

- **Corteza:** La corteza terrestre es la capa más superficial de la Tierra, y también la más fina con un espesor que varía de 5 km, en el fondo oceánico, hasta 50 km en las zonas montañosas de los continentes. Está dividida en grandes trozos, llamados placas tectónicas, que flotan sobre la siguiente capa de la Tierra (el manto).

- **Manto:** Se extiende desde la base de la corteza hasta una profundidad de unos 2.900 km. Es sólido en la mayoría de su extensión, excepto en la zona conocida como astenósfera. Debido a las condiciones de temperatura y presión en la astenósfera, la roca se vuelve dúctil y sus elementos se encuentran en estado fundido, moviéndose a una velocidad de deformación que se mide en [cm/año].

- **El Núcleo:** Es la capa más interior de la tierra y se caracteriza por tener una densidad muy alta. La presión en su interior es millones de veces la presión en la superficie y la temperatura puede superar los 6.700°C.

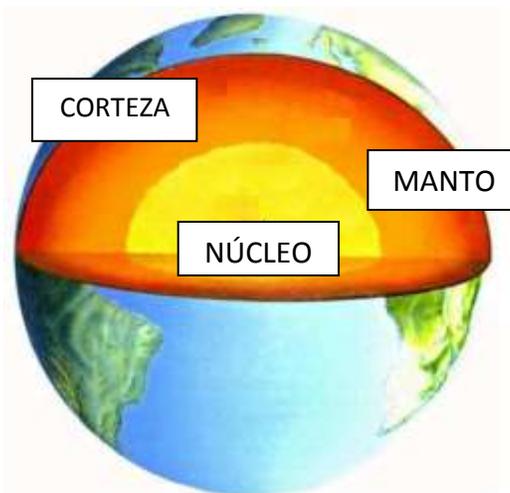


Figura 1-1 Capas de la Tierra.

En la figura 1-1 se muestra un esquema de la estructura de capas que forman la Tierra. La corteza es la capa más exterior, tiene un espesor de entre 7 y 70 [Km]. El manto tiene un espesor de unos 2900 [Km] y se ubica entre la corteza y el núcleo. El núcleo es la capa más interior de la tierra con un diámetro de unos 6400[Km] [1].

1.1 CAUSAS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA

La superficie terrestre se encuentra dividida en una serie de placas llamadas placas tectónicas, las que se encuentran en constante movimiento, deslizándose sobre el manto de la tierra. El movimiento continuo de cada una de estas placas produce que en algunas zonas choquen y en otras se separen. Este desplazamiento acumulado durante millones de años dio origen a los actuales continentes.

La magnitud del movimiento de estas placas es de unos 2,5[cm/año] aproximadamente, lo que parece ser irrelevante o imperceptible para los seres humanos, sin embargo, en los límites de cada una de las placas tectónicas, suele

acumularse una gran cantidad de energía y tensión. Cada una de las placas tectónicas tiene una dirección de desplazamiento la que puede oponerse a la dirección de la placa adyacente, causando que una se deslice sobre la otra o que ambas intenten avanzar, produciendo una acumulación de energía que en un determinado momento se libera bruscamente, ocasionando eventos sísmicos de diferentes magnitudes.

En algunos casos la acumulación de energía se desarrolla durante varias décadas, lo que al momento de la liberación se convierte en devastadores terremotos. Las mayores liberaciones de energía en forma brusca se producen en los límites entre una placa y otra, siendo la interacción entre estas la causante de la mayoría de los movimientos telúricos.

En la figura 1.2 se muestra un mapa con la actual distribución de las placas tectónicas y los límites de cada una.

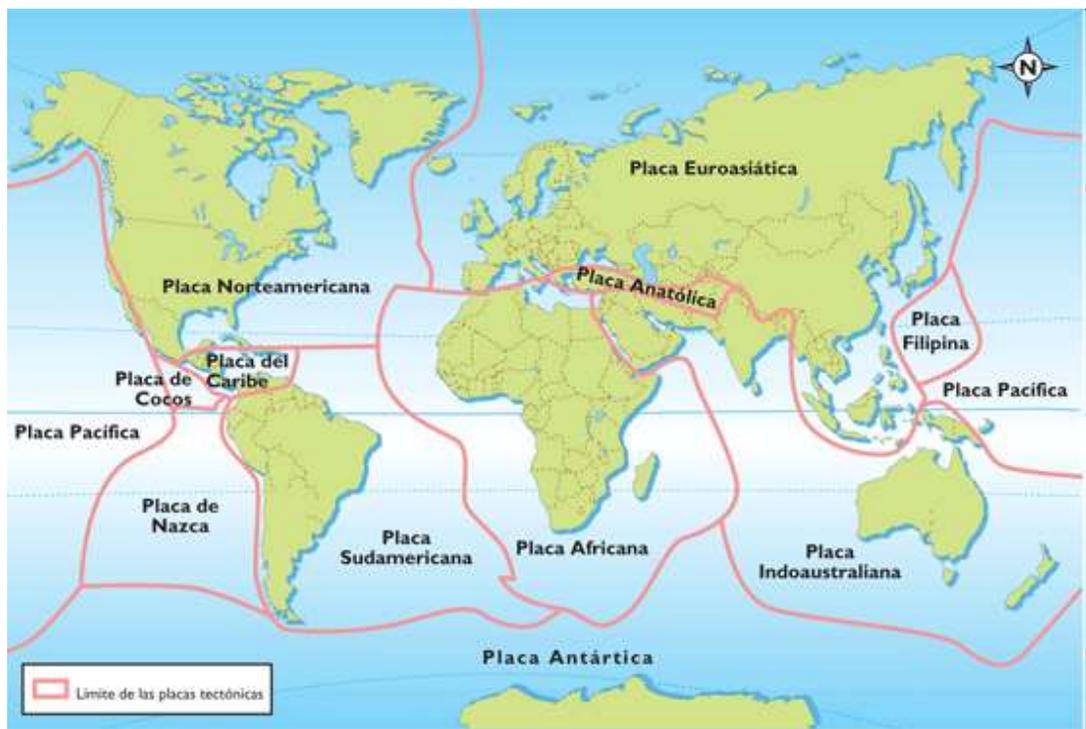


Figura 1-2 Placas tectónicas

Como se observa en la Figura 1-2, Chile se encuentra ubicado sobre la unión de dos de las placas tectónicas más importante, como son la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana, estas son dos de las placas con mayor interacción entre ellas. Es por este motivo que Chile se encuentra constantemente expuesto a eventos sísmicos.

En el caso particular de estas placas, la Placa oceánica de Nazca se desliza lentamente oponiéndose al movimiento de la Placa Sudamericana y sumergiéndose debajo de ésta, llegando cada cierto tiempo a producir un estancamiento entre ambas placas, tiempo en que la energía se acumula hasta un punto en donde se pierde el equilibrio y la energía es liberada bruscamente, desarrollando desplazamientos de gran magnitud en comparación a los movimientos normales de cada placa, resultando en eventos sísmicos importantes que afectan al país.

Las zonas con mayor sismicidad en el mundo, son las ubicadas sobre o cerca de las uniones de dos o más placas tectónicas, en base a esto se puede explicar que en algunos países la actividad sísmica es muy baja o prácticamente nula, mientras que en otros como Chile o Japón, la cantidad de eventos sísmicos que ocurren pueden contarse en varias decenas al mes.

En la figura 1-3 se puede apreciar la distribución espacial de movimientos telúricos a nivel mundial, en la que se puede observar que la distribución no es al azar, sino que sigue un patrón que concuerda con los límites de las placas tectónicas, siendo la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana una de las más activas a nivel mundial.

Por otra parte, es posible observar que en zonas como Norte América, África, el norte de Europa, el polo Norte y el polo Sur, prácticamente no presenta actividad sísmica, lo que concuerda con lo explicado anteriormente, ya que en esas zonas no se presentan interacciones entre placas tectónicas [2].

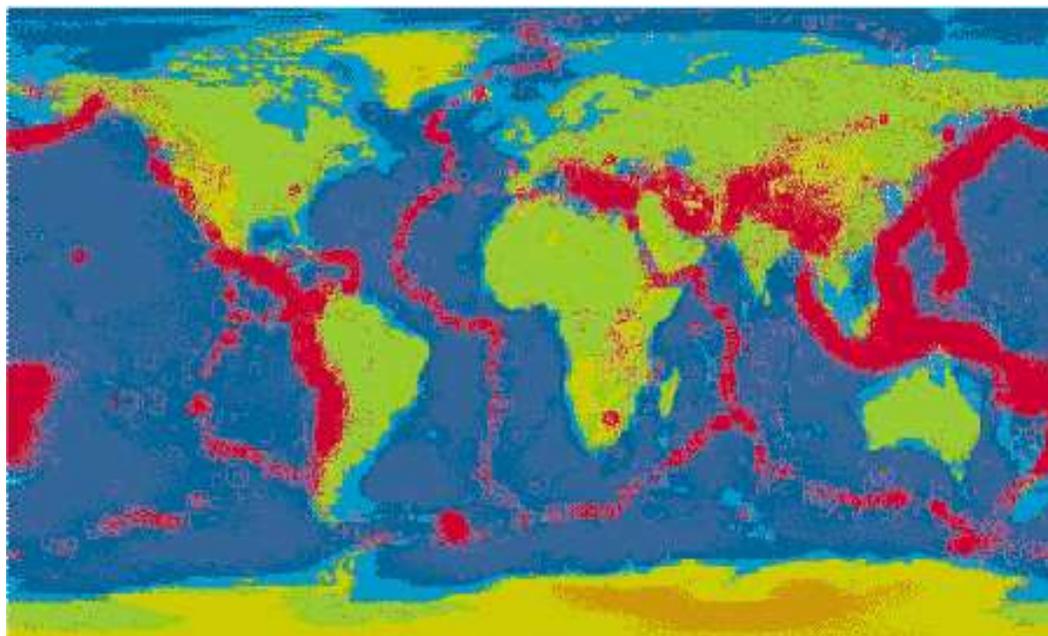


Figura 1-3 Sismicidad Mundial

1.2 ACTIVIDAD SÍSMICA EN CHILE

Debido a la constante actividad sísmica de nuestro país, surge la necesidad de registrar y analizar los eventos telúricos que se desarrollan. Para esto distintas instituciones realizan sus propias mediciones con fines investigativos.

