

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y FACULTAD DE CIENCIA DE
LA TIERRA Y EL ESPACIO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



SISTEMA DE MONITOREO DE PRECURSORES SÍSMICOS EN
SEÑALES GEO ELECTROMAGNÉTICAS

Para obtener el grado de:

Maestro en ciencias

Presenta:

Ing. Jaime Andrés Becerra Jiménez

Directores:

Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz

Dra. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra

Culiacán Sinaloa febrero 2020

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por siempre estar a mi lado, su amor y su apoyo incluso en la distancia me han hecho el ser que soy, a mi hermana por nunca dejarme solo y demostrarme que siempre puedo superarme. A Alicia Carrillo por toda su colaboración y cuidados cuando más lo necesitaba.

Al Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz por siempre estar pendiente y dispuesto a guiarme en cada paso, como amigo y asesor de tesis. A la Dra. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra, Por creer en mí y en el trabajo que desarrolle. Al Dr. Arturo Yee Rendon por no solo ser un gran profesor, sino también un amigo en el posgrado.

A la Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado, por estar pendiente de nuestros avances desde el primer día y nunca dejar de apoyarnos, A la Universidad Autónoma de Sinaloa por darme la oportunidad de estudiar su posgrado y permitirnos trabajar en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme la oportunidad de ser beneficiario de la beca de maestría la cual me sirvió para enfocarme en mis estudios, que estoy seguro redundarán en beneficio de la comunidad.

A mis compañeros, profesores y personal de la universidad, que con su contribución constante y desinteresada fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

RESUMEN

En la presente tesis se muestra el sistema desarrollado en el monitoreo del campo magnético terrestre, el cual se utiliza para tomar datos del mismo y lograr posteriormente hacer un análisis en busca de anomalías magnéticas, con lo cual se puede distinguir posibles precursores sísmicos, para esto el sistema como tal hubo de ser fiable y de bajo costo.

Los sistemas comerciales actuales, son caros y difíciles de adquirir, además que, para poder hacer análisis propios, normalmente se requiere solicitar información de terceros, que en la mayoría de las ocasiones, contienen datos incompletos como también tratamientos previos los cuales dificultan el análisis cuando se es necesario trabajar con datos RAW.

El campo magnético terrestre puede ser alterado por muchos factores, entre ellos las tormentas solares, por lo que se necesitó buscar datos con una actividad solar baja, utilizando el índice Dst para encontrar días sísmicos, donde el campo magnético estuviera afectado.

Para realizar el proyecto se necesitó llevar a cabo varias tareas. El primer enfoque fue el desarrollo del prototipo, el segundo fue escoger 3 eventos sísmicos con los cuales trabajar.

A los datos seleccionados se les aplicó un análisis donde se usó un filtro media móvil de 10, y posteriormente se utilizó una transformada de wavelet discreta, con el objetivo de encontrar datos anómalos.

Por último, se obtuvieron datos de una estación externa (estación Tucson), la cual era la estación más cercana con datos suficientes ofrecidos por intermagnet.org. Se extrajeron los de los eventos sísmicos seleccionados y se les aplicó los mismos filtros, para por último comparar los resultados.

ABSTRACT

This thesis shows the development of an own system for monitoring the earth's magnetic field, which is used to take data from it, later an analysis is made to look for magnetic anomalies, and to be able to distinguish possible seismic precursors, for this the system have to be a reliable and low cost.

The current commercial systems are expensive and difficult to acquire, in addition to the fact that in order to make own analyzes, it is usually necessary to request data from third parties, which often have incomplete data or previous treatments which are difficult to analyze when it is necessary to work with RAW data.

The earth's magnetic field can be altered by many factors, including solar storms, so it is necessary to look for data where solar activity is low, for that the Dst index is perfect to find low activity days, where the magnetic field was not affected .

it was required diferents steps for the project . The first approach was the development of the prototype which brought 2 important modifications to reach the final version, while data was captured and seismic events were expected to occur, for this the system works 24/7, once it obtained a good amount of datwith.

To these selected data an analysis will be applied which is to use a mobile mean filter of 10, and then a discrete wavelet transformation, with this anomalous data will be searched.

Finally, was obtained data from an external station (Tucson station), which was the closest station with the necessary data by intermagnet.org. The selected seismic events were extracted and the same filters were applied to obtain the comparison of the results with the data selected by the developed station. a in which several seismic events are included, we proceeded to choose 3 seismic events to work

CONTENIDO.

CONTENIDO.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
TABLA DE ABREVIATURAS.....	16
1 INTRODUCCIÓN	19
1.1 Planteamiento del problema.....	22
1.2 Justificación.....	23
1.3 Objetivos	24
1.3.1 Objetivos Generales	24
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
1.4 Antecedentes y estado del arte.....	25
1.5 Hipótesis.....	38
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	39
2.1 Sistemas embebidos.....	39
2.1.1 Microcontroladores.	39
2.1.2 FPGA.	39
2.1.3 SBC.....	40
2.1.4 Lenguajes de programación.	40
2.2 Magnetismo terrestre	41
2.3 Sensores.....	42

2.3.1	Conversores Analógico Digital (ADC).....	42
2.3.2	Magnetómetro fluxgate	43
2.4	Filtros	44
2.4.1	Filtros electrónicos	44
2.4.2	Filtros digitales	45
2.5	Conversión analógico digital.	48
2.6	Interfaces de comunicación.	49
2.7	Análisis espectral.	53
2.8	Transformadas wavelets.....	55
2.9	Precursores sísmicos.	56
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	59
3.1	Sensor Fluxgate Mag 690-1000.	60
3.2	Tarjeta para adquisición de datos	60
3.3	Arduino uno	62
3.4	Raspberry pi 3.....	63
3.5	Deo Nano SOC	64
3.6	Software.....	65
3.6.1	Arduino IDE.....	65
3.6.2	PYTHON.	66
3.6.3	Matlab.	66
3.6.4	Active HDL.	67
3.6.5	Quartus ii.....	67
3.7	Filtros.....	67

3.7.1	Filtro media móvil.....	67
3.7.2	Transformada de wavelet discreta.....	68
3.8	Diseño y desarrollo del prototipo.....	70
3.8.1	Primera propuesta del prototipo 1.....	71
3.8.2	Segunda propuesta del prototipo 1.....	71
3.8.3	Actualización a versión 2 del prototipo.....	74
3.8.4	Actualización de la versión 2.....	79
3.9	Códigos desarrollados.....	84
3.9.1	Código de Python para la adquisición de datos.....	85
3.9.2	Código de Matlab para graficar los datos RAW.....	86
3.9.3	Código de Matlab para aplicar y graficar el filtro media móvil y DWT.....	87
4	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	89
4.1	Análisis de evento sísmicos.....	99
4.1.1	Evento sísmico al SURESTE de SALINA CRUZ, OXACA.....	100
4.1.2	Evento sísmico del sureste de salina cruz.....	104
4.1.3	Evento sísmico al oeste de Cihuatlán, Jalisco.....	108
5	CONCLUSIONES.....	111
5.1	Conclusión.....	111
5.2	Trabajo futuro.....	112
	BIBLIOGRAFÍA.....	113
6	ANEXOS.....	119
6.1	Códigos.....	119
6.2	Gráficas.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1 Prototipo Desarrollado En 1981 (Medford Et Al., 1981).	26
Figura 2.1 Conversión Análogo – Digital (Huircán, 2007).	42
Figura 2.2 Representación Interna Magnetómetro Fluxgate.	44
Figura 3.1 Comparación, Raspberry Pi, De0 Nano Soc, Arduino Uno	59
Figura 3.2 Magnetómetro Mag 690-1000.	60
Figura 3.3 Placa Ads 8688 Desarrollado Por Ing. Israel Román.	61
Figura 3.4 Representación Media Móvil.	68
Figura 3.5 Nivel 1 Dwt.	69
Figura 3.6 Nivel 2 Dwt.	69
Figura 3.7 Shield Arduino Ads, Conectado A La De0 Nano Soc.	70
Figura 3.8 Prueba De Lectura Del Sensor En Arduino.	71
Figura 3.9 Esquema Prototipo Versión 1.	72
Figura 3.10 Prototipo Versión 1 Funcionando.	73
Figura 3.11 Esquema Prototipo Versión 2.	74
Figura 3.12 Diseño Shield Ads 8688 Compatible Con Arduino, Diseñado Por: Dr. Jesus Roberto Millán.	75
Figura 3.13 Shield Ads 8688 Compatible Con Arduino Uno, Diseñado Por: Dr. Jesus Roberto Millán.	76
Figura 3.14 Vista Del Diseño De Conexión Arduino Uno A Raspberry Pi.	77
Figura 3.15 Tarjeta Física, Del Adaptador De Arduino Shield A Raspberry Pi.	77
Figura 3.16 Conexión Raspberry Pi, Adaptador Y Shield Arduino Ads 8688.	78
Figura 3.17 Esquema Actualización Prototipo Versión 2.	79
Figura 3.18 Diagrama Pcb Pasivo (Rodríguez, 2019).	80

Figura 3.19 Diagrama Pcb Conector Ads – Raspberry Pi(Rodríguez, 2019).	81
Figura 3.20 Conector Ads - Raspberry Pi (Rodríguez, 2019).	81
Figura 3.21 Sistema De Adquisición De Datos.	82
Figura 3.22 Diagrama Pcb Reguladores De Voltaje (Rodríguez, 2019).	83
Figura 3.23 Estación De Monitoreo Geo Electromagnético.	84
Figura 3.24 Código De Inicialización Spi.	85
Figura 3.25 Bucle De Lectura Ads 1262.	86
Figura 3.26 Código Para Graficar Eje X.	86
Figura 4.1 Datos Eje X Primera Versión.	90
Figura 4.2 Datos Eje X Primera Versión Estación Uas.	91
Figura 4.3 Datos Eje Y Primera Versión Estación Uas.	92
Figura 4.4 Datos Eje Z Primera Versión Estación Uas.	93
Figura 4.5 Datos Eje X Primera Modificación Estación Uas. .	94
Figura 4.6 Datos Eje Y Primera Modificación Estación Uas.	95
Figura 4.7 Datos Eje Z Primera Modificación Estación Uas.	96
Figura 4.8 Eje X Segunda Modificación Estación Uas.	97
Figura 4.9 Eje Y Segunda Modificación Estación Uas.	98
Figura 4.10 Eje Z Segunda Modificación Estación Uas.	99
Figura 4.11 Datos Estación Uas. Eje X Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz.	101
Figura 4.12 Datos Estación Uas. Eje Z Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil Y Dwt.	102
Figura 4.13 Datos Estación Tucson, Eje X Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz	103

Figura 4.14 Datos Tucson, Eje Z Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil Y Dwt.	104
Figura 4.15 Datos Estación Uas. Eje X Evento Sísmico Del Sureste De Salina Cruz.	105
Figura 4.16 Datos Estación Uas. Eje X Filtro Media Móvil Y Dwt Evento Del Sureste De Salina Cruz, Mostrando Posibles Anomalías.	106
Figura 4.17 Datos Estación Tucson, Eje X Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	107
Figura 4.18 Datos Estación Uas. Eje Z Evento Sísmico De Cihuatlán, Jalisco.	108
Figura 4.19 Datos Estación Uas. Eje Z Media Móvil Y Dwt Evento De Cihuatlán, Jalisco Mostrando Posibles Anomalías.	109
Figura 4.20 Datos Estación Tucson, Eje Y Filtro Media Móvil Y Dwt Evento De Cihuatlán, Jalisco.	110
Figura 6.1 Datos Estación Uas. Eje Y Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz.	119
Figura 6.2 Datos Estación Uas. Eje Z Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz.	120
Figura 6.3 Datos Estación Uas. Eje X Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil.	120
Figura 6.4 Datos Estación Uas. Eje Y Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil.	121
Figura 6.5 Datos Estación Uas. Eje Z Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil.	121
Figura 6.6 Datos Estación Uas. Eje X Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil Y Dwt.	122
Figura 6.7 Datos Estación Uas. Eje Y Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil Y Dwt.	122

Figura 6.8 Datos Estación Tucson, Eje X Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz	123
Figura 6.9 Datos Estación Tucson, Eje Y Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz	123
Figura 6.10 Datos Estación Tucson Eje Z Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz	124
Figura 6.11 Datos Estación Tucson, Eje X Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Filtro Aplicando Media Móvil.	124
Figura 6.12 Datos Estación Tucson, Eje Y Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil.	125
Figura 6.13 Datos Estación Tucson, Eje Z Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil.	125
Figura 6.14 Datos Tucson, Eje X Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil Y Dwt.	126
Figura 6.15 Datos Tucson, Eje Y Del Evento Sísmico Del Sur De Las Choapas, Veracruz Aplicando Filtro Media Móvil Y Dwt.	126
Figura 6.16 Datos Estación Uas. Eje Y Evento Del Sureste De Salina Cruz.	127
Figura 6.17 Datos Estación Uas. Eje Z Evento Del Sureste De Salina Cruz.	127
Figura 6.18 Datos Estación Uas. Eje X Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	128
Figura 6.19 Datos Estación Uas. Eje Y Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	128
Figura 6.20 Datos Estación Uas. Eje Z Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	129
Figura 6.21 Datos Estación Uas. Eje Y Filtro Media Móvil Y Dwt Evento Del Sureste De Salina Cruz	129

Figura 6.22 Datos Estación Uas. Eje Z Filtro Media Móvil Y Dwt Evento Del Sureste De Salina Cruz.	130
Figura 6.23 Datos Estación Tucson Eje X Evento Del Sureste De Salina Cruz.	130
Figura 6.24 Datos Estación Tucson Eje Y Evento Del Sureste De Salina Cruz.	131
Figura 6.25 Datos Estación Tucson Eje Z Evento Del Sureste De Salina Cruz.	131
Figura 6.26 Datos Estación Tucson, Eje X Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	132
Figura 6.27 Datos Estación Tucson, Eje Y Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	132
Figura 6.28 Datos Estación Tucson, Eje Z Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	133
Figura 6.29 Datos Estación Tucson, Eje X Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	133
Figura 6.30 Datos Estación Tucson, Eje Y Filtro Media Móvil Evento Del Sureste De Salina Cruz.	134
Figura 6.31 Datos Estación Tucson, Eje Z Filtro Media Móvil Y Dwt Evento Del Sureste De Salina Cruz.	134
Figura 6.32 Datos Estación Uas. Eje X Evento Sísmico De Cihuatlán, Jalisco.	135
Figura 6.33 Datos Estación Uas. Eje Y Evento Sísmico De Cihuatlán, Jalisco.	135
Figura 6.34 Datos Estación Uas. Eje Z Evento Sísmico De Cihuatlán, Jalisco.	136
Figura 6.35 Datos Estación Uas. Eje X Filtro Media Móvil Evento De Cihuatlán, Jalisco.	136
Figura 6.36 Datos Estación Uas. Eje Y Filtro Media Móvil Evento De Cihuatlán, Jalisco.	137
Figura 6.37 Datos Estación Uas. Eje Z Filtro Media Móvil Evento De Cihuatlán, Jalisco.	137

Figura 6.38 Datos Estación Uas. Eje X Filtro Media Móvil Y Dwt Evento De Cihuatlán, Jalisco.	138
Figura 6.39 Datos Estación Tucson, Eje X Evento Sísmico De Cihuatlán, Jalisco.	138
Figura 6.40 Datos Estación Tucson, Eje Y Evento Sísmico De Cihuatlán, Jalisco.	139
Figura 6.41 Datos Estación Tucson, Eje Z Evento Sísmico De Cihuatlán, Jalisco.	139
Figura 6.42 Datos Estación Uas. Eje Y Filtro Media Móvil Y Dwt Evento De Cihuatlán, Jalisco.	140
Figura 6.43 Datos Estación Tucson, Eje X Filtro Media Móvil Evento De Cihuatlán, Jalisco.	140
Figura 6.44 Datos Estación Tucson, Eje Y Filtro Media Móvil Evento De Cihuatlán, Jalisco.	141
Figura 6.45 Datos Estación Tucson, Eje Z Filtro Media Móvil Evento De Cihuatlán, Jalisco.	141
Figura 6.46 Datos Estación Tucson, Eje X Filtro Media Móvil Y Dwt Evento De Cihuatlán, Jalisco.	142
Figura 6.47 Datos Estación Tucson, Eje Y Filtro Media Móvil Y Dwt Evento De Cihuatlán, Jalisco.	142
Figura 6.48 Datos Estación Tucson, Eje Z Filtro Media Móvil Y Dwt Evento De Cihuatlán, Jalisco.	143

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1 Complejidad Computacional Dft Y Fft.....	55
Tabla 2.2 Clasificación De Acuerdo A (Ikeya, 2004) De Las Declaraciones Sobre Precursores Sísmicos Recolectados Por Wadatsumi (1995).	57
Tabla 3.1 Comparación Pc, Muc Y Fpga.....	59
Tabla 3.2 Características Ads	62
Tabla 3.3 Configuración De Pines Adc-Raspberry Pi (Rodríguez, 2019).	82
Tabla 4.1 Muestra Organización De Datos En Archivo Csv.	89

TABLA DE ABREVIATURAS.