Una de estas instituciones es la Universidad de Chile, que cuenta con una red de cobertura nacional de acelerógrafos (RENADIC), destinada a registrar eventos sísmicos de gran magnitud, para su posterior estudio.

La información generada por RENADIC es utilizada por los investigadores de la Universidad de Chile y otras universidades nacionales y extranjeras. Estas investigaciones y los datos generados han permitido el estudio de la sismogenética, micro y macro zonificación, riesgo sísmico, evaluación del daño estructural, respuesta de las obras civiles y del país ante eventos sísmicos severos.

Esta red de acelerógrafos y otras instalaciones de estudio han permitido registrar eventos mayores como los de la zona Central del 3 de Marzo de 1985 y 8 de Agosto de 1987, Punitaqui del 14 de Octubre de 1997, Maule del 27 de Febrero de 2010 entre otros eventos a nivel nacional.

1.2.1 Evento del 27 de Febrero del 2010

En relación al gran terremoto ocurrido el día 27 de febrero en la zona centro sur de Chile, la RENADIC informó lo siguiente:

“El 27 de febrero del 2010 ocurrió un terremoto de magnitud $M_w = 8,8$ en la zona centro sur de Chile afectando localidades de la V y XV Región, su epicentro fue estimado a 43 Km al sur oeste de la localidad de Cobquecura (VIII Región). Los daños y víctimas principalmente se concentraron en la zona costera de la V a la IX Región”.

“Este informe presenta los registros obtenidos por la red de acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil en estaciones localizadas entre la III a XV región que registraron el evento.

Los registros fueron obtenidos con equipos digitales Kinematics Etna, QDR, SSA-2 o K2 orientados según norte geográfico SMA-1 cuyo Azimut entre el Norte y el sentido longitudinal del equipo es conocido”.

Las aceleraciones máximas registradas son presentadas en la tabla 1-1. En ésta se indica la ubicación del sensor y el modelo de acelerógrafo utilizado para cada una de las estaciones de medición, todos estos desarrollados por Kinematics.

En la tabla 1-1:

NS: aceleración medida en dirección Norte Sur.

EW: aceleración medida en dirección Este Oeste.

Long: aceleración medida en dirección longitudinal con ángulo conocido.

Trans: aceleración medida en dirección transversal con ángulo conocido.

Localidad	Estación	Azimut	Aceleraciones máximas (g)					
			Canal 1		Canal 2		Canal 3	
Copiapó (III Región)	QDR	0	EW	0.030	NS	0.016	V	0.008
Vallenar (III Región)	QDR	0	EW	0.020	NS	0.019	V	0.010
Papudo (V Región)	SMA-1	60	Long.	0.295	V	0.155	Trans	0.421
Viña del Mar, Marga-marga (V Región)	Etna	0	NS	0.351	V	0.261	EW	0.338
Viña del Mar, Centro (3) (V Región)	QDR	0	EW	0.334	NS	0.219	V	0.186
Valparaíso, UTFSM (3) (V Región)	SMA-1	180	Long.	0.137	V	0.079	Trans.	0.304
Valparaíso, Almendral (3) (V Región)	SMA-1	310	Long.	0.224	V	0.146	Trans.	0.265
Llolleo (3) (V Región)	SMA-1	340	Long.	0.319	V	0.702	Trans.	0.564
Santiago, FCFM (1) RM	ETNA	0	EW	0.163	NS	0.165	V	0.138
Santiago, centro RM	SSA-2	270	Long.	0.218	V	0.182	Trans.	0.309
Santiago, Maipú RM	QDR	0	EW	0.478	NS	0.561	V	0.240
Santiago, Peñalolen RM	QDR	0	EW	0.293	NS	0.295	V	0.280
Santiago, Puente Alto RM	QDR	0	EW	0.263	NS	0.265	V	0.130
Santiago, La Florida RM	K2	0	NS	0.236	V	0.130	EW	0.165
Matanzas (VI Región)	SMA-1	0	Long.	0.342	V	0.234	Trans.	0.308
Hualañe (VII Región)	SMA-1	0	Long.	0.389	V	0.390	Trans.	0.461
Curico (VII Región)	QDR	150	NS	0.470	V	0.198	Trans.	0.409
Talca (VII Región)	SMA-1	0	Long.	0.477	V	0.244	Trans.	0.424
Constitución (VII Región)	SMA-1	0	Long.	0.552	V	0.352	Trans.	0.640
Concepción (VIII Región)	SMA-1	60	Long.	0.402	V	0.398	Trans.	0.284
Angol (2) (IX Región)	QDR	0	EW	0.681	NS	0.928	V	0.281
Valdivia (XV Región)	QDR	0	EW	0.138	NS	0.092	V	0.051

Tabla 1-1 Registro de aceleración máxima, entregado por la RENADIC.

“Los datos fueron procesados utilizando un procesamiento automático basado en un software apropiado. Este consiste básicamente en la corrección de

la línea de los registros y el filtrado de frecuencias altas y bajas con un filtro pasa banda de 0.15-0.25 a 23.0-25.0 Hz”.

“La aceleración más alta fue de 916 cm/seg² (0.928 g) registrada en la componente Norte Sur de la Estación Angol”.

En la Figura 1-4 se exponen parte de los gráficos expuestos en el informe de RENADIC, los que están asociados a las estaciones de medición descritas en la Tabla 1-1.

1.2.2 Otros eventos registrados

RENADIC informa para el terremoto de la zona Norte de Chile, ocurrido el 14 de Noviembre del 2007, de magnitud $M_w=7.7$ con epicentro cercano a Tocopilla, que las aceleraciones máximas registradas son del orden de 0.42 g, siendo analizados los datos en la banda de frecuencia de 0.15 a 25 [Hz]. En la Figura 1-5, se expone uno de los grafico expuestos para el evento señalado, específicamente el de mayor aceleración registrada, en el Hospital de Mejillones.

Además, en este evento la estación de “roca de Soquimich, SQM, en Tocopilla” registra aceleraciones máximas de 0.41 g. De estos datos se puede apreciar en términos generales que la duración de movimiento es de aproximadamente 150 segundos y la fase fuerte de vibración es de unos 20 segundos.

Otro de los eventos sísmicos de importancia registrados por RENADIC, es el Terremoto de Tarapacá, ocurrido el 13 de junio del 2005, con una magnitud de $M_w=7.9$ y epicentro a 41[km] al sur de la localidad de Chiapas (I región). La aceleración máxima se registró en la estación de PICA alcanzando los 0,792g en la componente vertical. En la Figura 1-6, se expone uno de los gráficos extraídos del informe emitido por RENADIC para este evento.

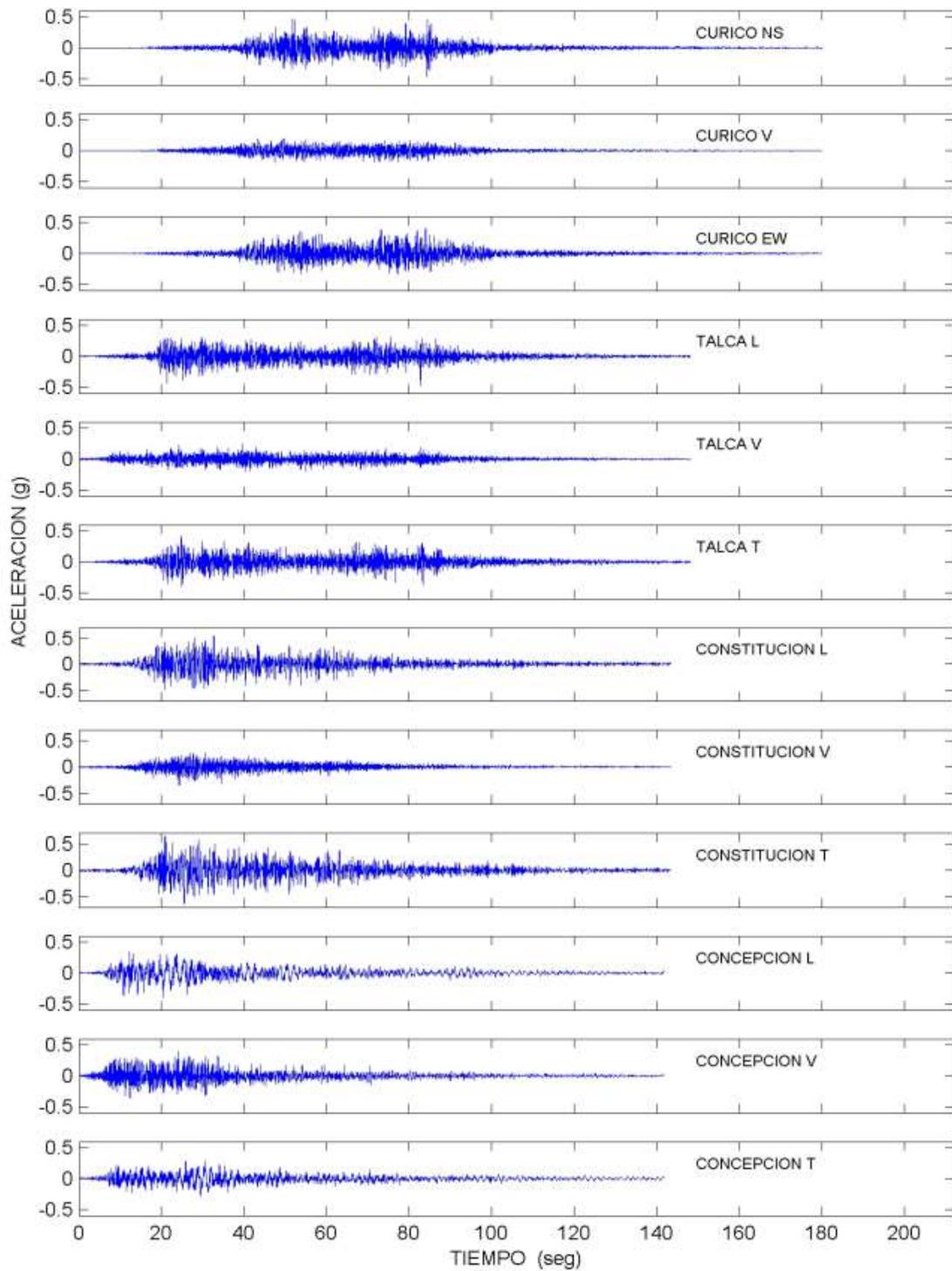


Figura 1-4 Extracto de los registros del 27 de Febrero de 2010 [3].

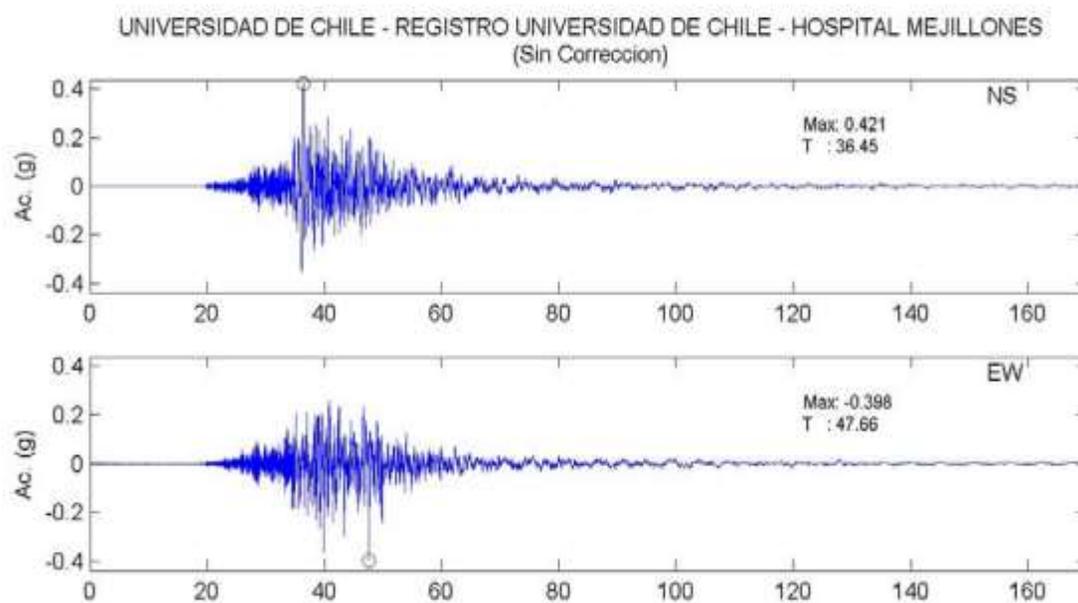


Figura 1-5 Registro de aceleraciones, Informe RENADIC, Hospital de Mejillones para el terremoto de la zona Norte de Chile, ocurrido el 14 de Noviembre del 2007 [4].

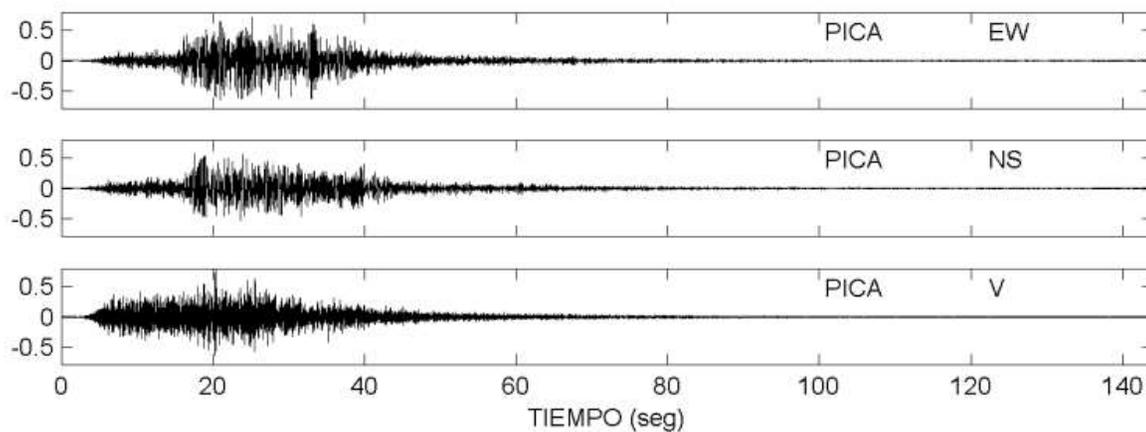


Figura 1-6 Registro de aceleraciones, Informe RENADIC, Estación de PICA, para el Terremoto de Tarapacá, ocurrido el 13 de junio del 2005 [5].

CAPÍTULO 2

SENSOR SÍSMICO PARA EDIFICACIONES

Como se muestra en el capítulo anterior, Chile está constantemente expuesto a posibles eventos sísmicos, en algunos casos de magnitudes considerables, registrándose cada cierto tiempo eventos sísmicos de gran impacto, causando en ocasiones, importantes pérdidas materiales y en los peores casos produciendo pérdidas humanas, como ocurrió con el terremoto del 27 de Febrero del 2010, en el que se contabilizan centenares de víctimas fatales.

Por todo lo anterior, es que cobra vital importancia el estudio de los eventos sísmicos. El registro y posterior análisis de cada uno de los sismos que se producen permite, entre otras cosas, la evaluación de los daños producidos por el evento, obtener la respuesta de las obras civiles y del país ante eventos sísmicos importantes, permitiendo desarrollar modelos que ayuden a la ciudadanía a estar seguros y preparados ante la eventual ocurrencia de un movimiento telúrico severo.

Es por esta razón, que el trabajo realizado se enfoca al desarrollo de un sistema capaz de adquirir los datos de aceleraciones presentes en un evento sísmico y almacenarlos en una memoria interna desde donde se puedan extraer para posteriormente ser interpretados y analizados.

El costo final del equipo desarrollado debe ser relativamente bajo, en comparación a los sistemas que existen actualmente en el mercado. Esto permitiría la instalación de un número importante de estos equipos por cada edificación que se desee estudiar, lo que significaría además conocer el comportamiento y las aceleraciones presentes a distintos niveles a lo largo, ancho y alto de las edificaciones.

Por otra parte, esta instalación en masa requiere de una sincronización de los equipos presentes en la misma estructura, que permita tener una referencia a la hora de analizar los datos.

Además, es necesario considerar la gran probabilidad de que durante un sismo de intensidad considerable, el suministro de energía eléctrica deje de funcionar por un tiempo indefinido, razón por la que el sistema debe incluir la capacidad de registrar datos en forma autónoma, basado en una fuente de alimentación propia, que permita la captura de datos en forma continua.

En la figura 2-1 se expone un diagrama de bloques simplificado en el que se muestran las principales etapas necesarias para el sistema.

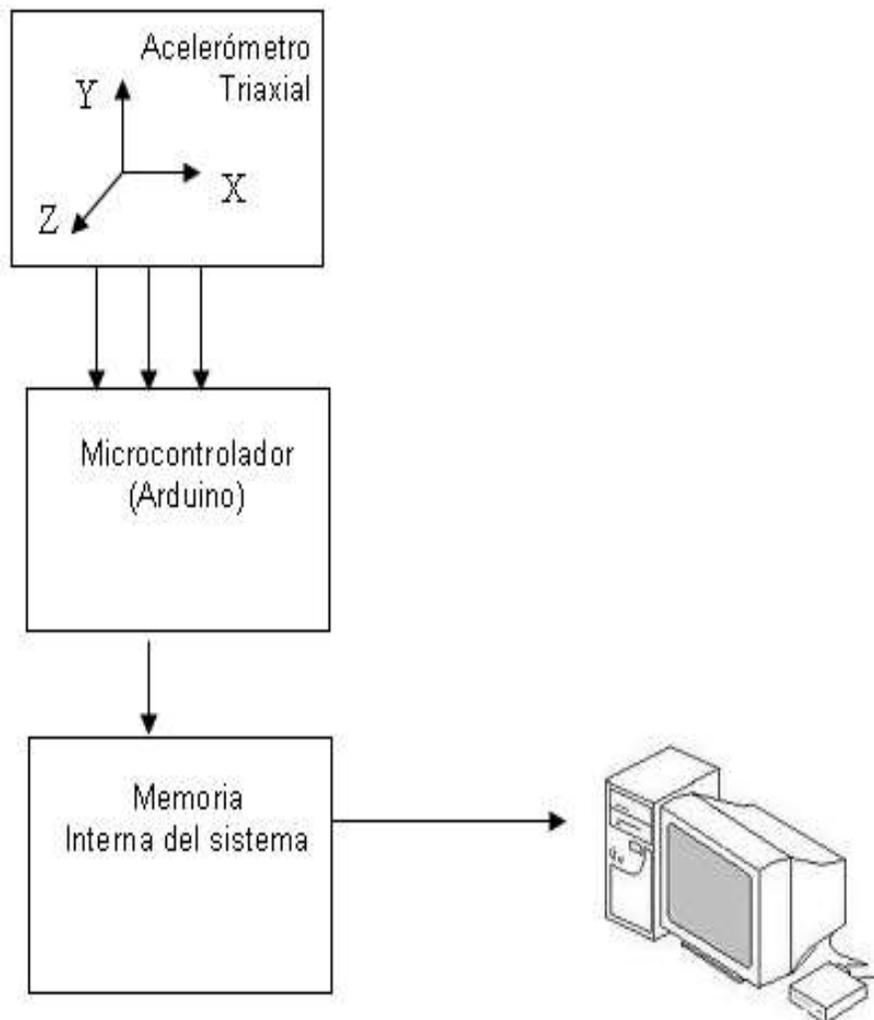


Figura 2-1 Diagrama de bloques simplificado

2.1 SISTEMAS ACELERÓGRAFOS ACTUALMENTE UTILIZADOS

En la actualidad, la mayoría los equipos utilizados para la adquisición de datos tienen costos considerables, por ejemplo para la “Red Local Edificio Cámara de Chilena de la Construcción”, perteneciente a la RENADIC, el costo al año 2005 de los equipos presentes en esta red es del orden de los US \$ 39.000. Otro ejemplo es la “Red Local Viaducto Marga-Marga (V Región)” en la que el costo de los equipos es del orden de los US \$ 73.000. En la actualidad el fabricante Kinematics ha variado los modelos y por ende, los valores actuales (2011), rondando los US \$ 3.000 la unidad [4].