<i>Abreviatura</i>	<i>Significado</i>
<i>ADC</i>	<i>Conversor Analógico Digital.</i>
<i>ASIC</i>	<i>Circuito Integrado Para Aplicaciones específicas.</i>
<i>CONACYT</i>	<i>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.</i>
<i>CPU</i>	<i>Unidad de Procesamiento Central.</i>
<i>CSV</i>	<i>Valores Separados por Comas.</i>
<i>CWT</i>	<i>Transformada Wavelet Continua.</i>
<i>DWT</i>	<i>Transformada Wavelet Discreta.</i>
<i>DFT</i>	<i>Transformada discreta de Fourier.</i>
<i>DST</i>	<i>Disturbance Storm-Time</i>
<i>EMD</i>	<i>Método de descomposición de modo empírico.</i>
<i>EPROM</i>	
<i>EWT</i>	<i>Transformada Wavelet Empírica.</i>
<i>FFT</i>	<i>Transformada rápida de Fourier.</i>

<i>FIR</i>	<i>Respuesta finita al impulso.</i>
<i>FPGA</i>	<i>Matriz de puertas lógicas programable en campo.</i>
<i>FD</i>	<i>Teoría de la dimensión fractal.</i>
<i>GPIO</i>	<i>Puertos de propósito general Entrada/Salida.</i>
<i>IDFT</i>	<i>Transformada inversa de Fourier.</i>
<i>IIR</i>	<i>Respuesta infinita al impulso.</i>
<i>MCU</i>	<i>Microcontrolador.</i>
<i>PSFL</i>	<i>Python Software Foundation License.</i>
<i>RAM</i>	<i>Memoria de acceso aleatorio.</i>
<i>ROM</i>	<i>Memoria de solo lectura.</i>
<i>SBC</i>	<i>Computadora de placa única.</i>
<i>SPI</i>	<i>Interfaz de periféricos serie.</i>
<i>TEC</i>	<i>Contenido total de electrones.</i>
<i>ULF</i>	<i>Señales geomagnéticas de bajas frecuencias.</i>
<i>VHDL</i>	<i>Lenguaje de descripción de hardware.</i>

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad los terremotos son un fenómeno natural, que no se han podido predecir con exactitud para decir cuándo ocurrirá un evento, por ejemplo, en 2015 dejaron 9624 víctimas fatales, en más de 1500 terremotos con una magnitud de 5 o más según los datos del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), por otro lado, el terremoto de Haití causó pérdidas por más de 14.000 millones de dólares según los datos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Es de aclarar, que las escalas para medir el tamaño o el impacto de un temblor no es la que comúnmente se conoce como escala de Richter, debido a que ya esa medida no se utiliza, por otro lado, actualmente se obtiene de forma numérica a partir de registros obtenidos por sismógrafos utilizando diferentes técnicas de análisis y está relacionada con el tamaño y la energía liberada durante un temblor, según el Centro Sinológico Nacional de México (SSN).

En los últimos años, científicos y organizaciones han comenzado a direccionar esfuerzos enfocados en la detección de sismos para evitar y/o minimizar las pérdidas humanas en estos eventos, usando diferentes técnicas para detectar precursores válidos, en China por ejemplo, mostraron avances utilizando la Ionosfera para encontrar precursores (Le, Liu, Zhao, & Liu, 2015). Por otro lado otro, grupos de científicos presentan una investigación retrospectiva de series temporales de campos geomagnéticos aplicada para tratar de encontrar precursores sísmicos para el terremoto de Aquila en 2009 (Masci & Di Persio, 2012) o también en la zona de Damvand en Irán la cual fue escogida por científicos para actividades de detección de terremotos (Mokhtari, 2010); se hicieron experimentos para probar diferentes metodologías, e incluso a nivel nacional tenemos grupos de científicos los cuales unen sus esfuerzos para buscar y encontrar técnicas fiables para predecir sismos, como por ejemplo el uso de la transformada de Wavelet, discreta en señales del campo eléctrico (Chavez et al., 2018).

Uno de los métodos que se está utilizando es el análisis del campo magnético de la tierra, pues se han podido observar perturbaciones en el campo magnético previos a eventos sísmicos, como por ejemplo en Japón utilizaron un análisis de las funciones de respuesta geomagnética antes del terremoto de Tohoku, (Rokityansky, Babak, & Tereshyn, 2016)

o también en otro trabajo se utilizó para ver una posible asociación entre variaciones geomagnéticas anómalas y los terremotos de Molise en el centro de Italia durante 2002 (Masci, 2012) . o en 2016 que mostraron una correlación de la señal geomagnética para estudios de terremotos en las regiones de Indonesia, Australia y el Pacífico(Kanata, Zubaidah, & Wiriasto, 2016) lo anterior por citar algunos estudios que se han hecho sobre el tema. Además con este análisis se pueden encontrar otras perturbaciones no asociadas a sismos, como por ejemplo en 2012 utilizaron diferente estaciones de referencia para encontrar comportamientos anómalos en el campo magnético terrestre(Hattori, Han, & Huang, 2013).

Ahora bien, el término precursor se emplea para describir la amplia variedad de fenómenos físicos que preceden a un terremoto. Estos fenómenos incluyen campos eléctricos y magnéticos inducidos, cambios de nivel de las aguas subterráneas, deformación superficial, cambios de temperatura, patrones anómalos de sismicidad, entre otros. Por lo anterior es posible encontrar variaciones en el campo magnético cuando ocurren esta clase de fenómenos(A. Meljarego, 2017).

Algunos de estos fenómenos han sido observados fortuitamente antes de un terremoto, por ejemplo, un magnetómetro instalado a 7 km del terremoto de Loma Prieta en California registró dos precursores en el campo magnético, la primera dos semanas antes del evento principal y la segunda 3 horas antes por lo que se puede suponer que se tiene relación, con anomalías magnéticas por lo que en teorías es posible visualizarlas(Chávez Alegría, 2011).

También Recientemente se ha informado que los fenómenos electromagnéticos tienen lugar en un amplio rango de frecuencias antes de un terremoto, y se espera que estos efectos sismo- electromagnéticos precursores sean útiles para la mitigación de los peligros sísmicos.

Existen actualmente 2 formas más comunes de observación de firmas de terremotos. El primero es la observación directa de las emisiones electromagnéticas (emisiones naturales) desde la litosfera y el segundo es detectar indirectamente el efecto sísmico producido en una forma de anomalía de propagación de las señales del transmisor

preexistente (lo llamamos sonido de radio). De las cuales se plantea utilizar la directa primeramente para poder observar fenómenos en su estado natural y poder sobre esos datos obtener y tratar la información.

Además, en la predicción de que manejan diferentes autores las clasifican en 3 categorías, corto, mediano y largo plazo, en el caso de corto plazo es necesario ver algún precursor como anomalías.

1.1 Planteamiento del problema.

Debido a que los eventos sísmicos son fenómenos naturales impredecibles y en muchos casos deja víctimas fatales como también cuantiosos daños materiales (Cruz-Abeyro, Enríquez, Zúñiga, & Kotsarenko, 2004), en la actualidad se están probando diferentes técnicas para poder detectar precursores sísmicos, entre los más utilizados se encuentra el del campo geomagnético de la tierra(Chávez Alegría, 2011), no obstante los equipos para la recolección de datos son caros y solo centros de investigación con recursos económicos tienen la posibilidad de adquirirlos y operarlos.

Así mismo, el poder acceder a los datos de terceros, suele ser lento y no siempre se obtienen los datos totalmente limpios, sino que muchas veces tienen algún tratamiento previo, o simplemente no se tiene conocimiento del cómo y de qué forma se obtuvieron y guardaron.

Por estas razones, se hace la necesidad de tener un sistema propio de bajo costo y gran accesibilidad.

1.2 Justificación

Los eventos sísmicos, son fenómenos naturales de los cuales aún se necesitan muchos datos y estudios, para poder lograr resultados palpables que ayuden a su detección, prevención e inclusive predicción(Cruz-Abeyro et al., 2004).

Por lo cual, se hace necesario un dispositivo capaz de captar el campo geomagnético y al ser de desarrollo propio, se puede modificar para cumplir necesidades específicas, como el de poder obtener los datos puros al no tener tratamiento previo, que en dispositivos comerciales se desconoce.

Por último, al poder captar y guardar los datos en una base de datos propia, es posible utilizar estos datos para trabajos futuros, tanto propios como de la comunidad científica y de la misma universidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

Desarrollar un sistema embebido capaz de monitorear continua y permanentemente el campo magnético terrestre, para analizar e identificar posibles precursores sísmicos en señales geo - electromagnéticas provenientes de un magnetómetro fluxgate.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1 Desarrollar un sistema embebido para monitorear el campo magnético.
- 2 Generar una base de datos con datos geo - electromagnéticos.
- 3 Analizar los datos obtenidos en busca de precursores sísmicos.
- 4 Implementar una metodología alternativa de detección de posibles precursores sísmicos por medio de algoritmos de procesamiento digital de señales.

1.4 Antecedentes y estado del arte

Desde hace más de 50 años se comenzó a estudiar el campo magnético de la tierra. James Wynne Dungey en su investigación sentó las bases de cómo el campo magnético del Sol se conecta con el campo magnético de la Tierra en los años 50 (Vestine, 1954). Al igual que unos años después se comenzarían a hablar de los primeros sensores magnéticos de tipo fluxgate más exactamente Gordon, D y Brown, R. Escribieron un artículo el cual habla de los avances logrados en los primeros magnetómetros fluxgate, hasta el año de 1972, como también menciona que un magnetómetro fluxgate es un dispositivo para medir campos magnéticos utilizando las características magnéticas no lineales del material de núcleo ferromagnético en su elemento sensor, y también que el primer sensor fue introducido en el año 1930. “El desarrollo temprano se realizó para estudios magnéticos aéreos y para la detección de submarinos durante la Guerra Mundial”, pero después de la segunda guerra mundial, se comenzaron a ver sus usos en otras áreas, como fueron estudios geomagnéticos, prospección de materiales e incluso mediciones magnéticas del espacio. “Con el comienzo de la era espacial a finales de los años 1950, el magnetómetro fluxgate se adaptó a las aplicaciones de magnetometría espacial.” El primer satélite que llevo un magnetómetro fue el sputnik 3, el cual se lanzó en 1958 y tenía un servo-orientado fluxgate. Luniks 1 y 2 (zondas rusas lunares), las cuales comenzaron a lanzarse en 1958, cargaban un magnetómetro triaxial fluxgate. La sonda venus lanzada en 1961 contenía dos magnetómetros de eje único fluxgate. Así poco a poco comenzaron a utilizarse más en satélites y sondas espaciales (Gordon & Brown, 1972).

Ya para 1972, se habló de los avances que se realizaron para los magnetómetros fluxgate, donde se comenta que el fluxgate es un dispositivo capaz de medir campos magnéticos, utilizando características magnéticas no lineales (I. Gordon, E. Brown, & F. Haben, 1972). En el mismo artículo se comenta la primera aparición del sensor Fluxgate el cual fue en 1930 utilizado para la detección de submarinos en la segunda guerra mundial, para la prospección de minerales y, posteriormente, para mediciones magnéticas en el espacio exterior. En 1945, se comenzó a utilizar para aplicaciones

espaciales. Gordon también asegura en su artículo, que el magnetómetro es muy estable para medir campos de bajas frecuencias.

En 1982 Lester y su equipo de trabajo escribieron un artículo en el cual muestran el desarrollo de un sistema de adquisición de datos portátil, usando un magnetómetro fluxgate de baja potencia. El sistema está compuesto por un sistema de procesamiento de datos que contenía un microprocesador de baja potencia, una grabadora de cinta digital de 9 pistas y un paquete de baterías recargables. El magnetómetro tenía un diseño de tres ejes de baja potencia, El sistema, incluido el magnetómetro, usaba 1.6, W de potencia y podía almacenar 5.7 Mbyte de datos.

El sistema desarrollado por Lester y su equipo resulto ser muy útil en su época; aunque para los tiempos actuales es insuficiente. No obstante, logro demostrar que es posible y necesario hacer sistemas compactos que apoyen en las mediciones geomagnéticas. Cabe destacar que este dispositivo utilizaba un magnetómetro fluxgate y los rangos de escala completa disponibles eran de $\pm 50\,000$ nT, $\pm 10\,000$ nT, $\pm 1\,000$ nT y ± 100 nT, cada uno con una salida de escala completa de ± 5 V (Medford, MacLennan, Rosenfeld, Lanzerotti, & Acuna, 1981).

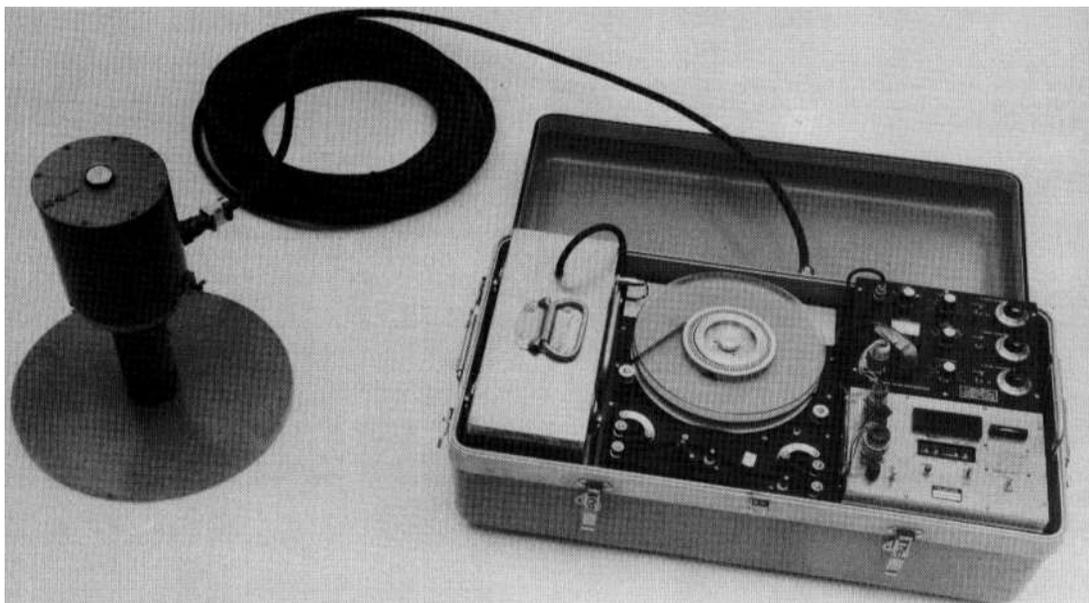


Figura 1.1 Prototipo desarrollado en 1981 (Medford et al., 1981).

Mientras en 1986 los científicos Johnston y Mueller notaron las compensaciones del campo magnético coincidiendo con el Terremoto de North Palm Springs que ocurrió en el sur California cerca de la falla de San Andrés. Para lo anterior, una serie conectada de 24 magnetómetros de protones fue instalada a lo largo de la falla de San Andrés desde 1976. Y lograron observar desplazamientos sismo magnéticos de 1,2 y 0,3 nano tesla (Nt) a una distancia epicentral de 3 y 9 kilómetros, respectivamente, después del terremoto del 8 de julio de 1986 de magnitud 5.9 en el norte de Palm Springs. Estas observaciones sismo magnéticas son las primeras que se obtienen de este efecto elusivo pero esperado durante mucho tiempo. Los datos son consistentes con un modelo sismo magnético del terremoto para el cual se asume una ruptura lateral derecha de 20 centímetros en un segmento de 16 kilómetros de la falla de Banning entre las profundidades de 3 y 10 kilómetros en una región con una magnetización promedio de 1 amperio por metro. Las explicaciones alternativas en términos de efectos electrocinéticas y redistribución de la carga electrostática generada por un terremoto parecen improbables porque los cambios son permanentes y completos dentro de un período de 20 minutos (Johnston & Mueller, 1987). Después de lo anterior, se tuvo pequeños avances menores pero no fue hasta 1996 que se obtuvo evidencia positiva de cambios ULF pre sísmicos en el terremoto de 1996 de Kagoshima, donde hubo una correlación entre el nivel de anomalía magnética ULF y el de la actividad sísmica regional (Uyeda, Nagao, & Tanaka, 2004).

En 1999 se lanzó el satélite brasileño SACE-1, el cual tenía un magnetómetro de tres ejes (eje X, eje Y, eje Z), con una frecuencia de 10 Hz, con el cual en el 2000 Trivedi, demuestra que es posible utilizar un magnetómetro fluxgate en satélites. Puesto que su objetivo fue el estudiar las corrientes alineadas en el campo del ovalo aural, y el electro jet de la Ionosfera Ecuatorial, junto con los datos geomagnético de la órbita polar (Trivedi et al., 2000). Ya en el 2004 se comienza a ver un cambio en la comunidad científica como mencionan Grinsted, Moore, y Jevrejeva en su artículos los cuales comentan que se considera con mucha aceptación el uso de señales ULF como precursores de terremotos (Grinsted, Moore, & Jevrejeva, 2004).

Siguiendo la evolución de las tecnologías, en el artículo llamado “Magnetic Sensors and Their Applications”, se habla de cómo los sensores magnéticos han ayudado a la humanidad a analizar y controlar miles de funciones durante muchas décadas.

Los sensores magnéticos se pueden clasificar de acuerdo con si miden el campo magnético total o las componentes vectoriales del campo magnético. Las técnicas utilizadas para producir ambos tipos de sensores magnéticos abarcan muchos aspectos de la física y la electrónica.

El documento comenta que los sensores se dividen en dos magnetómetros vectoriales y magnetómetros escalares, Magnetómetros vectoriales Hay varios problemas que afectan a la mayoría de los sensores vectoriales. Primero, casi todos los magnetómetros vectoriales sufren ruido, otro problema importante con los magnetómetros vectoriales, que se ven afectados por las vibraciones de rotación.

En los magnetómetros vectoriales habla de:

- Magnetómetro de bobina.
- Magnetómetro fluxgate.
- Magnetómetro superconductor.
- Sensor de efecto Hall.
- Magnetómetro magneto resistivo.
- Transistores Spin-Valve.
- Magneto impedancia gigante.
- Magneto diodo.
- Magneto transistor.
- Magnetómetros magnetostrictivos.
- Sensor Magnetóptico.
- Magnetómetros basados en MEMS.
- Magnetómetros de campo total.

Los magnetómetros de campo total tienen la importante ventaja de la insensibilidad a las vibraciones de rotación. Lo malo es que no suelen poder muestrear a altas frecuencias(Lenz & Edelstein, 2006).

Y en estos magnetómetros se habla de:

- Optically Pumped Magnetometer.
- Nuclear-Precession Magnetometer.
- Overhauser Magnetometer.

Ya en 2007 sismólogos chinos logran predecir con cierta veracidad el terremoto que sacudió la ciudad de Haicheng con numerosos estudios de precursores incluidos señales Geo eléctricas (Poirier et al, 2007). En el artículo "The THEMIS Fluxgate Magnetometer", hablan del magnetómetro THEMIS el cual mide el campo magnético de fondo y sus fluctuaciones de baja frecuencia (hasta 64 Hz) en el espacio cercano a la Tierra. La MGF es capaz de detectar variaciones en el campo magnético con amplitudes de 0.01 nT, y está especialmente diseñada para estudiar las reconfiguraciones bruscas de la magnetosfera de la Tierra durante la fase de inicio de la sub tormenta, todo esto con el uso de un magnetómetro fluxgate (Auster et al., 2008).