Los registros obtenidos en la red nacional de acelerógrafos RENADIC, en su gran mayoría se desarrollan con sistemas del fabricante Kinematics, el que ofrece una serie de modelos y sistemas de acelerógrafos con distintas capacidades y características. De estos modelos, los más utilizados en la actualidad por RENADIC son los siguientes: Etna, QDR, SSA-2 o K2. Algunas de las características principales de estos modelos son:

- Etna: Resolución de hasta 18 BITS, frecuencia de muestreo programable de entre 80 y 200 muestras por segundo, rango de medición estándar de ± 2 [g] ($\pm 0,5$; ± 1 ; ± 4 [g] opcionales), disparo a partir de 0.1 y 12.5[Hz], ancho de banda de 200[Hz], medición en los 3 ejes del espacio, comunicación RS-232, señal de reloj en forma interna o externa vía GPS, tarjeta de memoria de 16 MB (mínimo), almacena 8 minutos por MB de memoria aproximadamente, autonomía energética de 36 horas.
- QDR: Resolución de 11 BITS, frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo, rango de medición de ± 1 [g] vertical y ± 2 [g] horizontal, disparo a partir de 1 a 10[Hz], ancho de banda de 25[Hz], medición en los 3 ejes del espacio, comunicación RS-232, señal de reloj en forma interna, almacena datos durante 15 minutos aproximadamente, no posee batería propia.

- SSA-2: Resolución de 12 BITS, frecuencia de muestreo de 200 muestras por segundo, rango de medición estándar de ± 1 [g] o ± 2 [g], disparo a partir de 1 y 10[Hz], ancho de banda de 50[Hz], medición en los 3 ejes del espacio, comunicación RS-232, señal de reloj en forma interna, almacena datos durante 20 minutos aproximadamente.
- K2: Resolución de hasta 24 BITS, frecuencia de muestreo de programable de 20 a 200 muestras por segundo, rango de medición estándar ± 2 [g] ($\pm 0,5$; ± 1 ; ± 4 [g] opcionales), disparo a partir de 0.01% a 100% del ancho de banda, ancho de banda de 80[Hz], medición en los 3 ejes del espacio, comunicación RS-232, señal de reloj en forma interna o externa vía GPS, tarjeta de memoria de 32 MB (mínimo), almacena 8 minutos por MB de memoria aproximadamente, autonomía energética de 36 horas (mínimo).

Otros países de Sudamérica y Centro América como Colombia, Argentina y también México, poseen redes de acelerógrafos basadas en los sistemas de Kinematics. La red nacional de acelerógrafos de Colombia (RNAC) se compone de 120 acelerógrafos digitales de marca Kinematics, modelos SSA-1, SSA-2, SSA-2MC, ETNA Y K2. Si bien es cierto, existen otros fabricantes de sistemas acelerógrafos, en la actualidad y al menos a nivel latinoamericano, los sistemas Kinematics son unos de los más utilizados.

2.2 NECESIDADES A CUBRIR POR EL SISTEMA

Para lograr desarrollar e implementar un sistema que resulte útil para el registro y análisis de los eventos sísmicos capaz de competir con los existentes en la actualidad en el mercado, es necesario tener en cuenta las necesidades específicas de los expertos en el estudio de estos eventos, como por ejemplo: el rango de frecuencias de interés, magnitudes de aceleración máximas a registrar,

resolución necesaria de los datos almacenados, sincronización del sistema, entre otras.

2.2.1 Características necesarias del sistema

- Los niveles de aceleración que se presentan al momento de ocurrir un evento sísmico normalmente se encuentran en el rango de los 0,5 a 1[g], pudiendo alcanzar aceleraciones máximas del orden de los 1,5[g] en las edificaciones más altas. Por esto se considera que el rango de interés al momento de registrar cualquier movimiento telúrico es de ± 2 [g].
- Debido a que los movimientos telúricos provocan desplazamientos de forma irregular, es necesario registrar los niveles de aceleración en todas las direcciones, es decir el registro de aceleraciones se debe desarrollar en los 3 ejes del espacio.
- Las frecuencias de oscilación que se provocan durante un evento sísmico, no superan los 40[Hz], desarrollándose la gran mayoría en un rango de frecuencia entre 0,15 y 25[Hz], por lo que, basados en el teorema de muestreo de Nyquist, significa que la frecuencia de muestreo mínima para el sistema es de 80 muestras por segundo.
- Para permitir un posterior análisis de los eventos, es necesario almacenar los datos registrados en una memoria, que además permita un fácil manejo de estos mediante algún software adecuado.
- Para poder competir con los sistemas que actualmente se comercializan en el mercado y obtener una mayor calidad en los datos registrados es necesario que el sistema desarrollado posea una resolución mínima de 12

BITs, teniendo en cuenta que una resolución de 12 BITs permite dividir el rango de medición en 4096 niveles, lo que en teoría permitiría representar cambios de hasta 0,001 [g] para sensores de rango ± 2 [g].

- Es necesario que el nivel del ruido presente en el sistema no signifique una pérdida de resolución del mismo, por esta razón el nivel de ruido debería ser inferior a los 0,001 [g].
- Como se pretende masificar las mediciones y registros de aceleración a lo largo de cada obra civil que se desea estudiar, es necesario un sistema de sincronización para todos los sensores instalados en una misma construcción.

En general, los parámetros nombrados anteriormente son necesarios para que el acelerógrafo sea útil y capaz de competir con los sistemas que actualmente existen en el mercado y son utilizados por las instituciones interesadas.

2.2.2 Necesidad de sincronización.

Para determinar claramente las características del movimiento, oscilación o posible torsión de una obra civil en particular, es necesaria la instalación de varios sensores distribuidos a lo largo, ancho y alto de esta, obteniendo así los registros necesarios para identificar específicamente la aceleración de cada punto de interés y en base a estos determinar el comportamiento real de la estructura sometida a un movimiento telúrico.

Además de esto, es importante mantener una sincronización entre los sensores que se encuentran adquiriendo datos en los puntos de estudio de cada estructura que se desee analizar, de esta forma se podrá determinar tanto la dirección como la aceleración de cada punto estudiado con respecto a los otros

puntos de interés, permitiendo generar un modelo del comportamiento y respuesta real de la estructura durante el desarrollo de un movimiento telúrico.

En la figura 2-2 se observa un esquema en el que se muestran 2 posibles oscilaciones de una edificación. Si los sensores instalados en una obra civil no se encuentran sincronizados, no se podría determinar de qué forma oscila al enfrentar un evento sísmico

2.3 DEFINICIÓN DEL HARDWARE

El sensor sísmico desarrollado funciona en base a sensores de aceleración, también llamados acelerómetros que pueden entregar una señal de salida tanto analógica como digital, esto debido a que algunos acelerómetros incluyen en su hardware un conversor análogo/digital. Las señales entregadas por los acelerómetros son enviadas a un microcontrolador, el que las procesa y envía los datos a una memoria en donde serán almacenados. Estos datos se escriben en la memoria en un formato simple, compatible con los softwares que existen actualmente en el mercado.

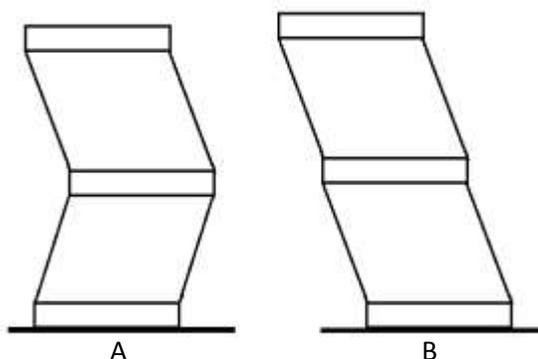


Figura 2-2 Ejemplo de posibles oscilaciones de una edificación.

2.3.1 Microcontrolador

Como cerebro del sistema se propone la utilización de la plataforma de desarrollo Arduino, que es una plataforma de código abierto, tanto para su

“software” como para su “hardware”, lo que permite que pueda utilizarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin haber adquirido ninguna licencia. Como una de las ideas principales del proyecto es la rápida implementación práctica del sistema, culminando con una primera versión de un equipo operativo, esta plataforma es una excelente alternativa debido a su fácil manipulación y principalmente a que está enfocada para comenzar a trabajar en el desarrollo de cualquier proyecto en forma práctica y rápida.

Las plataformas Arduino están basadas en los microcontroladores Atmega, además de esto, están equipadas con una serie de elementos como reguladores de voltaje, oscilador, condensadores, resistencias y todo lo necesario para programar el microcontrolador directamente. Por otra parte, el código desarrollado puede ejecutarse y grabarse en el microcontrolador sin necesidad de extraerlo del circuito o conectar un programador específico, Arduino está desarrollado para programar y ejecutar el programa con el mismo hardware.

En este proyecto se trabajó con la plataforma Arduino Mega. Este es un modelo de Arduino que está basado en el microcontrolador ATmega1280. Posee 54 entradas/salidas digitales (de éstas, 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset entre otras opciones implementadas. Además de esto, el Arduino se encuentra pre configurado para operar con los protocolos de comunicación SPI e I2C, los que están definidos por hardware en los pines del 50 al 53, para SPI y en los pines 20 y 21 para I2C, lo que permite que la comunicación por cualquiera de estos protocolos sea posible sin necesidad de cambiar los registros del microcontrolador.

Tabla 2-1 Características resumidas del Arduino Mega.

ARDUINO MEGA	
Microcontrolador	ATmega1280
Voltaje de entrada	7 a 12 [V]
Voltaje de funcionamiento	5[V]

Pines E/S digitales	54 (14 salidas PWM)
Resolución PWM	8 [BIT]
Pines de entrada analógica	16
Resolución conversor análogo digital	10 [BIT]
Intensidad por pin	40 [mA]
Intensidad en pin 3.3V	50 [mA]
Memoria Flash	128 [KB]
SRAM	8 [KB]
EEPROM	4 [KB]
Velocidad de Reloj	16 [MHz]
Puertos serie por hardware	4 UARTs
Comunicación	I2C y SPI



Figura 2-3 Arduino Mega [6]

2.3.2 Acelerómetros

Existen varias tecnologías en base a las que se desarrollan los acelerómetros actualmente presentes en el mercado. Entre las más utilizadas se encuentran las siguientes: capacitiva, piezoeléctrica, piezoresistiva, mecánica y

micromecanizada. A continuación, se expondrá en forma simple el funcionamiento de cada una de estas tecnologías:

- **Acelerómetros Capacitivos:**

Este tipo de acelerómetros está formado por una pequeña masa sísmica interna y uno o más microcapacitores que varían su capacitancia al verse sometidos a distintos niveles de aceleración, de esta forma, la variación de los capacitores internos es proporcional a la aceleración desarrollada.