Y siguiendo los avances del magnetómetro fluxgate, en el artículo "Miniaturized digital fluxgate magnetometer for small spacecraft applications" presentan un diseño novedoso de un magnetómetro digital de fluxgate de medición para el campo terrestre, donde se comenta que gracias a diferentes tecnologías lograron un diseño más compacto del sensor, y, también lograron la frecuencia de excitación de 8kh, este sensor a su vez decidieron conectarlo a una FPGA.

La señal de captación se digitaliza después de la amplificación y el filtrado. Los valores de las corrientes de compensación para cada uno de los ejes se determinan mediante un algoritmo de correlación digital, equivalente a un filtro combinado, y se alimentan a una modulación de ancho de pulso híbrido / delta-sigma convertidor digital a analógico que conduce las corrientes a través de las bobinas de compensación. Se comenta que el diseño del sistema se hizo con componentes comerciales, fáciles de conseguir y de costo no tan elevados. Y por último cabe destacar que este sistema fue diseñado para utilizarse en satélites(Forslund et al., 2008).

En 2009 Hemshorn, Auster, y Fredow describen que al reemplazar el sensor de fluxgate de un solo eje por un sistema de tres ejes, se puede usar información magnética adicional

para mejorar significativamente la medición absoluta sin cambiar el procedimiento estándar. También se habla de los beneficios de los sensores fluxgate, y sus usos primordialmente en el área aeroespacial(Hemshorn, Auster, & Fredow, 2009) .

Y dice que por ejemplo como ventajas tiene:

- Reducción de errores aleatorios.
- Separación de errores fatales.
- Detección de errores sistemáticos

Mientras que en 2010 en el artículo “A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup” hablan de un sistema creado para la medición del campo terrestre, el sistema utiliza un magnetómetro fluxgate y por medio de un circuito integrado se controla el sistema y manejan la comunicación a una computadora la cual almacena y trata la información obtenida, también comentan que no solo el sensor puede leer la amplitud del campo magnético de la tierra, sino que también su dirección(Baschiroto et al., 2010).

Mientras en 2010 se analizaron perturbaciones magnéticas, en la zona de san juan argentina. Para esto se instaló una estación permanente para el registro de la componente total del campo magnético terrestre. Esta estación contiene un sistema Overhauser GSM 19 el cual pertenece a la universidad de san juan. La estación tiene las coordenadas geográficas 31° 32' 43" de latitud Sur y 68° 41' 03" de longitud Oeste.

En esta estación se utilizó un magnetómetro fluxgate de 3 ejes, el cual está muestreando cada 10 segundos, la estación estaba funcionando desde el 2007. Ellos realizaron un análisis sobre sismos con magnitud superior a 3, desde el día 11/4/2010 al 27/07/2011. Trabajando con 107 eventos localizados a distancias epicentrales de 100 km aproximadamente. La metodología empleada consistió en comparar los magnetogramas obtenidos con datos de otras estaciones, de zonas no perturbadas. Según sus datos ellos encontraron que el 70 % de los sismos con magnitud superior a 4 presentan perturbaciones magnéticas previas al evento, observables desde pocos minutos hasta varias horas antes del mismo (Ruiz et al., 2011). Y en Japón detectaron ondas electromagnéticas directamente excitadas por terremotos, mediante la captura

simultaneas de las ondas del componente magnéticos de los pulsos (Tsutsui, 2014), mientras en 2014 lograron un preanálisis de señales magnéticas extremadamente baja para predecir terremotos que se producen debido a las tensiones acumuladas en las placas tectónicas previas a los eventos sísmicos (Jashank, Gupta, & Nair, 2014). Basándose en lo anterior se desarrolló un nuevo enfoque para encontrar una fuente o precursor de actividad electromagnética para eventos sísmicos (Dudkin et al., 2015). Por otro lado en 2015 se logró observar que las tormentas geomagnéticas pueden perturbar grandes territorios en el planeta debido a las corrientes eléctricas atmosféricas que están relacionadas con el campo geomagnético (Joseph et al., 2015).

Mientras en 2015 J. Amezquita, O. Chavez, y J. Millán Desarrollan y proponen nuevos métodos para la detección de actividad sísmica (Alegria et al., 2015), Para esto ellos tomaron varias señales sísmicas de baja frecuencias, y analizaron periodos de actividad sísmica y periodos de calmas aleatorios, estas señales se obtuvieron de un magnetómetro fluxgate triaxial ubicado en la estación de Juriquilla, y el objetivo de ellos era mostrar las ventajas de su método con comparación al método más clásico de detección el cual es la transformada discreta de wavelet (DWT). Para eso, ellos tomaron 3 eventos sísmicos ocurridos entre agosto de 2009 a junio de 2010.

La técnica de transformada de wavelet empírica (EWT), la cual es una transformada adaptativa, capaz de descomponer una serie de señales en tiempo $x(t)$ en sub-bandas adaptativas en tiempo-frecuencia, basándose en la información de frecuencia contenida, a diferencia de las DWT, donde las sub-bandas calculadas dependen del tiempo de frecuencia de muestreadas.

Para la segmentación de la señal se puede utilizar Fourier, o realizarla manualmente. En la primera se calculan los máximos del espectro de Fourier $x(\omega)$, seguido los límites de ω_i de cada segmento se definen como el centro de los dos máximos consecutivos, por lo tanto, el apoyo de Fourier $[0, \pi]$ se segmenta N en conjuntos contiguos o bandas de frecuencia.

Mientras que por otro lado si se calcula manualmente, los límites de los filtros pueden ser manipulados por el usuario.

En ambas segmentaciones, cada banda de frecuencia se indica con:

$$\Lambda_n = \omega_n \pm \tau_n, \quad \omega_n \in \Lambda_n = [\omega].$$

(1.1)

La fase de transición de ancho $2\tau_n$ se define para obtener un marco ajustado alrededor de cada ω_n .

Las EWT se definen por un paso bajo representado por LPF $\phi_n(\omega)$ y N filtros pasa bandas $\psi_n(\omega)$ representado por cada BPF correspondiente a la aproximación y los detalles de componentes en cada Λ_n . Siguiendo la idea utilizada para derivar la wavelet de Meyer, define la función de escala empírica para estimar los coeficientes de filtro de wavelet de paso bajo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\phi_n = \begin{cases} \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\tau_n} (|\omega| - \omega_n + \tau_n) \right) \right] & \text{si } \omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n \\ 1 & \text{si } |\omega| \leq \omega_n - \tau_n \\ 0 & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$$

(1.2)

Y la función EWT, para construir los filtros de paso banda $N-1$:

$$\psi_n(\omega) = \begin{cases} \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\tau_{n+1}} (|\omega| - \omega_{n+1} + \tau_{n+1}) \right) \right] & \text{si } \omega_{n+1} - \tau_{n+1} \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} + \tau_{n+1} \\ \sin \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\tau_n} (|\omega| - \omega_n + \tau_n) \right) \right] & \text{si } \omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n \\ 1 & \text{si } \omega_{n+\tau_n} \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} - \tau_{n+1} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$$

(1.3)

donde $\beta(x)$ es una función polinómica tomada como $\beta(x) = x^4(35 - 85x + 70x^2 - 20x^3)$
 Después de haber construido los filtros wavelet, la señal $x(t)$ se descompone en una frecuencia diferente a través de la onda empírica transformada definida por:

$$W_f^\varepsilon(n, t) = F^{-1}(x(\omega)\psi_n(\omega)) \quad (1.4)$$

$$W_f^\varepsilon(0, t) = F^{-1}(x(\omega)\phi_n(\omega)) \quad (1.5)$$

Donde $W_f(n, t)$ y $W_f(0, t)$ se obtienen por los productos internos de la señal con las ondas empíricas de paso baja y filtros de pasa banda, respectivamente, y F^{-1} es la transformada inversa de Fourier.

En 2016 Se hizo una correlación de las señales Geo electromagnéticas para el estudio de terremotos en las regiones de indonesia, Australia y el pacífico (Kanata et al., 2016), para lograr su objetivo tomaron los registros en observatorios indonesios en Lombok (LOK), Kupang (KPG) y Pelabuhan Ratu (PLR), en Australia en Kakadu (KDU) y en Pacífico en Guam (GUA). Usaron el método de correlación de Spearman Rho para determinar la fuerte de la relación entre los datos geométricos, la fórmula de Spearman Rho es:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum b_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1.6)$$

También en 2017 se analizaron anomalías asociadas a la actividad sísmica en señales geomagnéticas de bajas frecuencias (ULF) utilizando el método de descomposición de modo empírico (EMD) y Teoría de la dimensión fractal (FD) (Sanchez et al., 2017), el método EMD, se aplica como técnica de preprocesamiento, donde el objetivo es eliminar el ruido de fondo y resaltar los componentes de frecuencia no visible, mientras que el FD, se aplican 3 algoritmos, Katz, Higuchi y Box. Los cuales se aplican de manera separada

para evaluar que algoritmo proporciona la información más relacionada con las anomalías en las señales geomagnéticas.

El método EMD es un método adaptivo usado para descomponer una señal en el dominio del tiempo en IMFs mediante un proceso llamado sifting, el cual puede ser calculado de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Identificar los puntos máximos y mínimos de la señal.
2. Usar la interpolación de splines cúbicas para construir la envolvente superior (puntos máximos) y la envolvente inferior (puntos mínimos).
3. Calcular h_1 como la primera componente:

$$h_1 = x(t) - m_1 \tag{1.7}$$

Donde $x(t)$ es la señal original y m_1 es la media de las envolventes obtenidas en el punto 2.

4. Se verifica si h_1 satisface las condiciones de una IMF las cuales son:
 - a. el número de extremos y el número de cruces por cero debe ser igual o diferente a lo mucho por uno.
 - b. la media debe ser cero;

Si esto se cumple, entonces se toma como la primera IMF. Pero si no es una IMF, llamarla IMF prototipo, considerarla como la señal de entrada en (1), y repetir los primeros tres primeros pasos.

5. Calcular el residuo de:

$$r_1 = x(t) - h_1 \tag{1.8}$$

6. Tratar r_1 como la señal original y repetir desde el paso 1 hasta el paso 4, para obtener las IMFs restantes. Finalmente, la descomposición de la señal queda como:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) + r_n \quad (1.9)$$

Donde n es el número de IMFs.

Desde un punto de vista geométrico, el valor de FD es una medida de auto similitud en una señal; por lo tanto, esta idea puede ser aplicada a detectar anomalías que suceden en una señal durante la actividad sísmica en las señales geomagnéticas ULF. Por otro lado, a pesar de que la geometría de una señal adquirida ya no cambia, hay diferentes algoritmos que pueden interpretar la irregularidad y la auto similitud en un modo diferente; por lo tanto, tres algoritmos llamados KFD, HFD, y BD para evaluar el valor de FD de una señal geomagnética son estudiados.

1. Algoritmo de Katz:

En particular, el algoritmo de Katz se enfoca en la variación de las distancias entre puntos sucesivos puede medir la FD de una señal como sigue:

$$KFD = \frac{\ln\left(\frac{L}{a}\right)}{\ln\frac{d}{a}} \quad (1.10)$$

$$L = \sum_{i=0}^N |x_i - x_{i-1}| \quad (1.11)$$

$$a = \frac{L}{(N - 1)} \quad (1.12)$$

Donde L y a son la suma y el promedio de las distancias entre muestras sucesivas de la señal en el tiempo x con N muestras, respectivamente, y d es la distancia máxima entre la primera muestra x_1 y la muestra x_i .

2. Algoritmo Higuchi.

El algoritmo de Higuchi calcula el valor de FD de una señal en el tiempo mediante los siguientes pasos:

- a. A partir de la señal x , construir k nuevas señales sub muestreadas:

$$x_m^k = \left[x_m, x_{m+k}, x_{m+2k}, \dots, x_{m+\left[\frac{N-m}{k}\right]k} \right], m = 1, 2, \dots, k \quad (1.13)$$

Donde m y k son números enteros que determinan el retraso de tiempo inicial entre muestras sucesivas, respectivamente, y $\lfloor \cdot \rfloor$ Representa la parte entera de un valor específico.

- b. Calcular el largo de cada secuencia x_m^k como sigue:

$$L_m(k) = \frac{N-1}{k \left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} |x_{m+ik} - x_{m+(i-1)k}| \quad (1.14)$$

Donde $k \left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor$ representa el factor de normalización para cada secuencia.

- c. Calcular el largo total promedio:

$$L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k L_m(k) \quad (1.15)$$

- d. Hay que considerar que $k \in [1, L_{max}]$, es un número elegido cuando la pendiente de la mejor línea ajustada para $L(k)$ versus $1/k$ trazada en un plano log-log permanece constante. La pendiente indica el valor HFD.
3. Algoritmo BD.

Para una señal, el valor de BD puede ser calculado como sigue:

$$BD \cong - \frac{\ln \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{|x_{i+1} - x_i|}{\Delta t} \right)}{\ln (\Delta t)} \quad (1.16)$$

Donde N es el número de muestras, x_i para $i=1 \dots N-1$ son las muestras de la señal y Δt es el intervalo de muestreo.

Por ultimo siguiendo su trabajo presentan un análisis de señales del campo eléctrico atmosférico para un periodo sísmico de 2012 a 2015, aplicando transformada de wavelet discreta (DWT) Para señales de campo eléctrico con eventos sísmicos de magnitudes mayores a 5.5 (Chavez et al., 2018). Para esto tomaron datos de diferentes sistemas, procesando 12 antes y 12 horas después del terremoto, después de tener los resultados individuales, realizaron un algoritmo estadístico de post procesamiento para cuantificar los datos.

Utilizaron el algoritmo DWT, siendo Daubechies el más recomendados para el análisis de ULF (Jach et al. 2006; Huang et al. 2016), Teniéndolo en cuenta, seleccionaron 10 como la base de la función wavelet, para trabajar de la banda D1 a la D7.

Finalmente, para evaluar los resultados de los diferentes terremotos, aplicaron el análisis estadístico para obtener la varianza (V_{DL}):

$$V_{DL} = \frac{1}{b-a} \sum_{n=a}^b \{(y_{dl}(n) - \bar{y})^2\} \quad (1.17)$$

1.5 Hipótesis

Es posible detectar precursores sísmicos asociados a señales geo - electromagnéticas utilizando un sistema embebido de hardware-software abierto y de bajo costo con capacidad de adquisición de datos en línea provenientes de un magnetómetro de tipo fluxgate y algoritmos de procesamiento de señales en tiempo-frecuencia.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Sistemas embebidos.

Un sistema embebido es un sistema mínimo electrónico diseñado para realizar una o pocas tareas, por ejemplo, el control de la TV es un tipo de dispositivo embebido, por esto mismo, los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas.

En estos sistemas normalmente la mayoría de sus elementos están integrados en una misma placa base, e incluso en muchas cosas que se utilizan a diario, se tiene varios sistemas embebidos trabajando en conjunto, para lograr un fin.

Muchos de los sistemas embebidos comparten las siguientes características:

- Tienen una unidad de procesamiento, la cual se encarga de procesar y ejecutar las tareas necesarias.
- Una memoria interna, ya sea para guardar datos temporalmente, como también la memoria donde se almacenan las instrucciones o programa del sistema.
- Periféricos, con los cuales el sistema embebido puede interactuar, con otros dispositivos y el mundo real.

2.1.1 Microcontroladores.

Un microcontrolador es un circuito integrado digital, y es componente principal de una aplicación embebida. Incluye sistemas para controlar elementos de entrada/salida. También incluye un procesador y memoria que puede guardar el programa y sus variables (flash y RAM). Está compuesto por una unidad central de proceso (CPU), memorias (ROM y RAM).

2.1.2 FPGA.

Es una Matriz de puertas programables (del inglés field-programmable gate array). son dispositivos digitales que son capaces de configurarse para prácticamente cualquier aplicación, son muy rápidos, son capaces de trabajar muchos procesos en paralelo.

Internamente contiene compuertas y FLIP-FLOPs. Todo ello sin conectar, como una plantilla en blanco, las únicas limitantes son la frecuencia y la cantidad de compuertas. Teniendo en cuenta se puede crear un archivo generado a partir de la descripción del circuito. Todo gracias a su arquitectura programable.

2.1.3 SBC.

Single Board Computer o Pc de placa única, son placas que contienen todos o la mayor parte de los componentes de una computadora.

Las principales características que comparten las diferentes SBC son sus reducidas dimensiones. Otra de las características de las placas SBC es su precio, Por lo general son de costo reducido. Aunque también al ser más reducidas, son de mucha menos potencia de cómputo que una PC, además que rara vez pueden ser actualizables, en cuestión de hardware (RAM, Procesador, Etc.) esto quiere decir que, en caso de daño de algún componente, o necesitar expandir alguno, se debe cambiar de SBC

2.1.4 Lenguajes de programación.

Los lenguajes de programación son un lenguaje formal con el cual el programador, puede utilizar una serie de instrucciones imbuidas en el lenguaje para escribir secuencias de órdenes y algoritmos, con el cual un sistema al seguir esta secuencia de órdenes, al cual se le llama programa, para lograr hacer una tarea, o varias tareas.

Estos lenguajes de programación están compuestos por símbolos, reglas semánticas y sintácticas, la implementación de un lenguaje de programación permite automatizar y desarrollar procesos.

En la actualidad existe diferentes tipos de lenguaje, aunque se caracterizan en tres diferentes niveles:

- Lenguajes de bajo nivel: estos son los cuales se asemejan más a como una máquina interpreta todo (código binario), estos lenguajes generalmente son dependientes de la máquina, esto quiere decir que si se cambia de dispositivo al cual se quiere programar, el código normalmente no es migrable, debido a que se trabaja a la medida del hardware programado.

- Lenguajes de mediano nivel: son lenguajes que están a mitad de camino del “lenguaje” maquina, y un lenguaje más interpretado, aunque se podría decir que es una línea delgada entre los mismos, en este tipo de lenguaje se podría mencionar el lenguaje C debido a su sencillez de instrucciones, y que con él es posible trabajar órdenes a bajo nivel como registros, uso de memoria, etc.
- Lenguajes de alto nivel: son aquellos lenguajes que están más cercanos al lenguaje natural de las personas y más alejado del “lenguaje” maquina, con estos lenguajes no se suele trabajar a bajo nivel, por lo que el usuario, no maneja registros, uso de memoria, etc. Normalmente el intérprete se encarga de todas estas tareas.