- **Acelerómetros Piezoeléctricos:**

El funcionamiento de estos acelerómetros está determinado por el efecto piezoeléctrico de algunos materiales. A grandes rasgos, se puede decir que este efecto se presenta al comprimir o deformar físicamente un determinado material piezoeléctrico, lo que produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada. Por tanto, al sufrir una deformación física del material se produce un cambio en su estructura cristalina y en consecuencia cambian sus características eléctricas.

- **Acelerómetros Piezoresistivos:**

Se basan en la propiedad que tienen los materiales de cambiar su valor de resistencia eléctrica cuando el material se deforma mecánicamente. Este cambio depende del tipo de material y de cómo fue dopado. En los materiales semiconductores tipo p se incrementa la resistencia debido a la deformación mientras que en los tipos n disminuye.

Los acelerómetros piezoresistivos usan una masa suspendida por semiconductores. La masa es acelerada en dirección perpendicular a la superficie semiconductor, deformándola y cambiando así el valor de la resistencia en ella en forma proporcional a la aceleración.

- **Acelerómetros Mecánicos:**

Es el acelerómetro más simple. Se puede explicar su funcionamiento uniendo una masa a un dinamómetro cuyo eje está en la misma dirección que la aceleración que se desea medir. El movimiento de la masa permite medir, a través del dinamómetro, la fuerza a la que se ve sometido el sistema. Conociendo la fuerza y la masa se puede determinar la aceleración.

- Acelerómetros basados en Tecnología Micromecanizada (MEMS):

Sistemas Microelectromecánicos o del inglés Microelectromechanical Systems. Por lo general, estos mecanismos tienen un tamaño mayor al micrómetro y menor al milímetro. Los niveles de desarrollo de la electrónica en la actualidad permiten construir este tipo de dispositivos con dimensiones tan pequeñas pero que tienen una gran variedad de aplicaciones y utilidades.

Los acelerómetros utilizados para la implementación de este proyecto son los siguientes: ADXL322, ADXL335, MMA7631 los que entregan una salida analógica, además del ADXL345 y el BMA180, ambos con salida digital. Todos estos acelerómetros nombrados son basados en la tecnología MEMS, lo que significa una necesidad de espacio mínima además de un bajo costo de adquisición. En la figura 2-4 se puede observar un acelerómetro BMA180 desarrollado con tecnología MEMS montado sobre un PCB de 2x1[cm].

2.3.3 Memoria de almacenamiento de datos

En cuanto a las memorias, se optó por utilizar memorias SD que permiten un gran nivel de almacenamiento en espacio físico reducido y a bajo costo.

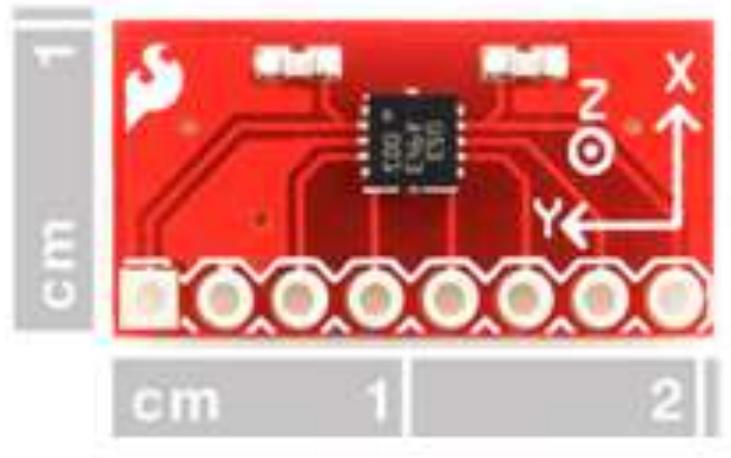


Figura 2-4 Acelerómetro BMA180 [7].

Operando en base al sistema de archivos FAT32, se logra una alta capacidad de almacenar datos para el sistema, ya que FAT32 permite trabajar con un tamaño máximo de archivos de hasta 4GB y un tamaño máximo de volumen de 2TB, superando ampliamente a los sistemas de almacenamiento de datos FAT12 y Fat16 los que soportan un tamaño máximo de volumen de hasta 32MB y 2GB respectivamente.

2.4 SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN

Como cada uno de los microcontroladores utilizados para cada sensor del sistema posee su propio oscilador que controla tanto la frecuencia de operación como los intervalos de tiempo medidos por cada sensor, existe un posible error en el tiempo medido entre los distintos microcontroladores con los que se trabaja, ya que los cristales en base a los que opera el oscilador no son idénticos. Esta situación produce un cierto desfase entre el tiempo que mide un microcontrolador con respecto al otro, lo que a lo largo de un intervalo de tiempo considerable podría producir que el instante en el que se toman las muestras no sea exactamente el mismo para cada oscilador, produciendo un desfase entre las muestras de un

sensor con respecto al otro. Esto significaría que al relacionar las muestras adquiridas por los distintos sensores, el resultado no represente el comportamiento real de la estructura en estudio. Para evitar este error en la captura de los datos, es necesario implementar un sistema de sincronización que proporcione un punto de referencia que permita eliminar o tener controlada la diferencia entre los osciladores.

Se determinó que la forma de sincronizar el sistema sería mediante el envío, por parte de un Arduino que opera como maestro, de una señal de sincronización que activará una interrupción en cada uno de los Arduinos esclavos que reinician el TIMER con el que se controla la frecuencia de muestreo. De esta forma, todos los sensores conectados al maestro reciben en el mismo instante la señal que reiniciará el contador de microsegundos de cada uno de los sensores.

Durante la investigación, se realizó una prueba simple para tener presente la posible magnitud del error en el oscilador de cada Arduino, la que consistió en mantener dos Arduinos operando en condiciones diferentes y registrar la diferencia en milisegundos, transcurridas 12 horas continuadas. Uno de los cristales fue expuesto constantemente al calor (30°C app.) y el otro expuesto a temperatura ambiente, obtenido diferencia de 528[ms], lo que significa un error relativo porcentual del orden del 0.00122%.

Este error relativo porcentual implica que en un evento de 10 minutos de duración se tendría un desfase de 7.32 [ms], y en intervalos de 1 minuto el desfase es de 0.7 [ms]. En base a esto, se determina que la señal de sincronización será enviada cada 1 [min], eliminando el posible desfase que podría acumularse con el transcurrir del tiempo, pudiendo modificarse el tiempo de la señal de sincronización de ser necesario.

CAPITULO 3

IMPLEMENTACION FINAL DESARROLLADA

El sistema implementado trabaja en base a un sensor de aceleración que puede ser tanto digital como analógico. Debido a que el conversor análogo/digital del Arduino opera con una resolución máxima de 10 BITS, los sensores análogos conectados al sistema quedan limitados a esta resolución.

En el caso de los acelerómetros digitales, la resolución máxima a la que operan está limitada por el diseño del fabricante, por lo que se pueden alcanzar resoluciones de 14 BITS como en el caso del sensor BMA180, pudiendo tener resoluciones aun mayores dependiendo de cada acelerómetro.

Dentro de los distintos acelerómetros que se utilizaron en la implementación, destaca el BMA180 que además de su mayor resolución, cuenta con una serie de complementos que permiten la configuración del sensor para distintas aplicaciones, entre estas características se encuentran: selección de rango de medición de entre $\pm 1g$ hasta $\pm 16g$, dos direcciones I2C seleccionables, interrupciones programables para detectar tanto niveles de aceleración altos como bajos, además de esto posee filtros digitales programables integrados, los que no necesitan componentes externos para su operación. Por estas características es que es éste acelerómetro en particular es el seleccionado para la posible implementación de otras unidades de este sistema en el futuro.

La plataforma Arduino permite comunicarse con otros chips o elementos periféricos mediante los protocolos de comunicación I2C y SPI, los que permiten al microcontrolador interactuar con cualquier dispositivo externo que soporte alguno de estos tipos de comunicación. De estos dos protocolos de comunicación, se seleccionó el I2C exclusivamente para la comunicación entre el microcontrolador y el sensor, dejando la comunicación con la memoria SD a través del protocolo SPI.

En paralelo al funcionamiento del sensor digital, el sistema puede operar en base al sensor análogo, el que no requiere de protocolos de comunicación,

debido a que éste entrega una señal de tensión proporcional a la aceleración a la que es sometido. Esta señal es interpretada por el conversor análogo/digital del microcontrolador, el que está limitado a una resolución máxima de 10 BITS (para el Arduino Mega). Esta limitación no ocurre en el caso de los acelerómetros con salida digital, ya que ésta no depende del conversor análogo/digital del microcontrolador.

3.1 ETAPA INICIAL DE DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

Desde el comienzo del proyecto, uno de los principales criterios establecidos para el término de este, fue obtener al final del proceso un equipo o un conjunto de equipos funcionales, capacitados para ser instalados como herramientas de medición en algún punto a definir. En base a este criterio, se comenzó la etapa de implementación y desarrollo, en las que se abarcaron varias etapas de implementación, pruebas, correcciones y mejoras, entre las que destacan los siguientes puntos:

- Implementación de un circuito simple inicial, que permita la comunicación entre los acelerómetros y la plataforma Arduino. Se desarrolló un circuito montado en protoboard que permitió realizar pruebas básicas de funcionamiento para los distintos acelerómetros utilizados para pruebas en etapas iniciales.
- Programación del microcontrolador para lograr establecer de forma correcta la frecuencia de muestreo, sin depender de los procesos que se encuentre ejecutando el microcontrolador. Para lograr esto se desarrolló una programación en base a las interrupciones disponibles en el microcontrolador.
- Diseño e Implementación de un circuito que permita al equipo a desarrollar, almacenar datos en una memoria SD externa. Se implementó en protoboard, como una etapa adicional del circuito de pruebas nombrado

anteriormente, un circuito que permite a la plataforma Arduino almacenar datos en una memoria externa.

- Creación y Habilitación de programa que permita al microcontrolador obtener de forma adecuada las señales de aceleración proveniente del sensor, procesar esta información y grabarla en la memoria externa SD que será utilizada como almacenamiento final para cada equipo.
- Implementación de señal de sincronización que permita a un sistema compuesto por más de un equipo de medición permanecer coordinados, asegurando que la frecuencia de muestreo y el instante de tiempo en que se toman las muestras estén sincronizados, minimizando la diferencia que existe en el reloj interno (cristal oscilador) de cada Arduino.
- Depuración de circuitos implementados en protoboards. Se reemplazó los circuitos desarrollados en protoboards por placas de circuitos impresos (PCB) lo que permitió eliminar una serie de errores que se presentaban principalmente al momento de escribir en la tarjeta SD.