Alguno de los lenguajes más utilizados es:

1. Ensamblador.
2. C.
3. C ++.
4. PYTHON.

2.2 Magnetismo terrestre.

También llamado campo geomagnético, es el campo magnético que se extiende desde el núcleo interno de la Tierra hasta el límite en el que se encuentra con el viento solar; una corriente de partículas energéticas que emana del Sol. Su magnitud en la superficie de la Tierra varía de 25 a 65 μT

El campo geomagnético se caracteriza por ser dipolar, esto quiere decir que tienen dos polos, los cuales son el polo norte, y polo sur, aunque cabe destacar que el polo magnético no está ubicado exactamente en polo geográfico, por ejemplo, desde el primer descubrimiento formal en 1831 (Ross, 1835), el polo norte magnético ha viajado alrededor de 1.400 millas (2.250 km), actualmente se tiene que hacer un modelo magnético mundial cada 5 años, donde actualmente estamos en el periodo del 2015 al 2020 (Chulliat et al., 2015). El campo magnético terrestre tiene su máxima intensidad cerca a los polos magnéticos, pero al llegar al ecuador encontramos su punto mínimo.

La importancia del campo magnético terrestre es que, gracias a él, el planeta tierra esta mayormente protegido del viento solar, el cual son partículas cargadas exhaladas por el sol. Si estas partículas llegaran directamente a la tierra sin un campo magnético, destruirían la capa de ozono, lo cual posiblemente dejaría la tierra estéril gracias a las grandes radiaciones solares que entrarían al planeta.

2.3 Sensores.

2.3.1 Conversores Analógico Digital (ADC).

Los conversores analógico digital son dispositivos que transforman señales analógicas en señales digitales, estas señales digitales, normalmente se entregan en código binario mediante algún protocolo de comunicación.

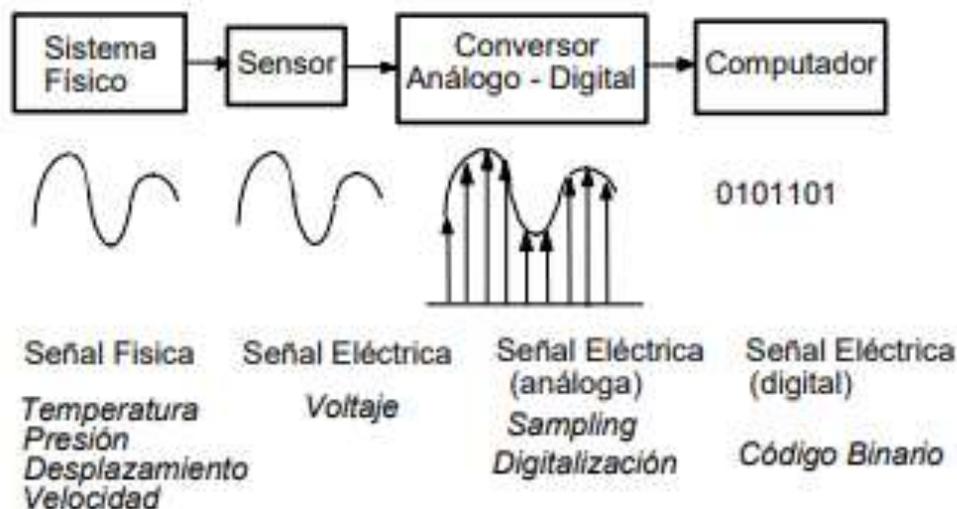


Figura 2.1 Conversión analógico – digital (Huircán, 2007).

Los conversores ADC dependen de las siguientes características estáticas (Huircán, 2007):

1. Resolución.
2. La linealidad integral y el de linealidad diferencia.
3. Monotonicidad.

4. El error de ganancia, el error de Desplazamiento (offset) y el error de cuantificación.
5. Velocidad.

Como también dependen de las siguientes características dinámicas(Huircán, 2007):

1. Tiempos de conversión.
2. Tiempo de adquisición.
3. Tiempo de asentamiento.
4. Slew rate.

La idea de todo ADC es llegar al reflejo más exacto posible del valor analógico medido, para esto se utilizan gran número de métodos para convertir señales analógicas a la forma digital, los que más usados son: Rampa de escalera, aproximaciones sucesivas, paralelo (flash), doble rampa, voltaje a frecuencia, tipo serie (Huircán, 2007).

2.3.2 Magnetómetro fluxgate

El magnetómetro de fluxgate es un sensor de campo magnético para campo magnético vectorial. Su rango normal es adecuado para medir el campo de la Tierra.

Los diseños del magnetómetro de fluxgate se dividen en dos estilos, los que emplean núcleos de varilla y los que usan núcleos de anillo.

Todas las compuertas de flujo utilizan un núcleo altamente permeable que sirve para concentrar el campo magnético a medir. El núcleo está saturado magnéticamente alternativamente en direcciones opuestas a lo largo de cualquier eje adecuado, normalmente por medio de una bobina de excitación accionada por una forma de onda sinusoidal o cuadrada(Gordon & Brown, 1972).

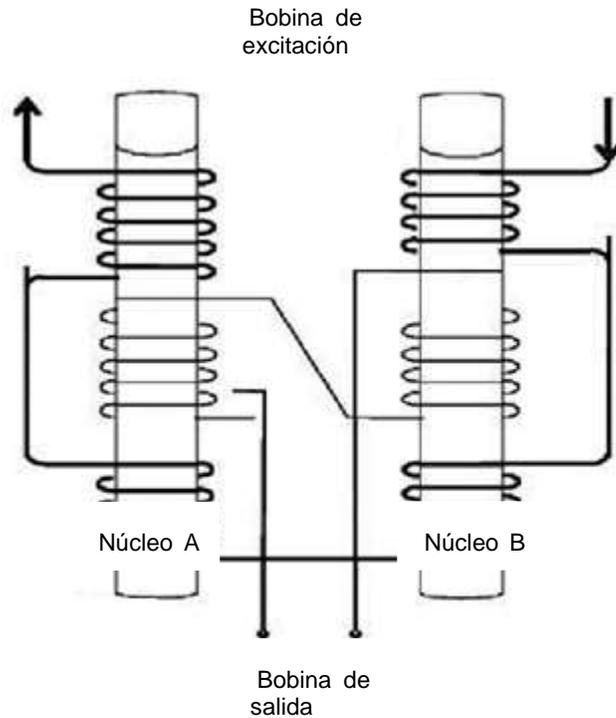


Figura 2.2 Representación interna magnetómetro fluxgate.

2.4 Filtros

Cuando se trabaja obteniendo señales, en la mayoría de los casos, estas señales están mezcladas con otras señales que no son de interés, al cual comúnmente se le conoce como ruido, por el cual no es posible distinguir la señal de interés, de modo simple.

Por lo anterior se comenzó a buscar la forma de separar las señales útiles de las que no eran de utilidad. Y para esto se dieron dos soluciones primarias, los primeros son los filtros electrónicos y los segundos los filtros digitales.

2.4.1 Filtros electrónicos

Los filtros electrónicos son elementos que están en el propio circuito el cual selecciona o atenúa una frecuencia o rango de frecuencias.

En los filtros electrónicos existen diferentes tipos de filtros:

- Filtros pasivos: son los más básicos, basados en resistencias, inductores, bobinas y capacitores.

- Filtros activos: aunque tiene la misma finalidad que los anteriores, si salida puedes representar una parte o toda la señal de entrada, el componente más conocido en este tipo de filtros, son los amplificadores operacionales.

2.4.2 Filtros digitales

Un filtro digital es aquel que opera sobre señales digitales, como por ejemplo señales analógicas las cuales se digitalizaron, básicamente a un vector de datos, se le aplica una ecuación matemática, la cual modificar el vector inicial, lo que ayuda a resaltar y/o atenuar ciertos fenómenos de interés, los filtros más básicos y usados son los siguientes:

Filtro pasa bajas:

es un tipo de filtro el cual permite el paso de bajas frecuencias y atenúa las frecuencias más altas. Es uno de los filtros más sencillos

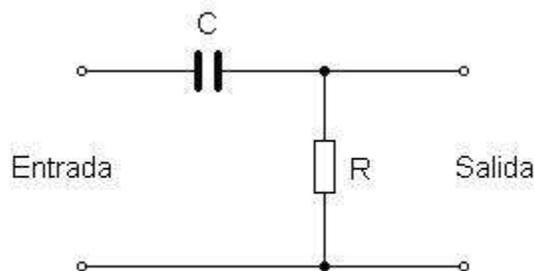


Figura 2.9 filtro eléctrico pasa bajas.

Filtro pasa alta:

Es un tipo de filtro el cual permite el paso de altas frecuencia y atenúa las frecuencias más bajas.

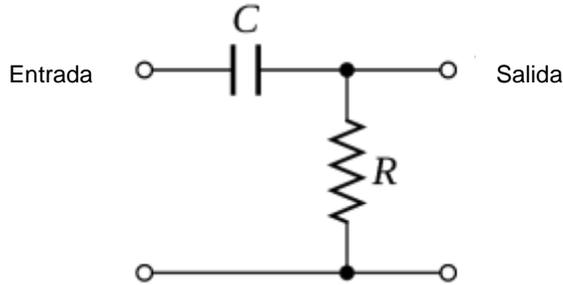


Figura 2.10 Filtro eléctrico pasa altas.

Filtro pasa bandas:

Este tipo de filtro permite el paso de un rango de frecuencia, atenuando las frecuencias más altas y bajas del rango elegido.

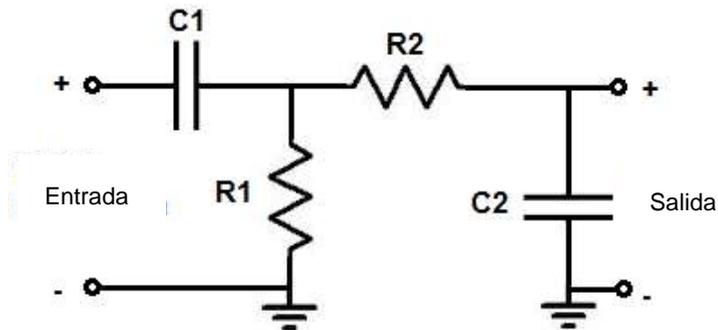


Figura 2.11 Filtro eléctrico pasa banda.

Filtro de rechazo de banda:

También llamado filtro notch, se utiliza para no permitir el paso de frecuencias específicas, se podría decir que simplemente no permite el paso de señales que estén entre la frecuencia de corte superior e inferior.

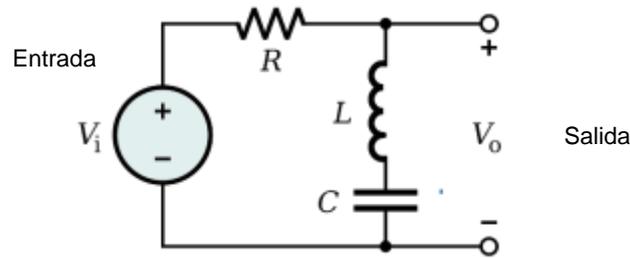


Figura 2.12 Filtro de rechazo de banda.

Además de lo anterior, se pueden clasificar los filtros digitales en dos los FIR y los IIR:

Filtro FIR:

Son aquellos filtros que tienen una respuesta finita al impulso, y suelen ser sistemas no recursivos, esto quiere decir que no retroalimentan su entrada, se puede decir que su salida es una combinación lineal de las entradas presentes y pasadas, se puede caracterizar con la siguiente ecuación:

$$y \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k)$$

(2.1)

La principal ventaja de los filtros FIR, frente a los IIR es que son estables

Filtro IIR:

Son sistemas de respuesta infinita al impulso, esto quiere decir que tiene una retroalimentación de la señal de salida, y por eso son filtros recursivos, y por lo tanto poseen una respuesta al impulso infinito, por lo que nunca llegan a estado de reposo.

Su ecuación es:

$$y|n| = \sum_{k=0}^{L-1} a[k]x[n-k] + \sum_{k=1}^{L-1} b[k]y[n-k]$$

(2.2)

Por lo tanto, su función de transferencia tiene la forma de:

$$F(Z) = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} a[k]z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^{L-1} b[k]z^{-k}}$$

(2.3)

2.5 Conversión analógico digital.

Se trata de un proceso en el cual una señal analógica, se traduce a una señal digital, para que pueda ser utilizada en sistemas digitales, lo anterior quiere decir que, de los impulsos eléctricos, se convierte a una sucesión de números binarios.

Para digitalizar la señal se tienen que hacer los siguientes pasos:

1. Muestreo.
2. Cuantización.
3. Codificación.

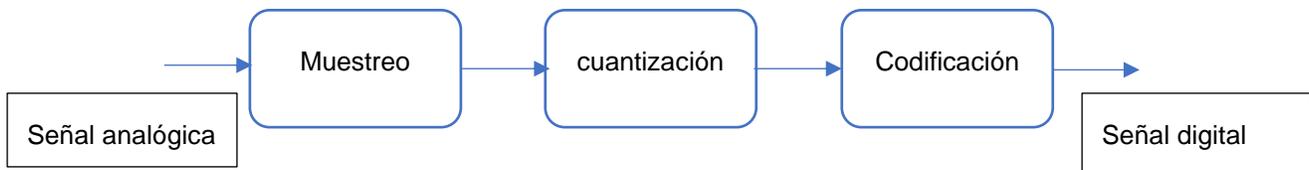


Figura 2.14 Diagrama de proceso de conversión de señal analógica a digital.

Algo que puede afectar mucho la calidad de la conversión es la resolución del sensor utilizado. La resolución se refiere al mínimo incremento de la entrada que da un cambio medible en la salida, esto quiere decir que si se tiene un sensor con una resolución de 8 bits podremos tomar muchas menos medidas que si tenemos un sensor de 16 bits.

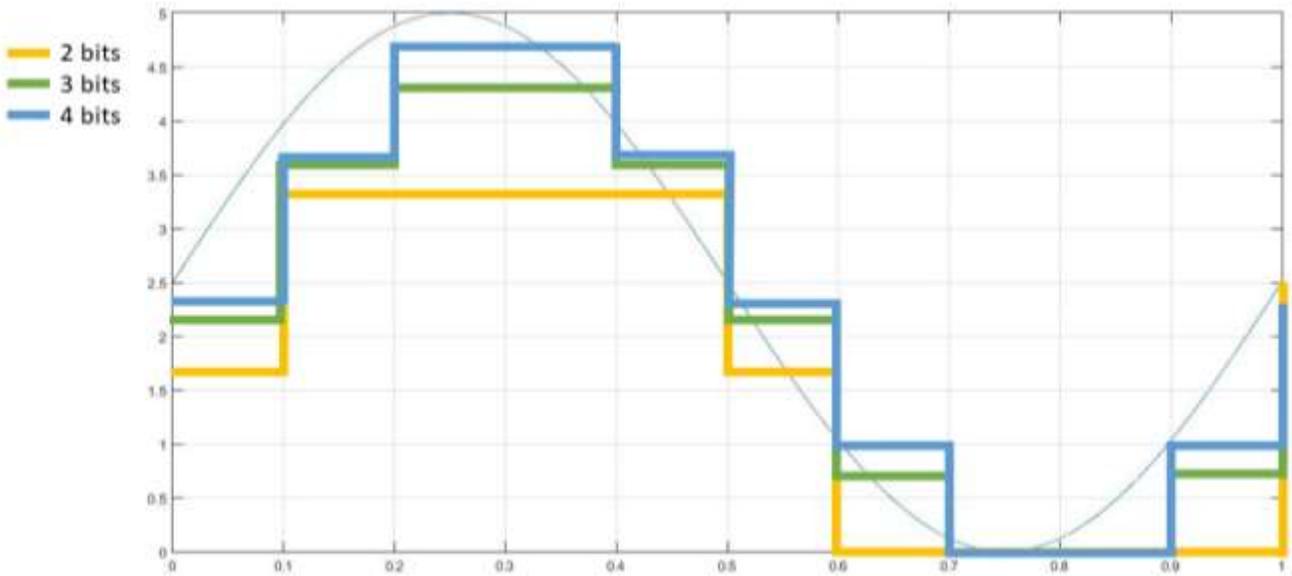


Figura 2.15 Comparación de Señales digitalizadas (RODRÍGUEZ, 2019).

Como se puede apreciar en la imagen anterior, se comparan 3 diferentes resoluciones, y a medida que se tiene más bits de resolución, se puede tener un mejor muestreo de la señal.

2.6 Interfaces de comunicación.

Una interfaz de comunicación es la conexión física que se da entre dos dispositivos diferentes, normalmente esta comunicación va de un dispositivo central a sus periféricos, aunque también se pueden comunicar entre periféricos.

Existen diferentes tipos de comunicación las cuales pueden ser:

1. Comunicación paralela:

En este tipo de comunicación, los datos se envían paralelamente, esto quiere decir que se envía varios bits simultáneamente por diferentes canales o líneas de comunicación.

2. Comunicación serie.

También llamada comunicación secuencial, es otro tipo de comunicación entre dispositivos, a diferencia de la comunicación paralela la cual envía un paquete de bits

simultáneamente. Una de las grandes ventajas de este tipo de comunicación es que no requiere gran cantidad de canales entre dispositivos.

En la comunicación serial, se manejan conexiones Full-duplex, Duplex y Simplex.

- Full-duplex: en este tipo de conexión se tiene canales separados de envío y recepción de datos, lo que permite enviar y recibir datos entre dispositivos simultáneamente.

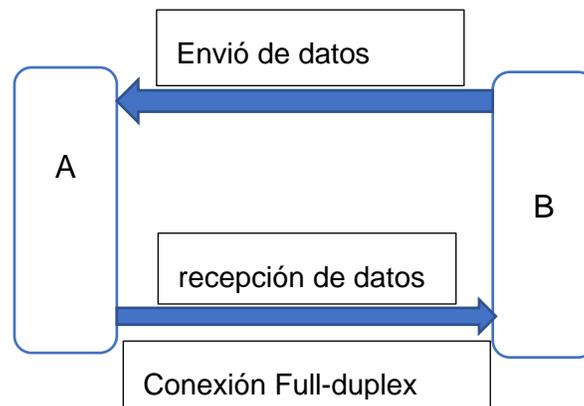


Figura 2.17 Diagrama conexión full-dúplex.

- Duplex: en esta configuración, se permite el envío y recepción de datos, mas solo se puede hacer una de las dos operaciones al a vez, esto quiere decir que solo se envía o solo se reciben datos en un mismo tiempo

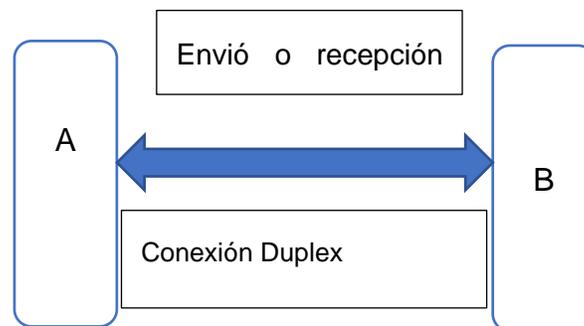


Figura 2.18 Diagrama conexión Duplex.

- Simplex: en este tipo de conexión, solo se permite o el envío de datos, o la recepción, no se puede cambiar o alternar el modo, esta es la conexión más sencilla de todas, pero también la más restrictiva.

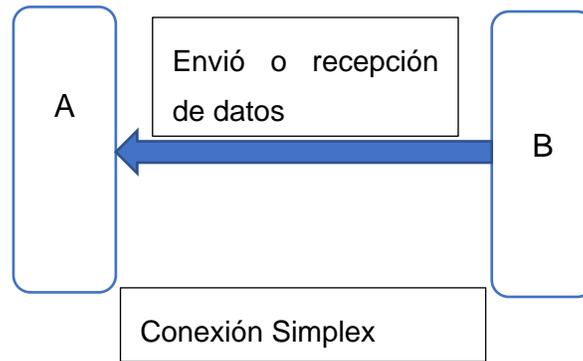


Figura 2.19 Diagrama conexión Simplex

Síncrona:

En este tipo de comunicación los dispositivos interesados en la comunicación tienen que sincronizar sus relojes antes de que comience una transacción, además de lo anterior. Y una vez terminado el envío de datos, el receptor envía una trama de confirmación de recepción.

- Asíncrona:

La comunicación asíncrona, se caracteriza porque no sincronizan sus relojes antes de la comunicación, en este caso el emisor enviara los datos, pero no se detiene a esperar la respuesta del receptor.

Los protocolos de comunicación más utilizados son:

- UART:

Es un puerto serie de hardware, UART significa Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, esto quiere decir que es un tipo de comunicación asíncrona, e incluso si nos damos cuenta en la siguiente imagen, no tenemos canal de sincronización de reloj.

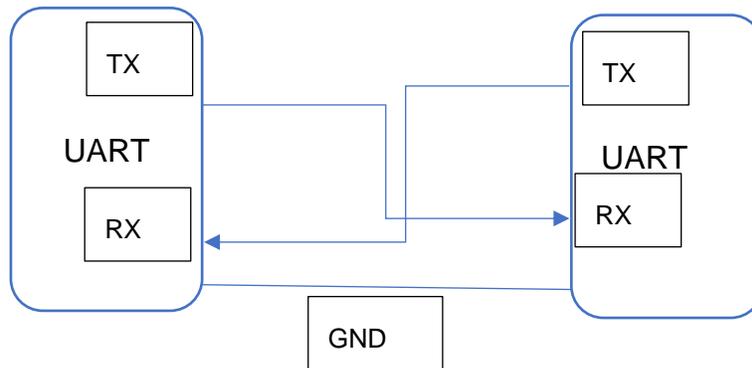


Figura 2.20 Diagrama UART.

Este protocolo comprende de 3 líneas únicamente:

- RX: La cual es la línea que recibe los datos del transmisor.
- TX: Encargada de enviar los datos al receptor.
- GND: En esta línea se interconectan los GND de los dos dispositivos, esto es para obtener el mismo voltaje lógico entre ambos.

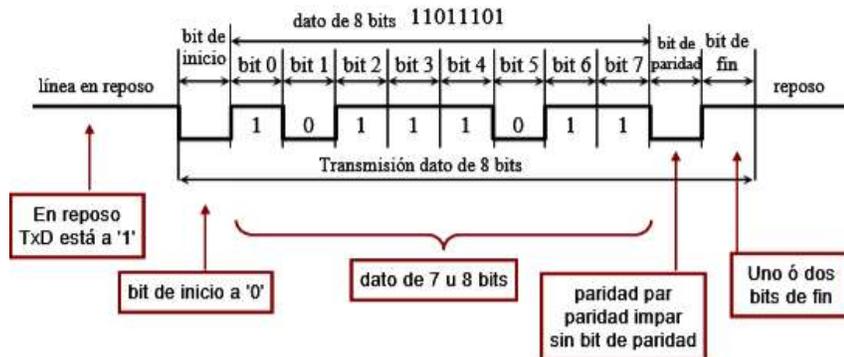


Figura 2.21 Transferencia de datos UART” (Machado Sánchez & Borromeo López, 2010).

- SPI:

Spi es el acrónimo de protocolo de comunicación serial (“Serial Peripheral Interface”), es un protocolo síncrono, por lo que lleva un canal exclusivo para la sincronización del reloj.

Los canales necesarios para operar el protocolo SPI son los siguientes:

- o SCLK: es el canal encargado de la sincronización del reloj.

- MOSI: Máster Output Slave Input, salida del maestro, entrada del esclavo.
- MISO: Máster Input Slave Output, entrada del maestro, salida del esclavo.
- GND: Se interconectan los GND de los diferentes dispositivos para tener el mismo voltaje lógico.
- SS: Slave Select, selector de esclavo, este canal se utiliza para “despertar” al esclavo, a diferencia de los anteriores, este canal es único por dispositivo esclavo, puesto que con él se selecciona el dispositivo, al cual el maestro entablara comunicación.

2.7 Análisis espectral.

El análisis espectral en una señal tiene como objetivo descomponer la señal en las diversas componentes dentro del dominio de la frecuencia, como resultado de este análisis se obtiene un espectrograma.

La transformada rápida de Fourier o FFT, es de los análisis espectrales más utilizados debido a su rapidez, aunque para entender cómo funciona la FFT, se necesita explicar un poco la DFT o transformada discreta de Fourier la cual es un tipo de transformada discreta.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi}{N}kn} \quad k = 0, \dots, N - 1$$

(2.4)

A sí mismo la transformada inversa de Fourier o IDFT es la siguiente:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{2\pi i}{N}kn} \quad k = 0, \dots, N - 1$$

(2,5)

Donde la única diferencia entre las dos ecuaciones anteriores es el factor de escala $\frac{1}{N}$ y el cambio del signo en la función exponencial.

Los cálculos de estas ecuaciones son pesados computacionalmente por lo cual se desarrollan las FFT.

La idea detrás de las FFT consiste en la división del tiempo, esto quiere decir, que se hace una descomposición iterativa de transformadas de Fourier discretas más simples, debido a esto la FFT hace uso de dos propiedades de la DFT. Se asume N es potencia de 2, por ejemplo 32, 1024, 4096, etc.

La ecuación de la FFT es:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (2.6)$$

La ecuación de la IFFT es:

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (2.7)$$

Donde: $\omega = e^{-\frac{2\pi i}{N}}$

En la siguiente tabla se puede apreciar la diferencia de complejidad computacional entre DFT y FFT.

Tabla 2.1 complejidad computacional DFT y FFT.

Número de Puntos N	Multiplicaciones Complejas en cómputo directo N^2	Multiplicaciones Complejas en algoritmo FFT $(N/2)\log_2 N$	Factor de velocidad mejorada
4	16	4	4.0
8	64	12	5.3
16	256	32	8.0
32	1,024	80	12.8
64	4,096	192	21.3
128	16,384	448	36.6
256	64,536	1,024	64.0
512	262,144	2,304	113.8
1,024	1,048,576	5,120	204.8

2.8 Transformadas wavelets

Las transformadas wavelets son herramientas matemáticas, con las cuales se es capaz de concentrar en fenómenos transitorios y de alta frecuencia, con un mejor resultado que la transformada de Fourier. Los Wavelets permiten representaciones de funciones en las cual se retiene tanto la escala como la información espacial. Muchas funciones pueden ser aproximadas con gran exactitud usando sólo un pequeño número de coeficientes wavelet.

La Transformada Wavelet no es necesariamente un método estadístico de reconocimiento de patrones, sino que es un método de pre-procesamiento que permite que los datos sean expresados más claramente.

Existen diferentes tipos de transformadas wavelets:

- Transformada wavelet continua o su abreviación "CWT".
- Transformada wavelet discreta o su abreviación "DWT".
- Transformada wavelet empírica o su abreviación "EWT".

2.9 Precursores sísmicos.

El concepto de precursor sísmico nació de la necesidad de encontrar una forma de poder predecir o prever los eventos sísmicos que pudieran suceder. Uno de los primeros conceptos en nacer fue la detección del radón, el cual puede ser encontrado en gran parte de la naturaleza, como en el suelo, el agua, el aire y diferentes tipos de sedimentos. La concentración de radón en el suelo ha sido utilizada de manera experimental para ubicar fallas geológicas cercanas a la superficie, ya que su densidad es generalmente más alta sobre las fallas (Patrick Richon et al., 2010). Algunos investigadores han tratado de demostrar que las concentraciones elevadas y/o los cambios rápidos de radón en el suelo o agua subterránea pueden servir como precursores sísmicos (Patrik Richon et al., 2003). Actualmente se estudian los alcances de este gas como posible precursor de fenómenos naturales como terremotos y erupciones volcánicas. La hipótesis plantea que la compresión en torno a una falla cercana a romperse podría producir emisiones de gas radón; por tanto, una mayor emisión de radón anticiparía la llegada de un terremoto. Dicha hipótesis fue estudiada durante los años 1970 y 1980. Sin embargo, se encontró que los terremotos ocurrían sin que existieran emisiones de gas radón cerca de las fallas geológicas.

Otro enfoque vinculado con la detección de precursores sísmicos tiene relación con el terremoto de Kobe, mencionado anteriormente. El terremoto de Kobe fue causado por el movimiento de la falla de Nojima en la isla de Awaji. Las bajas oficiales fueron de 6433 personas y más de 40 000 resultaron heridas. Después del terremoto se pidió a la gente de la zona que reportara fenómenos que habían observado antes del terremoto. Su

informe, recopilado por diversos medios de comunicación (carta, fax, teléfono e Internet), fue publicado como un libro: “1519 Declaraciones: Precursores del terremoto de Hanshin” (Wadatsumi, 1995). Mismo que contenía ilustraciones y fotografías de rayos sísmicos, lunas rojas y comportamiento inusual de animales y plantas. Las 1519 declaraciones sobre precursores recolectados por Wadatsumi (Wadatsumi, 1995) a través de los medios de comunicación de masas fueron en su mayoría de las áreas circundantes y pueden ser clasificadas de la siguiente manera(A. Meljarego, 2017):

Tabla 2.2 Clasificación de acuerdo a (Ikeya, 2004) de las declaraciones sobre precursores sísmicos recolectados por Wadatsumi (1995).

Fenómeno	Declaraciones
Comportamiento animal inusual	872(51%)
Cielo y atmosferas	490(29%)
Fenómenos marinos y terrestres	189(11%)
Aparatos eléctricos	149(9%)

De acuerdo Kirschvink (Kirschvink, 2000) los animales que viven dentro de regiones sísmicamente activas son sometidos episódicamente a vibraciones intensas. Por lo tanto, una hipótesis señala que el comportamiento “inusual” podría fundamentarse en la percepción, por parte de los animales, de un incremento de señales electromagnéticas de baja frecuencia, lo que permitiría al animal anticipar la ocurrencia de un terremoto y tratar de huir del área (A. Meljarego, 2017).

Otra teoría que se tiene para relacionar precursores sísmicos. Son los electrones defectuosos también conocidos como agujeros positivos, los cuales se liberan cuando las rocas son sometidas a un estrés cada vez mayor(Freund, 2003). Gracias a esto las nubes cargadas de agujeros positivos llegan a la superficie de la Tierra y generan un

potencial de tierra positivo(Romanovskaya, Namgaladze, Zolotov, Starikova, & Lopatyi, 2012).

Hoy en día se dedica una especial atención a los precursores sísmicos observados en la ionosfera. Diversas investigaciones han señalado una relación entre el estado de la ionosfera y el acontecimiento de terremotos(A. Meljarego, 2017). Por ejemplo, en el trabajo presentado por Angela en 2017 estudio el contenido total de electrones “TEC”, en la ionosfera de México. Cuando en la ionosfera existen zonas de mayor o menor concentración de electrones la señal satelital, que la atraviesa, presenta un retraso en el tiempo de recorrido hasta el receptor. Este efecto permite, a través del uso de datos satelitales, el cálculo del TEC(A. Meljarego, 2017).

Se observó una alteración en el TEC, que supera los valores de días posteriores, antes del choque sísmico. Sin embargo, esto solamente es evidente y fiable en determinados casos. Por otra parte, algunas ganancias y pérdidas de TEC son equivalentes a las registradas los días anteriores al sismo. Se observó, además, que para ciertos casos existe una posible relación entre el aumento del TEC y el estado del índice geomagnético correspondiente. En general, los resultados indicaron que ciertas anomalías ionosféricas pueden ser observadas días antes de la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud mayor o igual a 5.1(A. Meljarego, 2017).

3 MATERIALES Y MÉTODOS.

El sistema que se desarrollo tiene como objetivo poder capturar y guardar los datos del campo magnético para su posterior análisis. Para cumplir esta tarea, el dispositivo se propuso con diferentes elementos de hardware como base:

Raspberry pi3

De0 Nano SOC

Arduino uno



Figura 3.1 comparación, Raspberry Pi, De0 Nano SOC, Arduino uno

Para poder apreciar las diferencias entre las opciones principales, en la siguiente tabla se hace una comparación entre las diferentes tecnologías:

Tabla 3.1 Comparación pc, MUC y fpga.

PC	MCU	FPGA
<ul style="list-style-type: none"> • Versatilidad. • Fácil programación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. • Necesidad de pocos periféricos. • Fácil programación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor versatilidad. • Puede trabajar paralelamente. • Dispositivo Robusto • Necesidad de pocos periféricos.

Cabe aclarar que todos los anteriores son sistemas mínimos los cuales son pequeños y de gran versatilidad, para poder desarrollar el sistema embebido.

3.1 Sensor Fluxgate Mag 690-1000.

Es un sensor de campo magnético, el cual se puede utilizar para leer variaciones magnéticas, el cual se utilizó en todo el desarrollo del prototipo quedando como el sensor principal del sistema. Las siguientes son las características principales del mismo:

Ancho de Banda 1kHz.

Rango de medición de $\pm 100\mu\text{T}$ a $\pm 1000\mu\text{T}$.

Tres ejes de lectura analógico.



Figura 3.2 Magnetómetro MAG 690-1000.

Este sensor es tiene como ventaja su bajo costo y tamaño con comparación con los homólogos industriales. Además, que es de fácil manejo y al ser analógico, su adquisición de datos es únicamente por el medio de un ADC, lo cual hace que sea posible remplazarlo de manera fácil y rápida, por un sensor del mismo tipo o uno más potente sin necesidad de mayores modificaciones.

3.2 Tarjeta para adquisición de datos

La tarjeta para adquisición de datos se usa para convertir la señal analógica del sensor a una señal digital. Se utilizaron dos tarjetas de adquisición de datos diferentes en las

etapas de desarrollo del prototipo, la primera fue el ADS 8688 de la Texas instrument con las siguientes características:

- ADC con una resolución 16-Bit.
- Tiene 8 canales independientes, con funcionalidades de Auto Scan, y modo manual.
- Rangos programables:
- Bipolar: ± 10.24 V, ± 5.12 V, y ± 2.56 V
- Unipolar: 10.24 V, 5.12 V
- Voltaje analógico de 5-V Unipolar: 10.24 V, 5.12 V

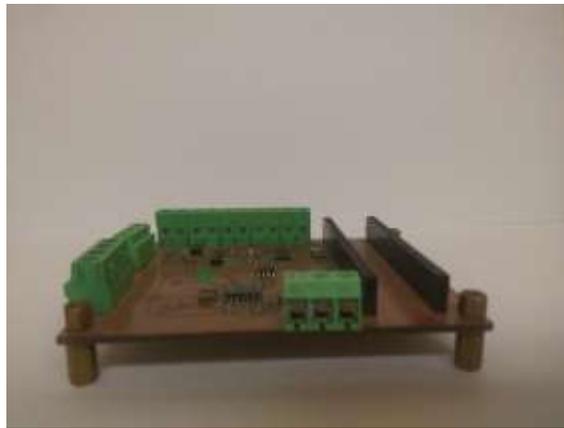


Figura 3.3 Placa ADS 8688 desarrollado por Ing. Israel Román.

El segundo ADC utilizado y el que quedo en la versión final fue el ADS 1262 También de Texas instrument. Las siguientes son las características de la tarjeta de adquisición de datos:

- ADC con una resolución 32-Bit
- Tiene 8 canales independientes, como también pueden trabajar en conjunto.
- Rangos programables:
- Bipolar: ± 10.24 V, ± 5.12 V, y ± 2.56 V.
- Unipolar: 10.24 V, 5.12 V.
- Voltaje de funcionamiento máximo 5V.

Aunque los dos dispositivos tienen la misma funcionalidad, la cual es transformar una señal analógica en una señal digital, y son del mismo fabricante tienen características diferentes, alguna de las cuales se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Características ADS

Características	Ads 8688	Ads 1262
Resolución	16 bits	32 bits
Voltaje de funcionamiento	Máximo 5 v	Máximo 5 v
Velocidad de muestreo	60 kHz	38.4kHz
Velocidad de comunicación	10 MHz	10 MHz
Canales	8 canales	8 canales
Data rate	500 ksps	38.4 ksps
Adc auxiliar	N/A	24 bits

Como se puede apreciar, por las características mostradas en la tabla anterior, aunque el ADS1262 tiene una resolución más alta, trabaja a menor velocidad, y esto es debido a que, a mayor resolución, menor velocidad de muestreo.

3.3 Arduino uno

Fue uno de los dispositivos utilizado en las etapas iniciales de desarrollo del prototipo, y tiene las siguientes características:

Microcontrolador: ATmega328.