3.2 PROGRAMACIÓN FINAL DEL SISTEMA

Se implementó en el sistema el uso de la librería “SDFat” de Arduino, la que permite soportar tanto el formato FAT16 como el FAT32, con esto se aumenta considerablemente la capacidad de almacenar datos del sistema, permitiendo además operar en base al protocolo de almacenamiento de archivo FAT16, que está limitado a un tamaño máximo volumen de 2 GB, pero posee la ventaja de ser un protocolo menos complejo que FAT32, esto implica una mayor velocidad al momento de escribir los datos.

Para determinar la frecuencia de muestreo se hizo uso de las interrupciones disponibles en el microcontrolador ATmega1280 (microcontrolador que utiliza Arduino Mega). Estas permiten interrumpir en cualquier momento la ejecución del código principal para atender y ejecutar una función en específico y después de esto continuar con el código exactamente desde el punto en que fue interrumpido,

para esto fue necesario reconfigurar algunas funciones predefinidas de Arduino para habilitar las interrupciones.

Para la frecuencia de muestreo, se utiliza una interrupción por “timer” que se configura al inicio del código para que el microcontrolador “cuente” hasta cierto valor en el que se desborda y activa la interrupción,

El formato de los archivos generados por el equipo desarrollado en este proyecto para ser almacenados en la memoria externa SD, es CSV (del inglés comma separated values o valores separados por coma), este formato es muy simple y básico, permitiendo ahorrar espacio y tiempo en la transferencia de la información, a su vez es reconocido por múltiples software como Excel de Microsoft, Matlab o cualquier procesador de texto o software de análisis de datos, lo que permite extraer y analizar los datos en cualquier computador que posea uno de estos softwares que reconozcan el formato anteriormente nombrado.

El archivo que se genera se presenta como una tabla de tres valores separados por coma en donde el primero, segundo, y tercero representan el valor para la entrada análoga respectiva en el caso de un acelerómetro análogo, en el caso de un acelerómetro con salida digital representan la dirección de cada uno de los ejes. En ambos casos cada valor en la tabla representan los ejes X, Y, Z del espacio.

Con este formato, almacenar un dato ocupa aproximadamente 20 bytes, es decir, en una memoria SD de 2GB de capacidad podemos almacenar del orden de los 10^8 datos. Si estos se adquieren a velocidad de 150 muestras por segundo, podríamos almacenar en forma continua durante aproximadamente 185 horas. En caso de registrar eventos a partir de cierto nivel de aceleración, dependiendo del lapso de tiempo, podríamos, por ejemplo, grabar 1110 eventos de 10 minutos de duración.

3.2.1 Frecuencia de muestreo

Luego de una serie de pruebas se optó por establecer una frecuencia de muestreo de 150 muestras por segundo. Con esta frecuencia el microcontrolador tiene tiempo para procesar la información y escribirla en la memoria, aun así hay un porcentaje de muestras que no se alcanzan a grabar, este porcentaje es del orden de 0,5%, es decir de cada 1000 muestras se pierden aproximadamente 5.

Originalmente, se pretendía obtener un sistema con una frecuencia de muestreo de 200 muestras por segundo que fuera comparable a los sistemas más usados como lo son los “Kinematics”, también se sabe que las frecuencias máximas que se presentan en la mayoría de los eventos telúricos no superan los 40[Hz], por lo tanto, con una frecuencia de muestreo de 150 muestras por segundo se logra superar ampliamente la frecuencia mínima de muestreo necesaria para poder reproducir en forma adecuada la señal original (según el teorema de Nyquist).

Además de lo anterior, existe la posibilidad de disminuir aun más la frecuencia de muestreo. Se realizaron pruebas con una frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo logrando a esta velocidad almacenar todas las muestras en la memoria SD, reduciendo el error de las muestras perdidas a un porcentaje menor al 0,05%, permitiendo representar correctamente señales de hasta 50 [Hz].

En la figura 3-1 se observa el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema, en el que las interrupciones aparecen en paralelo al desarrollo del código principal. En tanto, en la figura 3-2 se expone el diagrama de bloques del sistema final implementado.

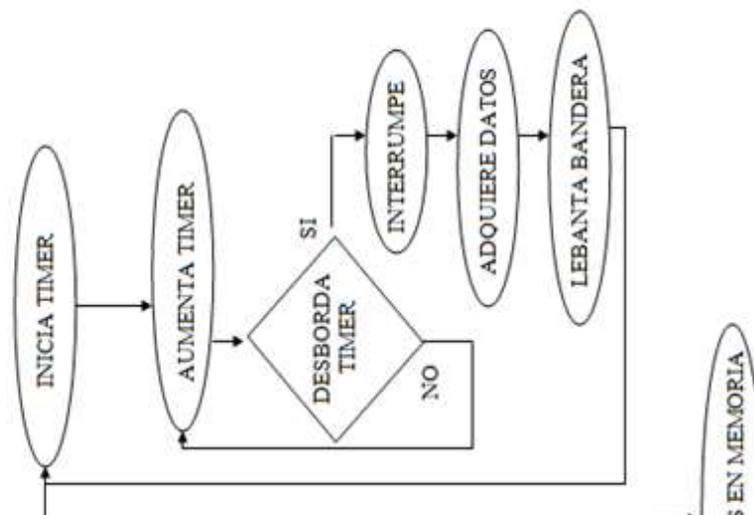




Figura 3-1 Diagrama de flujo del sistema

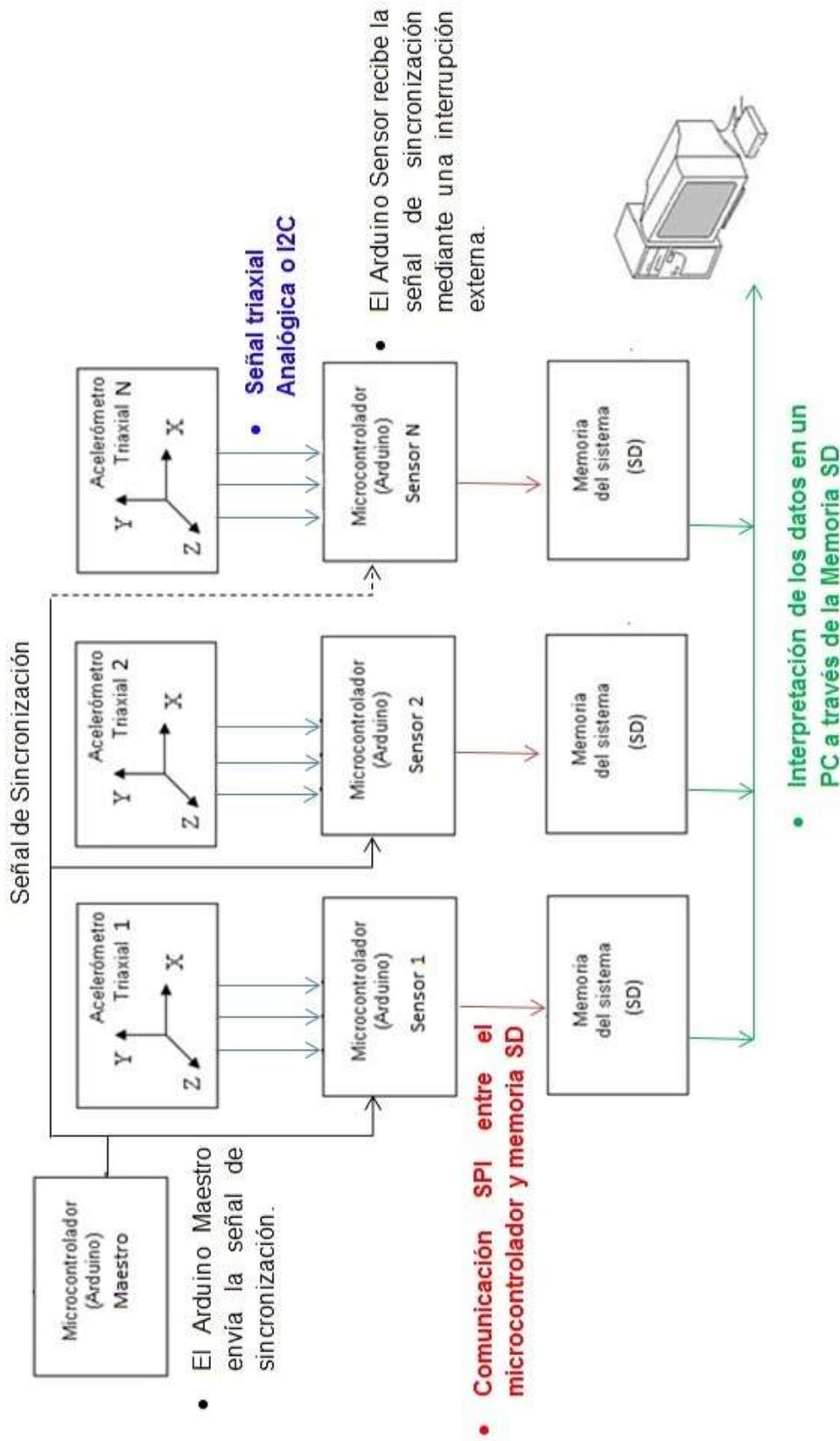


Figura 3-2 Diagrama de bloques del sistema

3.3 PRUBAS DE MEDICIÓN

Para lograr una posible calibración de los acelerómetros utilizados en el sistema, se utilizó la mesa vibratoria perteneciente a la PUC de Santiago, “shake table II”, la que posee sus propios sensores de aceleración y desplazamiento. Esta mesa vibratoria permite simular algunos eventos de distintas características.

Se concluyó que no era la mejor herramienta para determinar los niveles reales de aceleración que se producen en las simulaciones ejecutadas, debido a que no se tiene claro si los niveles de aceleración representados por los acelerómetros de la mesa vibratoria corresponden a los niveles reales de aceleración, por otro lado sus movimientos son producidos por un motor eléctrico, que al cambiar de dirección produce cambios bruscos en los registros de aceleración que entorpecen las mediciones. Además de otros problemas de tipo práctico al momento de realizar las pruebas.