Voltaje Operativo: 5v.

Voltaje de Entrada (Recomendado): 7 – 12 v.

Pines de Entradas/Salidas Digital: 14 (De las cuales 6 son salidas PWM)

Pines de Entradas Análogas: 6.

Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB es usado por Bootloader.

SRAM: 2 KB (ATmega328)

El Arduino es el sistema mínimo más sencillo de los 3 propuestos para desarrollar el prototipo, El Arduino uno que hace uso del chip ATmega 328p Está diseñado para desarrollar sistemas embebidos que no necesiten una gran potencia de procesamiento, ni complejidad en sus operaciones, pero por otro lado se tiene bajo costo y gran facilidad de uso.

3.4 Raspberry pi 3

La raspberry es un sistema embebido en sí mismo, más específicamente es una SBC o computadora de placa única, gracias a eso tiene todos los elementos necesarios para funcionar con un sistema operativo, las características de la placa son:

- Microprocesador: Chipset Broadcom BCM2387. 1,2 GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53.
- Unidad de procesamiento gráfico (GPU: Graphics Processor Unit): Dual Core VideoCore IV ® Multimedia Co-procesador. Proporciona Open GL ES 2.0, OpenVG acelerado por hardware, y 1080p30 H.264 de alto perfil de decodificación. Capaz de 1 Gpixel / s, 1.5Gtexel / s o 24 GFLOPs con el filtrado de texturas y la infraestructura DMA.
- RAM: 1GB LPDDR2.
- Conectividad: Ethernet socket Ethernet 10/100 BaseT 802.11 b / g / n LAN inalámbrica y Bluetooth 4.1 (Classic Bluetooth y LE).
- Salida de vídeo: HDMI rev 1.3 y 1.4 RCA compuesto (PAL y NTSC).

- Salida de audio: jack de 3,5 mm de salida de audio, HDMI.
- USB 4 x Conector USB 2.0.
- Conector GPIO (General Purpose Input/Output) para entradas y salidas digitales: 40-clavijas de 2,54 mm (100 milésimas de pulgada) de expansión:
Proporciona 27 pines GPIO, así como 3,3 V, +5 V y GND líneas de suministro
Conector de cámara de 15 pines cámara MIPI interfaz en serie (CSI-2)
Pantalla de visualización Conector de la interfaz de serie (DSI) Conector de 15 vías plana flex cable con dos carriles de datos y un carril de reloj
Ranura de tarjeta de memoria empuje / tire Micro SDIO

Se tiene todo lo básico de una computadora en una placa mucho más económica que una computadora de escritorio. Además, que tiene gran soporte de una comunidad de open hardware y software, actualmente se puede trabajar en ella bajo diferentes sistemas operativos la mayoría distribuciones de Linux como es el Archlinux, o también variaciones de Ubuntu como son Debian, e incluso tiene su propia distribución llamada Raspbian. Además, es posible correr otros sistemas operativos como es el Android (versión sin soporte) o Windows ARM.

3.5 Deo Nano SOC

Es una FPGA pequeña, pero de gran potencia, y versatilidad algunas de sus características son:

- FPGA: 5CSEMA4U23C6N de Altera Cyclone® V SE.
- Dispositivo de configuración serial.
- USB-Blaster II en placa para la programación; modo JTAG.
- Dos pulsadores.
- Cuatro switch deslizables.
- Ocho leds verdes para usuario.
- Tres fuentes de reloj de 50MHz desde el generador de reloj.
- Dos conectores de expansión de 40 pines.
- Un cabezal de expansión Arduino (compatibilidad Uno R3).

- Un cabezal de expansión de entrada analógica de 10 pines (compartida con la entrada analógica Arduino).
- Convertidor A/D, interfaz SPI de 4 pines con FPGA.

Este dispositivo es capaz de funcionar a grandes velocidades de reloj, y tiene un tamaño relativamente pequeño con comparación a otras FPGA, aunque su costo es más elevado a otros tipos de dispositivos, pero por en cambio tiene gran potencia, las FPGA están diseñadas para trabajos robustos donde no la velocidad y la fiabilidad debe ser la prioridad para su implementación.

3.6 Software.

A continuación, se detallarán los diferentes programas que se utilizaron, para realizar el prototipo.

3.6.1 Arduino IDE.

Software de uso libre tipo GPL, el cual está basado en c/c++. De fácil instalación y uso, originalmente fue diseñado utilizando como base en otro programa basado en JAVA, aunque actualmente ya es independiente de tal proyecto, este IDE es el proporcionado por los fabricantes de las placas Arduino, aunque no es la mejor solución para cuando se necesitan proyectos muy exactos, debido a que está diseñado para dar una sensación simplificada y sencilla de la programación de microcontroladores.

Por eso el lenguaje que se utiliza en este IDE es una modificación de lenguajes ya conocidos como es el C/C++, por esta razón acepta instrucciones de estos lenguajes sin problema, además de tener instrucciones propias del IDE.

Cosas buenas que resaltar de este entorno es la gran comunidad open source y open hardware que se tiene, por lo que se puede encontrar fácilmente ayuda, como también bibliotecas que ayudan a tener un tiempo más corto de desarrollo.

Cabe recalcar, aunque es el IDE más extendido, para la programación, no es el único método para poder programar las placas Arduino, pues se puede utilizar por ejemplo el Atmel studio, el cual es el IDE del fabricante del microcontrolador, también se puede programar vía JAVA, PYTHON entre otros.

3.6.2 PYTHON.

Es un lenguaje de programación versátil multiplataforma y multiparadigma que se destaca por su código legible, limpio y más orientado a objetos. La licencia de código abierto el cual tiene una licencia PSFL.

PYTHON es un lenguaje de alto nivel, y gracias a esto su comprensión es mucho más fácil debido a que es más cercano al habla humana, que al lenguaje máquina, este lenguaje nacido en los años 90, influenciado por el lenguaje ABC, de donde tomo las siguientes ideas:

- Identación para agrupar el código.
- El diseño simple de instrucciones.
- Uso de tuplas, listas y diccionarios.
- Tipo de datos inmutables.
- No poner límites en los tamaños del array, listas, etc.

La concepción detrás de PYTHON es lograr un lenguaje potente, que pueda competir con lenguajes como C, pero también muy fácil de entender y aprender.

Por último, cabe recalcar que es un lenguaje open source, multiplataforma muy extendido en la actualidad, donde tiene una gran comunidad de soporte.

3.6.3 Matlab.

Matlab es un software desarrollado para realizar cálculos y visualización de estos.

MATLAB se utiliza ampliamente en:

- Cálculos numéricos.
- Modelado, simulación y prueba de prototipos.
- Desarrollo de algoritmos.
- Análisis de datos, exploración y visualización.
- Graficación de datos con fines científicos o de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphical User Interface).

Este software es de paga, más la potencia que ofrece en la realización de cálculos matemáticos, le ha dado una gran aceptación en la actualidad, en este trabajo se utilizara Matlab, para poder aplicar los filtros necesarios a las señales obtenidas.

3.6.4 Active HDL.

ACTIVE HDL 3.6 es un software basado en VHDL y Verilog que nos permite realizar simulación de diversos sistemas, es un ambiente completo y totalmente integrado para el diseño y la verificación de diseños digitales. Gracias a él se es posible la implementación de circuitos en las FPGA, los cuales nos permiten simular las funciones de cada bloque como de todo el conjunto antes de probarlo físicamente.

3.6.5 Quartus ii

ERA Quartus II es un ambiente más completo disponible para el diseño de sistemas programables en un Chip - system-on-a-programmable-chip. Quartus II permite al desarrollador o desarrolladora compilar sus diseños, realizar análisis temporales, examinar diagramas RTL y configurar el dispositivo de destino con el programador.

Desde este centro de descargas pueden obtener la versión de Quartus que deseen. Tienen desde la versión 9 hasta la 13, además que tiene 2 versiones, la versión estudiante la cual es gratuita, pero limitada en algunos aspectos, y la versión de suscripción, la cual libera todas las posibilidades del programa.

3.7 Filtros.

Para poder analizar los datos obtenidos del sistema, se tuvieron que utilizar dos algoritmos filtros los cuales fueron los siguientes:

- Filtro media móvil.
- Transformada de wavelet discreta (DWT).

3.7.1 Filtro media móvil

Es un cálculo utilizado para analizar un conjunto de datos en modo de puntos para crear series de promedios.

Las medias móviles son una lista de números en la cual cada uno es el promedio de un subconjunto de los datos originales.

$$M = \frac{1}{N} \sum_{me=1}^N A_{me*}$$

(3.1)

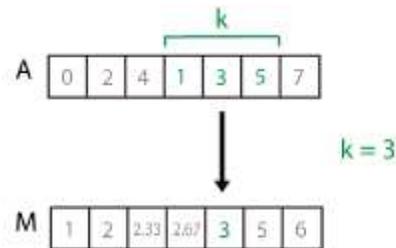


Figura 3.4 Representación media móvil.

Como nos damos cuenta en lo anterior, básicamente el filtro de media móvil toma un tamaño K del vector original y lo promedia, y lo agrega a un nuevo vector M, y sigue así sucesivamente hasta terminar con el vector original, el vector M será el vector de salida de la media móvil.

3.7.2 Transformada de wavelet discreta.

Por la complejidad en el tratamiento numérico de la DWT, debido a la variabilidad en forma continua de los parámetros de escala como de traslación, es indispensable contar con una herramienta que permita la discretización de esta. Es así como se pasará de un mapeo continuo a un espectro o conjunto finito de valores, a través del cambio de la integral por una aproximación con sumatorias. La discretización permite representar una señal en términos de funciones elementales acompañadas de coeficientes (A. Meljarego, 2017).

$$f(t) = \sum_{\lambda} c_{\lambda} \varphi_{\lambda}$$

(3.2)

Ya en la práctica se puede decir que la DWT es una sucesión de filtros pasa bajas y pasa altas, donde en cada nivel se divide por 2 la cantidad de muestras.

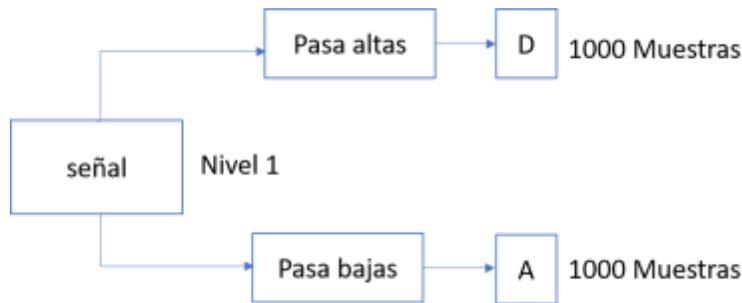


Figura 3.5 Nivel 1 DWT.

En la figura 3.8 muestra el primer nivel de una DWT, donde tienes 2 salida la salida del filtro pasa alta y la del pasa bajas.



Figura 3.6 Nivel 2 DWT.

Y en la figura 3.9 el segundo nivel donde también tienes una salida, solo que los datos se van dividiendo por cada nivel.

Para expresar las figuras anteriores lo podemos hacer de la forma:

$$An = \frac{F_{2n-1} + F_{2n}}{\sqrt{2}} \tag{3.3}$$

Y

$$Dn = \frac{F_{2n-1} - F_{2n}}{\sqrt{2}}$$

(3.4)

Donde A_n es el resultado aplicar un filtro pasa bajas, y D_n de aplicar el filtro pasa altas.

3.8 Diseño y desarrollo del prototipo.

Para el prototipo se definieron dos posibles soluciones inicialmente. La primera solución es el uso de un FPGA y una tarjeta de desarrollo propio el cual es compatible con shield de Arduino como también el pad que contiene la FPGA:



Figura 3.7 Shield Arduino ADS, conectado a la De0 nano SOC.

En la figura 3.7 muestra el dispositivo que tiene un diseño compacto y con pocas partes móviles, debido a que solo comprende de dos partes esenciales, más el sensor.

La segunda propuesta inicial que considero el uso de un Arduino uno, una Raspberry y el ADC. Lo primero que se hizo fue una prueba donde por medio del ADC conectado al Arduino, se leía el sensor como se muestra a continuación.

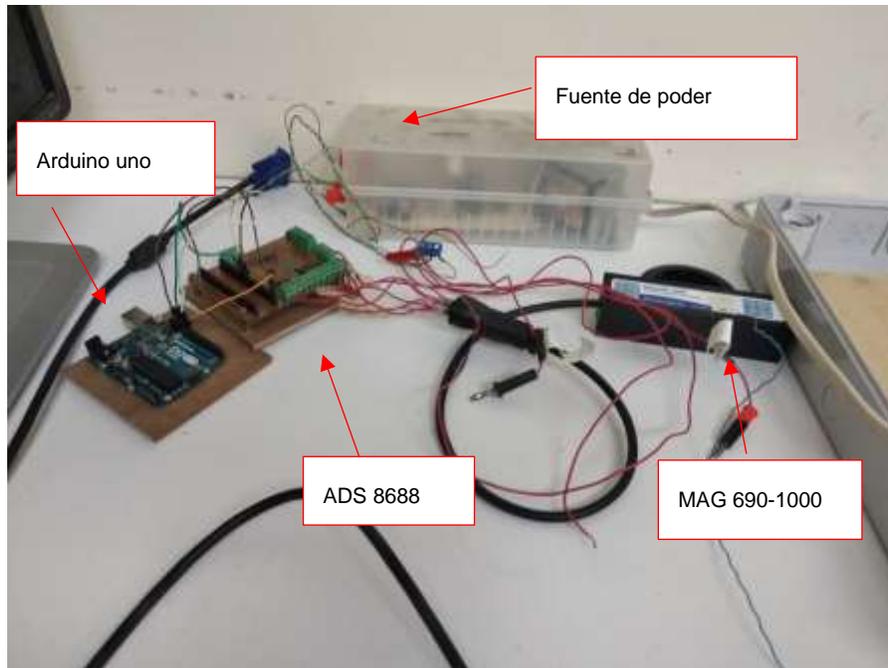


Figura 3.8 Prueba de lectura del sensor en Arduino.

3.8.1 Primera propuesta del prototipo 1.

La primera propuesta que se trabajo fue con la fpga como controlador del sistema, tenemos las principales ventajas:

- Gran velocidad y capacidad de cálculo y adquisición de datos.
- Hardware más compacto.
- Probabilidad falla menor.
- Menos etapas de potencias en el prototipo.

3.8.2 Segunda propuesta del prototipo 1.

Esta propuesta contempla una Raspberry pi 3. Como controlador central del sistema, y un Arduino uno como periférico, el cual lee el ADS. Estas son las siguientes ventajas del sistema:

- Bajo costo de sus componentes.
- Fácil conseguir repuestos en caso de falla.

- Documentación amplia para el desarrollo.
- Modularidad.

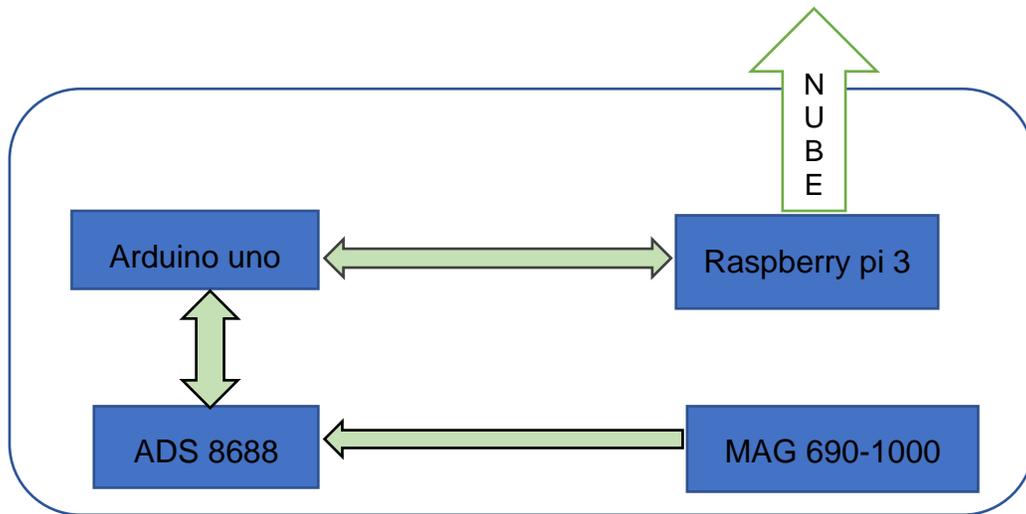


Figura 3.9 Esquema prototipo versión 1.

Teniendo en cuenta las ventajas de los dos prototipos propuesto, se decidió trabajar con el segundo debido a su bajo costo (esquema figura 3.10) donde se utilizó la Raspberry (sección 3.4), Arduino uno(sección 3.3), ADS 8688(sección 3.2) y MAG 690-1000(Sección 3.1), También la curva de aprendizaje y la posibilidad de modificar alguno de sus elementos más fácilmente, que la propuesta con la FPGA, por lo que desarrollo resulta más rápido y asequible, además que la idea detrás de este trabajo es poder dejar un dispositivo que sea tanto Open Hardware, y open source él cual sea fácilmente replicable y modificable.

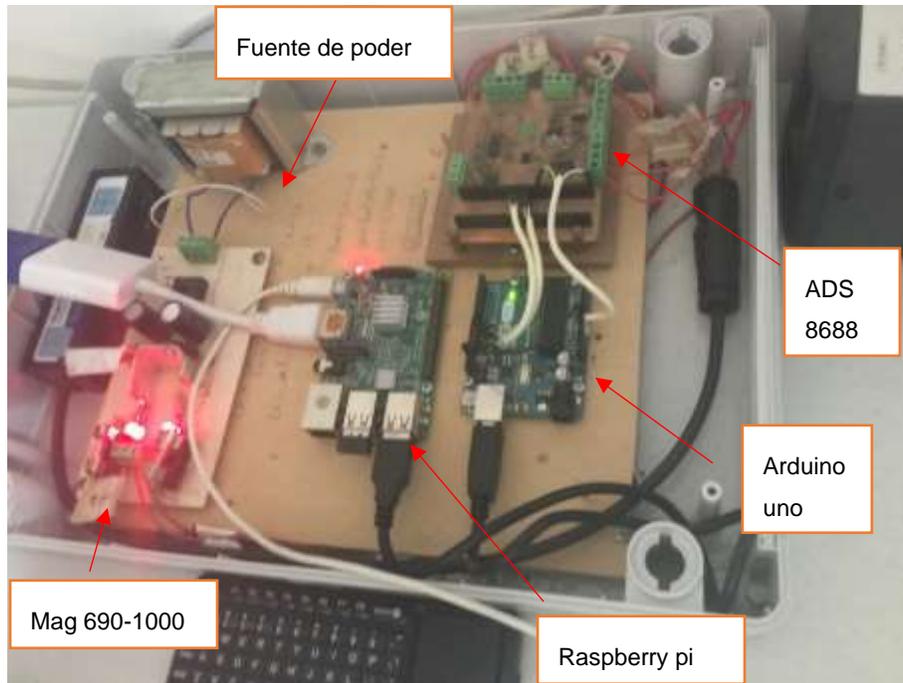


Figura 3.10 Prototipo versión 1 funcionando.

En la figura 3.10 se puede observar el prototipo armado y funcionando. Este comprende de varias partes:

- La primera comprende la conexión del sensor Mag 690-1000 al ads 8688, para poder conectarlo se hicieron uso de 3 canales del ADC, el primer canal para el eje “x”, el segundo canal para el eje “y”, y el tercero para el eje “z”.
- La segunda etapa o parte comprende del ads 8688 al Arduino uno se encarga de pedir una lectura del sensor al ads cada segundo, para poder tener una frecuencia de 1 Hz. Esta conexión se hace vía SPI.
- El tercer punto es la conexión entre la Raspberry Pi y el Arduino uno, Por medio del protocolo serial, por medio del usb, se pasa la información obtenida, se hizo estos debido a que los GPIO del Arduino funcionan a 5 v y los de la Raspberry Pi a 3.3v, lo que los hacia incompatible directamente. La Raspberry Pi recibe los datos los acomoda y los guarda en un archivo csv.
- Por último, también cabe recalcar la fuente de alimentación, la cual energiza al sensor y al ads, para evitar que estos dos dispositivos capten ruido proveniente de fuentes de alimentación comunes.

Una vez armado, conectado y probado el sistema en el laboratorio, lo primero fue instalar el sistema en un lugar donde no esté expuesto a perturbaciones externas, debido que, al trabajar con magnetismo, grandes maquinas eléctricas pueden afectar la medición.

Una vez hecho lo anterior, se comenzaron a hacer pruebas para verificar la adquisición de datos.

3.8.3 Actualización a versión 2 del prototipo.

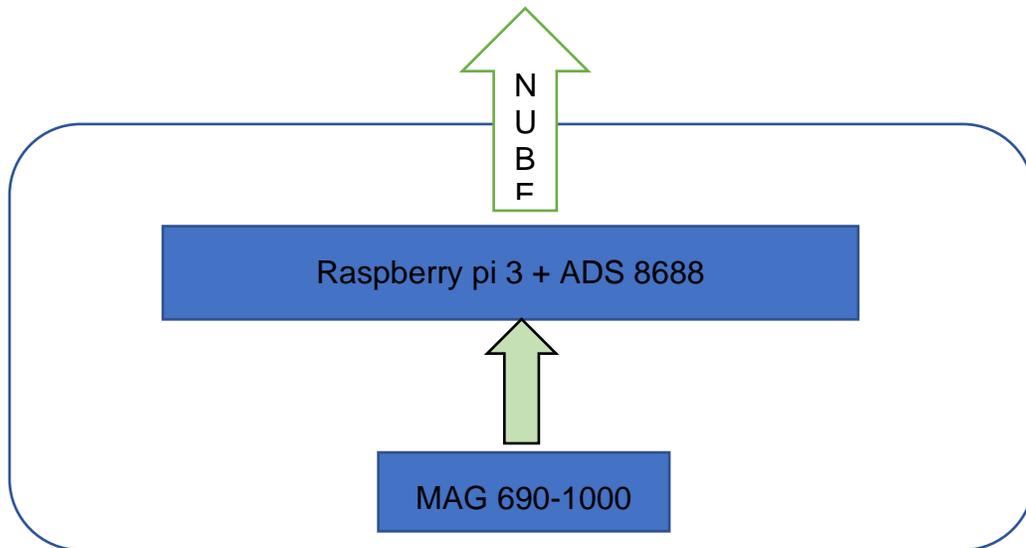


Figura 3.11 Esquema prototipo Versión 2.

Al ver los primeros datos tomados por el dispositivo se encontraron varias fallas las cuales al final representaban más ruido en las mediciones cual llevo al planteamiento de una mejora de este.

Lo primero fue buscar la fuente del ruido, y se encontró que la mayor fuente del ruido era el Arduino uno, por lo que se buscó solución a este. Para ello se decidió eliminar el Arduino uno como se muestra en la figura 3.11 en la cual se observa que solo se tiene el sensor conectado directamente al ADS y a la Raspberry pi 3, Para esto se desarrolló una tarjeta con el ADS 8688 que se pudiera conectar directamente a la Raspberry Pi.

Al hacer estas modificaciones se consiguieron las siguientes ventajas frente al v1:

- Más compacto.
- Menos susceptible a fallas.

- Mayor velocidad y facilidad de actualizaciones en el código.

Este dispositivo cono con los siguientes elementos:

- Sensor Mag 690-1000.
- Raspberry pi 3.
- Nuevo shield ADS 8688.

El rediseño de la placa del ADS, se hizo para que fuera compatible con un Arduino uno, si fuera necesario para trabajos futuros y el resultado fue lo siguiente:

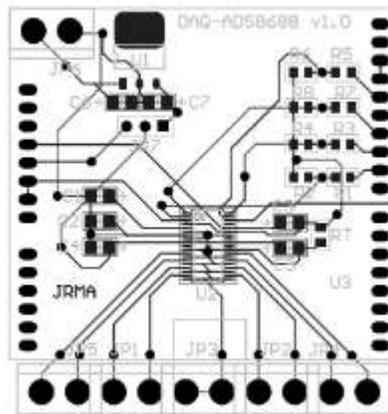


Figura 3.12 Diseño Shield ADS 8688 compatible con Arduino, Diseñado por: Dr. Jesus Roberto Millán.

Cómo se aprecia en la imagen anterior, el diseño es relativamente sencillo, y compacto lo cual ayuda a que el prototipo necesite menos espacio.

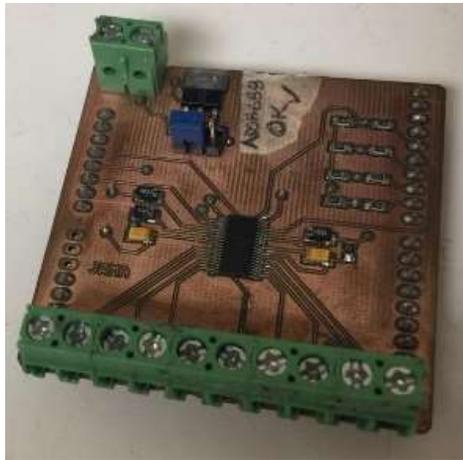


Figura 3.13 Shield ADS 8688 compatible con Arduino uno, diseñado por: Dr. Jesus Roberto Millán.

La imagen anterior nos muestra la placa final, ya terminada, el único inconveniente con este diseño es que no es compatible con los pines de la Raspberry Pi directamente, por lo que se diseñó un adaptados, solo que este adaptador no solo se hizo compatible con los pines, a su vez se agregaron elementos, para filtrados y aislamiento de las señales, para que hubiera aún menor ruido en los datos.

La siguiente imagen, corresponde al esquemático de la tarjeta diseñada.

Una vez que se tuvo el esquemático, con los componentes necesarios se maquino la tarjeta.

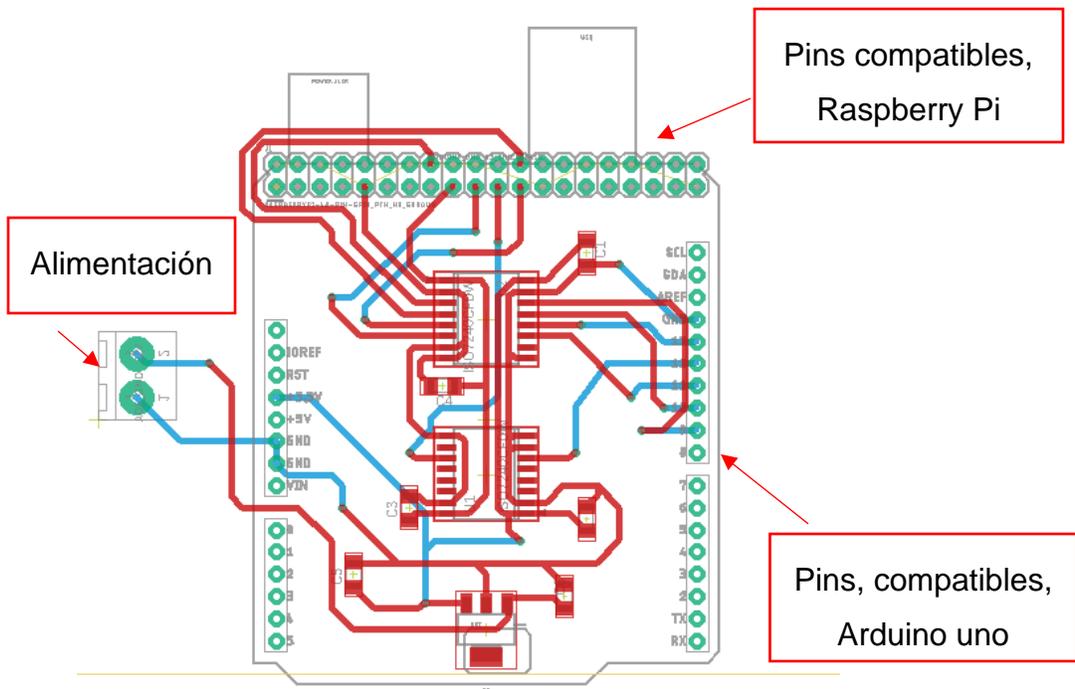


Figura 3.14 Vista del diseño de conexión Arduino uno a Raspberry pi.

En la imagen anterior se observa como los pines del Arduino uno y la Raspberry Pi se conectan entre sí, además de la conexión de corriente, esto para alimentar los aislador que hacen la función de aislar las dos señales

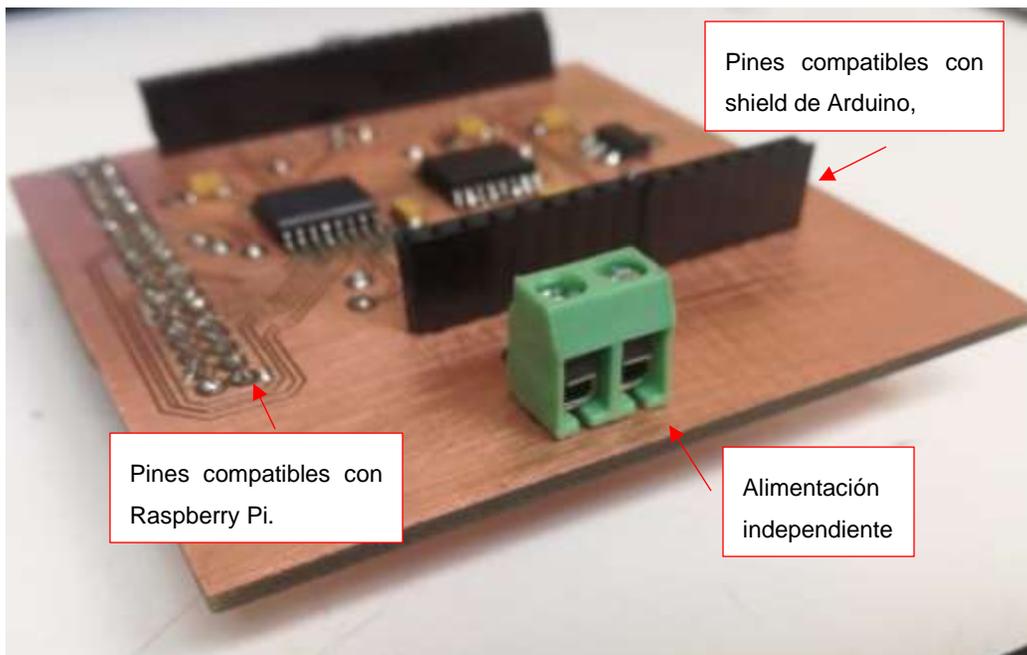


Figura 3.15 Tarjeta física, del adaptador de Arduino shield a Raspberry Pi.

En la figura anterior podemos ver, la tarjeta ya terminada y funcional donde tiene su propia alimentación, y los pines de conexión para un shield de Arduino por arriba y las conexiones compatibles con los pines de Raspberry Pi.

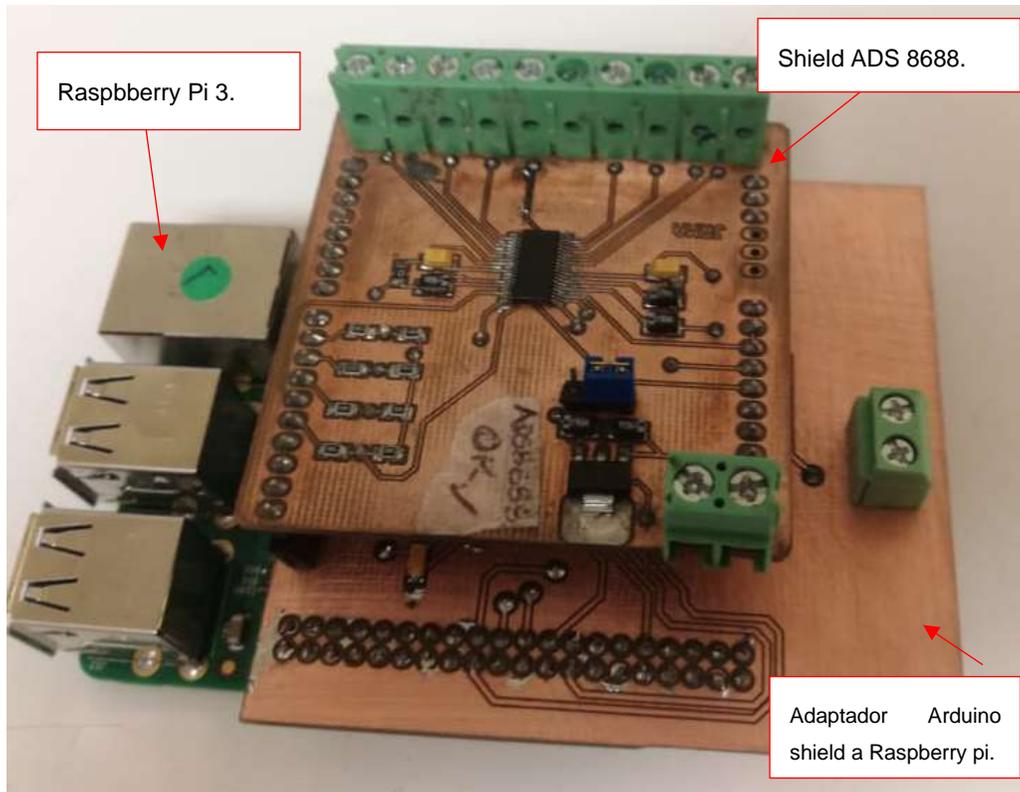


Figura 3.16 Conexión Raspberry pi, adaptador y shield Arduino ADS 8688.

Se puede observar en la figura 3.16 el resultado final de la modificación del prototipo donde vemos el nuevo shield, y el adaptador conectados a la Raspberry Pi.

3.8.4 Actualización de la versión 2.

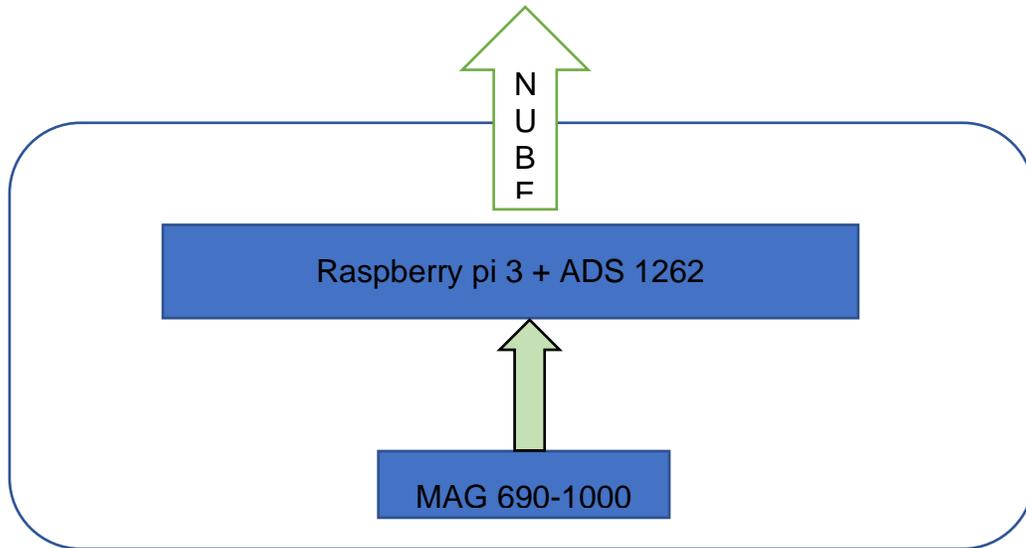


Figura 3.17 Esquema actualización prototipo versión 2.

Al estar experimentando con la modificación hecha al prototipo, se encontró que se tenía error de cuantización debido a que el ADS 8688 tiene una resolución de 16 bits, por lo cual había pérdida de datos e información por lo que se decidió trabajar con un ADC de mayor resolución y para esto se apoyó en el trabajo previo de Gerson Pio Rodríguez el cual en 2019 desarrollo una tarjeta de adquisición de datos con el ADS 1262, como se puede apreciar en la figura 3.17, es el mismo esquema de la figura 3.11, solo que se cambia el ADS.