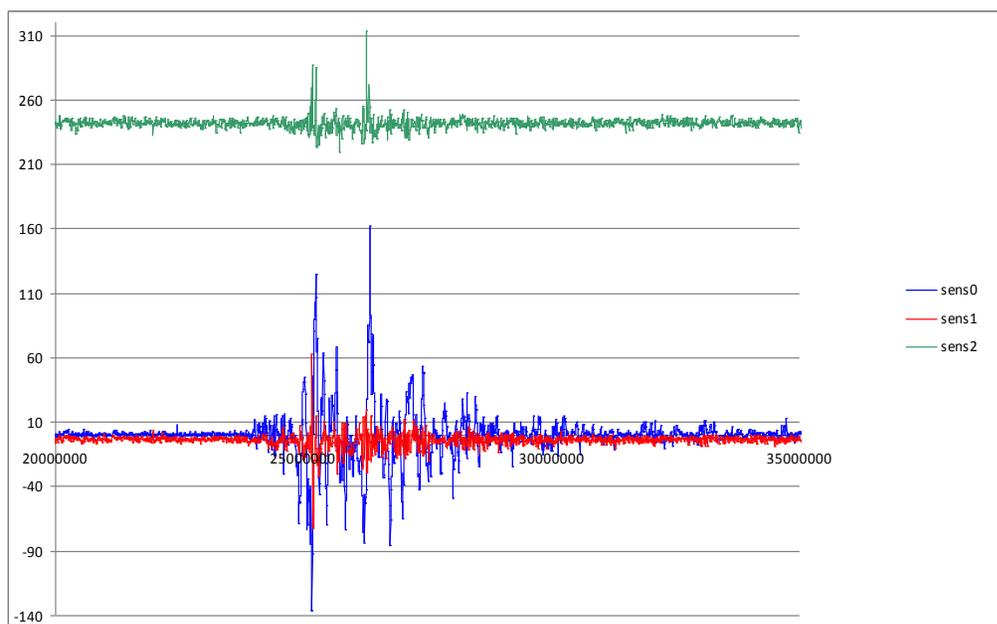


Figura 3-3 Simulación de un evento Sísmico en la “shake table II”

Sin embargo, las mediciones realizadas sirvieron para comparar el comportamiento de los acelerómetros que actualmente se utilizan en el proyecto con otros acelerómetros comerciales, como lo son los presentes en la “shake table II”, pudiendo realizarse además algunas mediciones que permiten evaluar el comportamiento del sistema implementado.

Como se puede apreciar en la figura 3-3, se simuló un evento sísmico de magnitud considerable, las mayores aceleraciones se registraron en el eje x de la medición que se encuentra representado en la figura por el color azul, que basados en los datos de calibración entregados por el fabricante de los acelerómetros, alcanza una aceleración máxima de 0,62 [g], lo que concuerda con la simulación realizada.

El color verde representa al eje “y” de la medición, en donde se observa el registro constante de la aceleración de gravedad.

Los gráficos expuestos en las figuras 3-3 y 3-4, fueron desarrollados con la herramienta de graficación del software Excel de Microsoft.

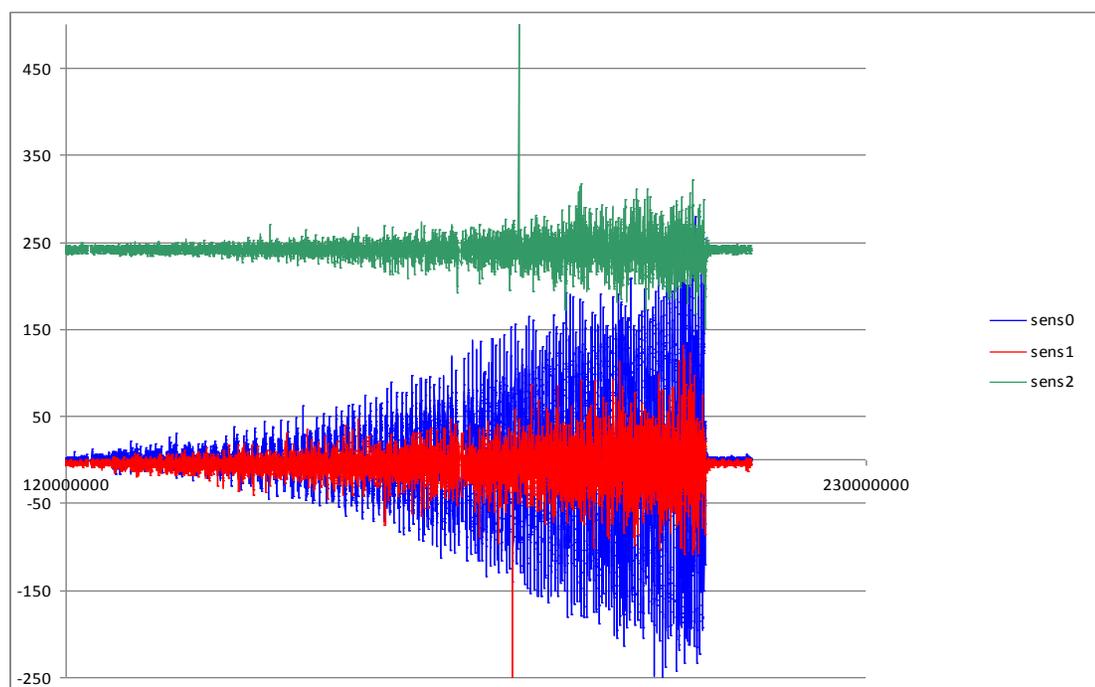


Figura 3-4 Simulación de variación de amplitud en la “shake table II”

Otra prueba realizada para comprobar el funcionamiento del sistema y analizar los datos registrados por éste, fue la instalación de los sensores en algunas de las pasarelas peatonales de Valparaíso, en el tramo que une Valparaíso con Viña del Mar, registrándose niveles de oscilación presentes en estas estructuras.

En la figura 3-5 se puede observar una de las mediciones realizadas en las pasarelas peatonales anteriormente nombradas. Este registro se obtuvo con el sensor que opera en base al acelerómetro BMA180, el que posee una resolución de 14 BITS, lo que en teoría permite registrar variaciones del orden de los 0,00024 [g], las variaciones de aceleración que pueden apreciarse en la figura son producidas por estímulos de poca intensidad, como puede ser el

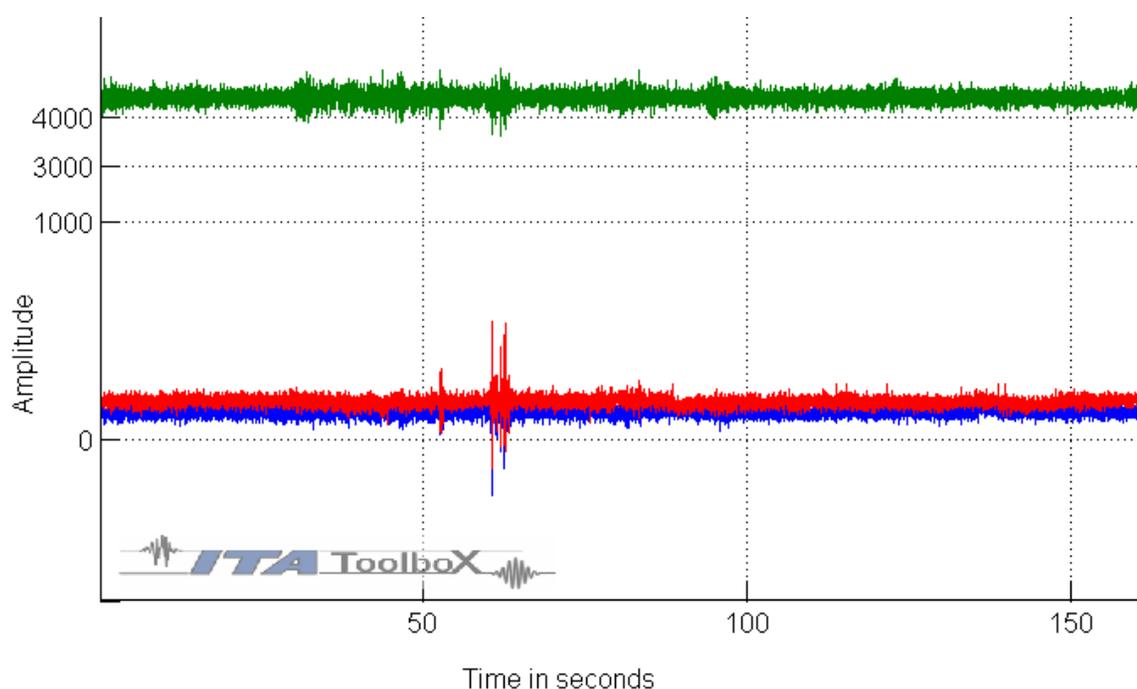


Figura 3-5 Registro de la pasarela peatonal ubicada en la estación Portales del Metro Valparaíso, tramo Valparaíso-Viña del Mar.

tránsito peatonal de un grupo de personas, registrando variaciones de aceleración del orden de los $0,1[g]$. Se observa en la figura una reducción en los intervalos del eje Amplitud para permitir apreciar el rango dinámico.

CAPITULO 4

MEJORAS A REALIZAR EN UNA PRÓXIMA ETAPA

Durante las etapas de investigación e implementación de este proyecto surgieron una serie de problemáticas que dificultaron el proceso de desarrollo, además de los contratiempos normales de un proceso de investigación. En base a estos contratiempos y errores, se identificó una serie de mejoras posibles al sistema actualmente desarrollado, determinándose además las necesidades que no lograron ser cubiertas con el funcionamiento actual.

4.1 PRE-EVENTO

Uno de los puntos más importantes que quedaron pendientes durante la implementación del sistema actual, es la capacidad de grabar un periodo de pre evento, en donde se permita apreciar cual fue el comportamiento del movimiento o la variación de aceleración en el período de tiempo entre el inicio real del evento y el instante en que el evento sísmico es detectado por el sensor, ya que el sistema actual comienza a capturar datos desde un cierto nivel de aceleración, pero para los expertos interesados en estudiar la respuesta sísmica, es importante también estudiar el evento desde su inicio.

Se establecen como alternativas para ser implementadas en una posible segunda etapa de desarrollo los dos siguientes puntos.

4.1.1 Uso de memoria RAM externa

Se podría utilizar una memoria RAM como un periférico adicional, que pueda comunicarse mediante el protocolo I2C o SPI con el microcontrolador, y que permita la capacidad de grabar una cantidad de muestras que se considere útil para los usuarios del sistema. Para esto sería necesario una memoria externa al

microcontrolador con una velocidad de comunicación varias veces mayor a la frecuencia de muestreo, en base a esto, cambiar el código actual para que el sistema funcione escribiendo constantemente sobre la memoria RAM externa hasta llenar su capacidad, momento el que se deberá establecer si durante el intervalo de tiempo anterior ocurrió o no un evento, lo que implicaría comenzar a grabar los datos siguientes en la memoria SD, de esta forma se podrá obtener todos los datos desde que se reconoció el inicio del evento almacenados en la memoria SD y los datos del pre evento almacenados en la memoria RAM externa, posteriormente a esto y antes de finalizar el archivo se deberían traspasar los datos del tiempo pre evento a la memoria SD, finalizando así con todos los datos del evento almacenados en un solo archivo en la memoria SD.

La principal ventaja de esta alternativa es tener la opción de seleccionar una memoria externa con capacidad y velocidad suficientes para operar según las necesidades específicas del sistema en desarrollo la que no estaría limitada a algún valor predefinido. En contraste con lo anterior, una desventaja sería la necesidad de comunicarse con un periférico adicional mediante algún protocolo de comunicación ya sea I2C o SPI, lo que podría implicar mayor tiempo de proceso para el microcontrolador, esto podría llegar a interferir con la frecuencia de muestreo, ya que como se vio anteriormente, la frecuencia de operación del Arduino esta limitada a 16 [MHz].

4.1.2 Uso de la memoria RAM interna del Microcontrolador

El mismo procedimiento descrito en el punto anterior podría realizarse en base a la memoria RAM interna del microcontrolador, que en este caso es el ATmega1280, como se expuso anteriormente este circuito integrado cuenta con una memoria SRAM de 128 KB de capacidad. Se debe tener en cuenta que la memoria interna del microcontrolador es utilizada para la ejecución del código, por ende no se dispone de su capacidad total.

Como se explicó anteriormente un dato almacenado por el sistema ocupa aproximadamente 20 bytes, considerando el uso de memoria para la ejecución del código y una frecuencia de muestreo de 150 muestras por segundo, se puede estimar un tiempo de pre evento del orden de los 10 a 15 segundos, el que podría variar dependiendo del código desarrollado para esta aplicación.

Por tratarse de la memoria interna del microcontrolador no es necesario ningún tipo de protocolo o electrónica extra para comunicarse con esta, ya que es parte del circuito integrado, lo que aparece como una ventaja considerable al momento de la implementación. Por otro lado se tiene como límite los 128 KB de memoria que posee el microcontrolador, lo que podría ser insuficiente para almacenar la cantidad de muestras necesaria para cubrir un tiempo de pre evento útil para el análisis.

4.2 DESARROLLO DE UNA NUEVA VERSIÓN

En el caso de desarrollar una versión mejorada del sistema presentado en este informe, lo primero que se debería considerar es la necesidad de tener el control total del hardware utilizado, a diferencia de lo que sucede con Arduino.

Si bien es cierto, Arduino tiene como principal ventaja la característica de ser una plataforma de desarrollo que permite comenzar a programar e implementar un nuevo proyecto en forma rápida y sin la necesidad de circuitos electrónicos externos, posee también la desventaja de utilizar un microcontrolador limitado en un número considerable de sus funciones, algunas de estas de vital importancia, por ejemplo, el uso de interrupciones o el uso de contadores de tiempo también conocidos como TIMERS, que se encuentran ocupados en su totalidad para funciones del tipo PWM en las salidas digitales, algunas de estas limitaciones pueden eliminarse utilizando librerías anexas al Software de programación estándar, como sucedió en este proyecto al momento de determinar la frecuencia de muestreo, para lo que fue necesario eliminar algunas funciones

de tipo PWM lográndose de esta forma tener acceso al TIMER que permite establecer la frecuencia con la que se tomarían la muestras.

Otra característica importante que se encuentra limitada es la frecuencia de operación del microcontrolador, la que esta fijada en 16 MHz, como Arduino no requiere de un programador externo no es posible variar este valor, ya que eso significaría afectar toda su interfaz de programación lo que daría como resultado la pérdida de la configuración de todos los periféricos y mas importante aun, se perdería la capacidad de grabar el microcontrolador.

Los microcontroladores que actualmente (2011) existentes en el mercado son capaces de operar a una frecuencia de 80[MHz], trabajando en base a estos microcontroladores se podría obtener una frecuencia de operación seis veces mayor a la utilizada actualmente en el proyecto.

Es por esto que se entiende que el siguiente paso a la hora de mejorar el funcionamiento del sistema es dejar atrás la plataforma de desarrollo Arduino y comenzar el desarrollo tanto de hardware como de software desde cero. Esto permitiría seleccionar todos los componentes según la necesidad específica del proyecto y la configuración de todos los periféricos según sea necesario, evitando así encontrarse con limitaciones o configuraciones pre definidas que al comienzo de un proyecto ayudan a simplificar la tarea, pero finalmente terminan resultando una desventaja al momento de intentar superarlas o reconfigurarlas.

Se recomienda el uso de los PIC32, estos son microcontroladores de gama alta con registros de 32 bits, desarrollados por el fabricante Microchip Technology Inc. Entre las características que estos microntroladores poseen, se destacan para este proyecto los siguientes puntos:

- Registros de 32 bits.
- Frecuencia de operación de hasta 80 MHz
- 512KB de memoria Flash y 128KB de memoria SRAM
- Comunicación I2C y SPI, además de USB, CAN y Ethernet
- 5 TIMERS de 16 bits, entre otras.

Como interfaz de programación para estos microcontroladores se utiliza el software MPLAB IDE de Microchip y como programador se puede utilizar tanto el ICD3, como el REAL ICE, ambos desarrollados también por Microchips.

CONCLUSIÓN

Debido a la importancia que tiene el estudio de los movimientos telúricos en países de gran actividad sísmica como Chile y la forma en que estos afectan a la población, es que la capacidad de poder registrar cualquier evento en varios puntos simultáneos de una misma edificación o de distintas obras civiles a la vez aparece como una herramienta necesaria y de suma utilidad.

Se ha expuesto durante el desarrollo de esta tesis, que la mayoría de los sistemas actualmente utilizados para registrar eventos sísmicos significan un importante costo monetario, por esto surge la necesidad de desarrollar un sistema que implique masificar el registro de los eventos sísmicos a un bajo costo, permitiendo aumentar de manera considerable las opciones de estudios y análisis tanto del comportamiento y respuesta de los suelos como de las distintas obras civiles que se pretendan analizar.

En base a la investigación y pruebas desarrolladas durante las asignaturas de Seminario de proyecto y Proyecto de título, se logró implementar un sistema funcional de adquisición de datos que permite almacenar los niveles de aceleración presentes en un determinado punto o conjunto de puntos de interés. A pesar de las distintas problemáticas que surgieron tanto de la investigación como de la implementación, las que obligaron a hacer cambios a la planificación original, se logró obtener un sistema capaz de medir las aceleraciones presentes en los eventos sísmicos a un bajo costo.

El sistema es capaz de registrar y almacenar aceleraciones en el rango de los $\pm 2g$, pudiendo configurarse el sensor para cubrir un rango de entre $\pm 1,5g$ y $\pm 16g$ siendo el rango óptimo para el estudio de obras civiles el nombrado inicialmente, en cuanto a la resolución de cada sensor, estos disponen de una resolución máxima de hasta 14 BIT.

La frecuencia de muestreo se determinó en 150 muestras por segundo, lo que permite muestrear señales de hasta 75[Hz] o con un período de 0,013 [s] y la capacidad de almacenar más de mil eventos de diez minutos de duración cada uno, en una memoria SD de 2GB.

Este sistema cuenta también con la posibilidad de enviar una señal de sincronización a cada uno de los sensores que lo componen, manteniendo de esta manera la frecuencia de muestreo de cada sensor sincronizada, lo que permitiría la instalación de múltiples sensores que entreguen una representación del movimiento real de la estructura que estaría siendo objeto de estudio.

Con esto se logra que el sistema cumpla con los objetivos planteados al inicio del proyecto, aunque se sabe que se implementó con una frecuencia de muestreo inferior a la planificada, la frecuencia a utilizar resulta suficiente para analizar en forma adecuada las señales de aceleración a las que se ven sometidas las edificaciones durante movimientos telúricos.

Finalmente, el sistema desarrollado y expuesto en esta tesis se presenta como una alternativa de bajo costo a la hora de registrar y almacenar los datos necesarios para el estudio del comportamiento y respuesta de cualquier estructura que se encuentra expuesta a eventos telúricos.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1]. Rosa Prol Ledesma, “El calor de la Tierra”. Quinta reimpresión, 1996
- [2]. Bruce A. Bolt, “Terremotos”. 2008
- [3]. R. Beroschek, P. Soto, R. León, “Registros del terremoto del Maule MW=8.8 27 de Febrero de 2010”. Informe RENADIC 10/05 Rev. 2, Octubre 2010
- [4]. R. Beroschek, D. Comte, P. Soto, R. León, “Informe preliminar red de Acelerógrafos zona Norte, terremoto Norte Chile 14 De Noviembre De 2007 M = 7.7 Informe Preliminar N° 4”. Noviembre 2007
- [5]. R. Beroschek, D. Comte, P. Soto, R. León, “Registros del terremoto de Tarapacá 13 de Junio del 2005”. Enero 2016
- [6]. Pagina oficial del fabricante Kinometrics S.A., <http://www.kmi.com>
- [7]. Pagina oficial para la plataforma Arduino, <http://www.arduino.cc>
- [8]. BMA180 digital, triaxial acceleration sensor, Data sheet.
- [9]. Pagina oficial, Red Nacional de Acelerógrafos RENADIC, <http://www.renadic.cl/>
- [10]. Sebastián Fingerhuth, “Diseño y construcción de un sismógrafo en base al acelerómetro ADXL202”. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil Electricista.
- [11]. Carl Lurders, “Respuesta sísmica de estructuras”, Pontificia Universidad Católica de Chile.