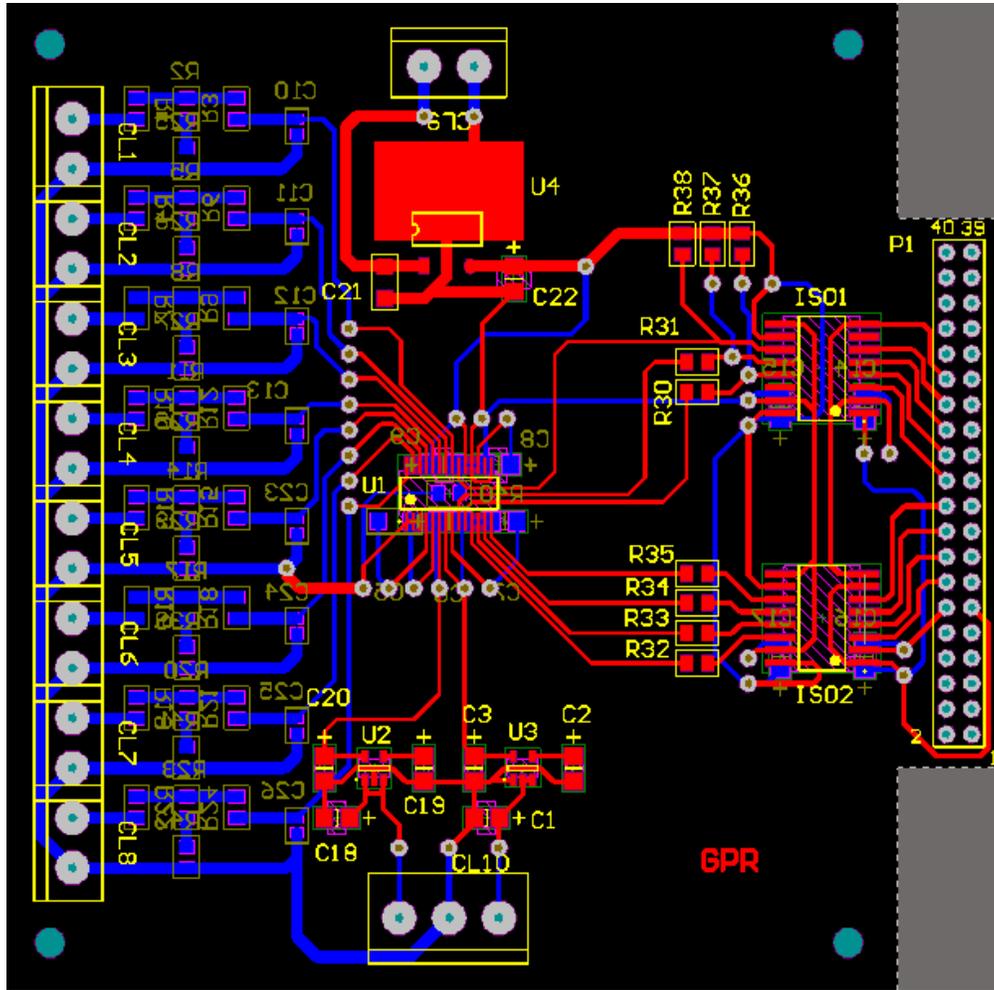


Figura 3.18 Diagrama PCB Pasivo (RODRÍGUEZ, 2019).

En la figura anterior se muestra el diseño para el ADS 1262, el cual contiene todos los elementos necesarios para su funcionamiento, como también filtros, fuentes independientes y asilamiento de señal.

Aunque este diseño es funcional, es para la conexión directa a los pines habituales que trae una FPGA, por lo que adicionalmente se diseñó y maquino un adaptador para poder conectar el shield, la Raspberry Pi como se aprecia en la figura 3.25.

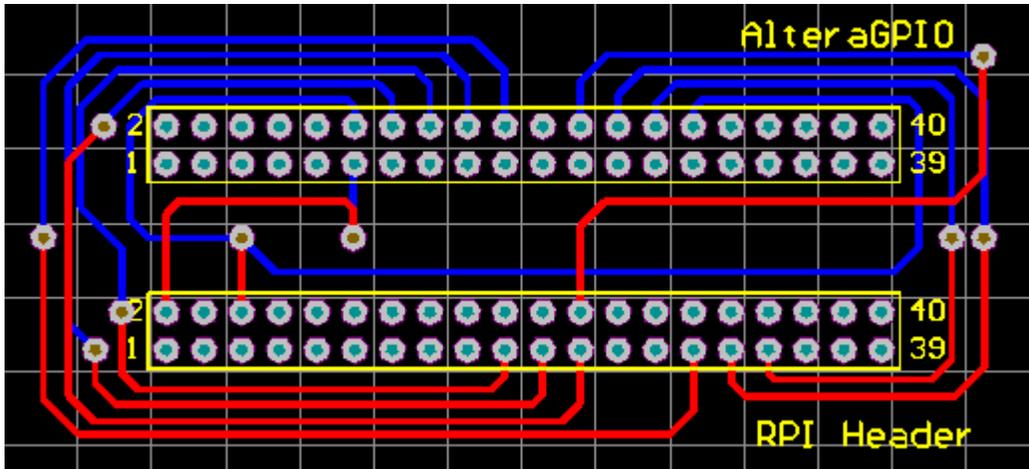


Figura 3.19 Diagrama PCB Conector ADS – Raspberry Pi (RODRÍGUEZ, 2019).



Figura 3.20 Conector ADS - Raspberry Pi (RODRÍGUEZ, 2019).

Con el conector anterior(figura 3.26), ya se pudo probar el ADS 1262 en la Raspberry Pi.

Tabla 3.3 Configuración de pines ADC-Raspberry Pi (RODRÍGUEZ, 2019).

1262 pines	Función De Pin	Conexión	Raspberry
DRDY	Data Ready	PIN29	BCM5
MISO	Slave Out	PIN21	BCM9
MOSI	Slave In	PIN19	BCM10
SCLK	Serial Clock	PIN23	BCM11
CS	Chip Select	PIN24	BCM8
START	Start Conversion	PIN31	BCM6
PWDN	Power Down/Reset	PIN33	BCM13
DVDD	Digital Vdd	PIN2	
DGND	Digital Gnd	PIN6	

Ya probado lo anterior, se siguió para dejar el prototipo totalmente funcional, lo primero fue la adaptación completa de este.

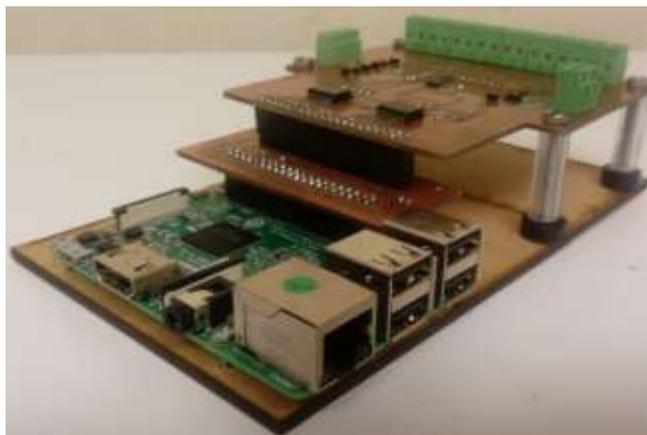


Figura 3.21 Sistema de adquisición de datos.

Para dejar el sistema lo más aislado posible de ruido se utilizaron fuentes de desarrollo interno.

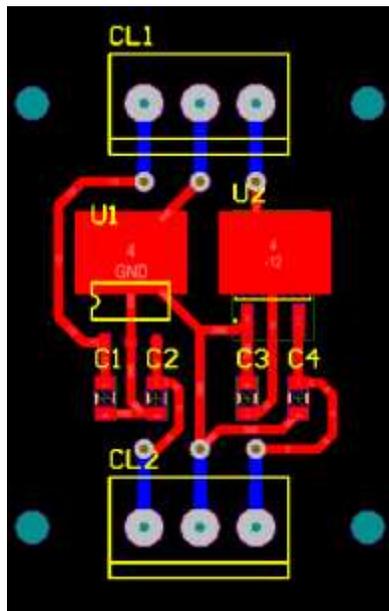


Figura 3.22 Diagrama PCB reguladores de voltaje (RODRÍGUEZ, 2019).

En la figura 3.28 corresponden a los reguladores de +5v y -5v, y se anexaron a las fuentes que ya se tenían. El siguiente fue el rearmado del prototipo en su respectivo gabinete industrial, la cual quedó como se muestra en la siguiente figura 3.29.

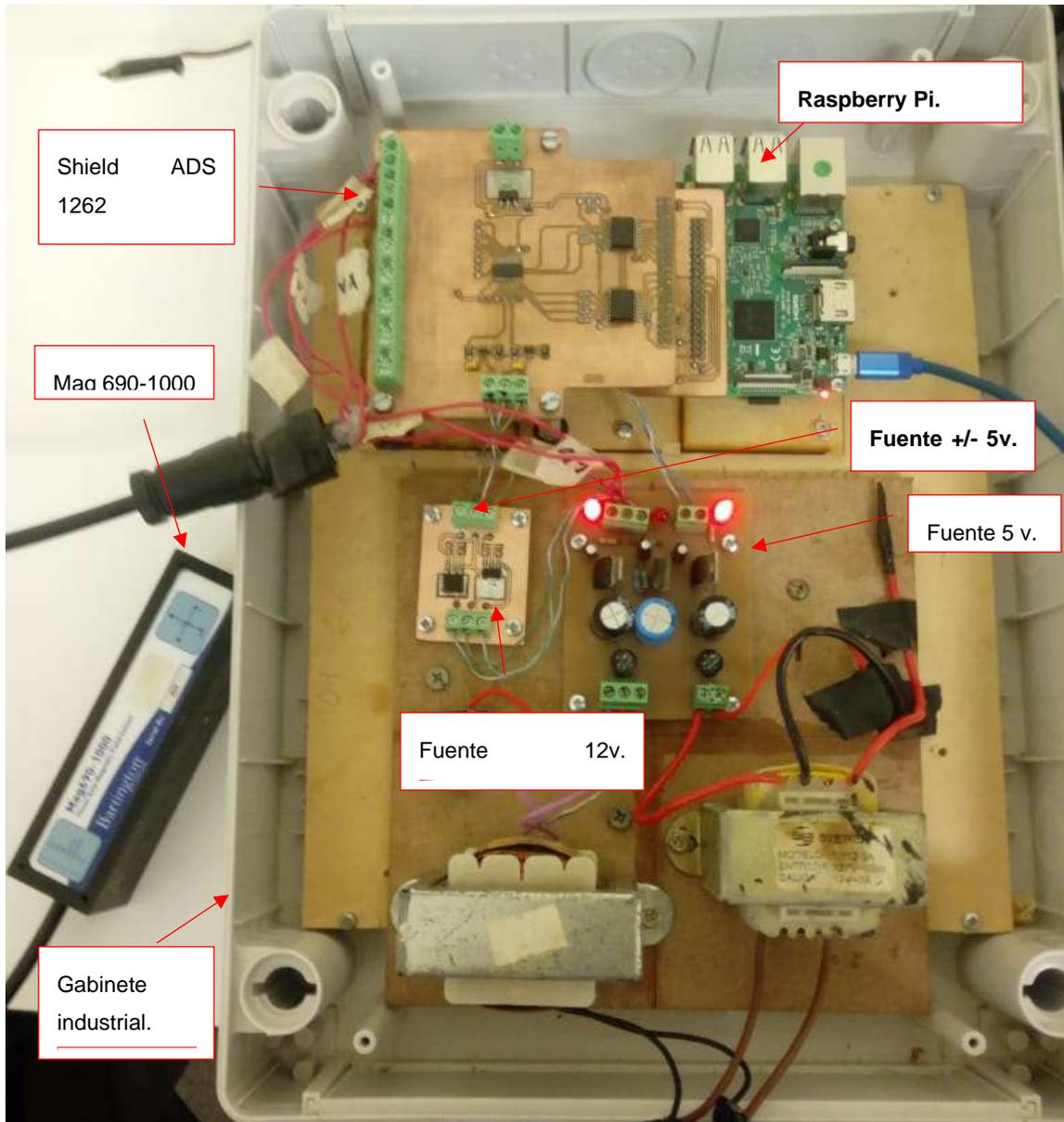


Figura 3.23 Estación de monitoreo geo electromagnético.

3.9 Códigos desarrollados.

Para esta versión final del dispositivo (figura 3.25) se manejaron varios códigos:

1. Código de Python para la adquisición de datos.
2. Código de Matlab para graficar los datos RAW.
3. Código de Matlab para aplicar y graficar el filtro media móvil y DWT.

3.9.1 Código de Python para la adquisición de datos.

Este código fue diseñado para poder obtener los datos del sensor por medio del ADC y posteriormente guardarlo en un archivo csv.

Lo primero es configurar el dispositivo para poder tener una comunicación correcta con el ADS 1262:

```
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
CS_PIN = 8
DRDY_PIN = 5
START_PIN = 6
PWDN_PIN = 13
GPIO.setup(DRDY_PIN, GPIO.IN, GPIO.PUD_UP)
GPIO.setup(START_PIN, GPIO.OUT)
GPIO.setup(PWDN_PIN, GPIO.OUT)
GPIO.setup(CS_PIN, GPIO.OUT)
```

Figura 3.24 código de inicialización spi.

En donde primero definimos que pines utilizaremos para la comunicación, seguido de eso definieron los registros y variables necesarias, (anexos ~> código raspberry.py).

Después de eso tenemos varias funciones importantes las cuales son:

- *def Reset():* la cual se encarga de reiniciar el ads de forma física por un pin predefinido.
- *def Hard_Stop():* Detiene el ADS 1262 por medio del pin de "START".
- *def Hard_Stop():* Inicializa el ADS 1262 por medio del pin de "START".
- *def Leer_Dato():* Función encargada de leer los datos provenientes del ADS 1262.
- *def Escribir_Reg(DIRECCION,DATO):* Se encarga de escribir los registros, para lograr tener nuestras configuraciones propias.
- *def Inicializacion():* Contiene los pasos y configuraciones de inicialización del ads 1262, para un correcto funcionamiento.

Seguimos con el bucle de lectura:

```

Escribir_Reg(INPMUX,CH0)
Buff_ADS0 = Leer_Dato()
ADS_DATO0=Buff_ADS0[1]<<24|Buff_ADS0[2]<<16|Buff_ADS0[3]<<8|Buff_ADS0[4]
Voltaje0=resolucion*ADS_DATO0
Reset()

Escribir_Reg(INPMUX,CH1)
Buff_ADS1 = Leer_Dato()
ADS_DATO1=Buff_ADS1[1]<<24|Buff_ADS1[2]<<16|Buff_ADS1[3]<<8|Buff_ADS1[4]
Reset()

Escribir_Reg(INPMUX,CH2)
Buff_ADS2 = Leer_Dato()
ADS_DATO2=Buff_ADS2[1]<<24|Buff_ADS2[2]<<16|Buff_ADS2[3]<<8|Buff_ADS2[4]

```

Figura 3.25 bucle de lectura ADS 1262.

En el código de la figura anterior se ve como por medio de la función “Escribir_Reg” le decimos al ADS que canal se desea leer y acto seguido, se lee los datos del canal, para por últimos guardarlos en una variable, esto se hace por los 3 canales correspondiente X, Y, Z.

Por ultimo. Se guardan las variables en un archivo csv.

3.9.2 Código de Matlab para graficar los datos RAW.

El código en utilizado para graficar los datos RAW es relativamente sencillo, para cada uno de los ejes, como se ve a continuación para el eje “X”:

```

1      % este programa es para sobreponer los datos raws.
2      %Eje x RAW.
3 -    figure(1);
4 -    plot(time,XT,'b');
5      %plot(XT,'b');
6 -    hold on
7 -    plot(timesis,Xsis,'r');
8      %plot(Xsis,'r');
9 -    hold off
10 -   title('Eje x');
11 -   legend('datos totales','datos dia sismico');
12 -   xlabel('x(S)');
13 -   ylabel('y(nT)');

```

Figura 3.26 código para graficar eje X.

Para que los datos sean correctamente graficados se necesita que los datos contenidos tengan la misma frecuencia de muestreo la cual es de 1 Hz.

3.9.3 Código de Matlab para aplicar y graficar el filtro media móvil y DWT.

Este es el código principal, para el análisis de los datos, y se compone de dos partes, el uso del filtro media móvil para aplicar un pre procesamiento utilizando la gran versatilidad y potencia de Matlab, para esto se utiliza la macro función:

- `yfmm=movmean(ZT,1000);`

Donde ZT en este caso es el eje “z” a analizar, y el número que lo acompaña, es la ventana a utilizar, que en nuestro caso fue una ventana de 1000, por la gran cantidad de datos que se maneja por cada evento sísmico.

La segunda parte que se trabaja es un DWT de 6, para esto primero se utiliza la macro función:

- `[c,l]=wavedec(yfmm,level,mwavelet);`

Donde “yfmm” son los datos a analizar los cuales se les han aplicado anteriormente el filtro media móvil, “level” corresponde al nivel de la DWT, la cual para nuestro caso es de 6, y por último mwavelet la cual la tenemos configurada como “db1” utilizando daubechies wavelets de orden 1.

Por último, se utiliza la función:

- `y=wrcoef(acdc,c,l,mwavelet,level);`

Nos sirve para reconstruir los resultados obtenidos por una wavelet 1-D.

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Las primeras pruebas se hicieron en las diferentes versiones.

En la primera versión del dispositivo, se hicieron diferentes pruebas, donde se pudo comprobar que el sistema podría ser viable. Pudiendo obtener los primeros datos del sensor, los datos obtenidos se almacenaron en un archivo csv de la siguiente forma:

Tabla 4.1 Muestra organización de datos en archivo CSV.

Eje X	Eje Y	Eje Z	Date Time
51562755	4286645043	74774869	04/28/19 14:04:21
51561653	4286603968	74803664	04/28/19 14:04:22
51565238	4286582121	74802954	04/28/19 14:04:23
51558235	4286599355	74784742	04/28/19 14:04:24
51558761	4286646773	74769531	04/28/19 14:04:25
51563572	4286623797	74793476	04/28/19 14:04:26
51565930	4286587503	74804557	04/28/19 14:04:27
51563274	4286589320	74788803	04/28/19 14:04:28
51558105	4286652697	74716989	04/28/19 14:04:29
51564981	4286646081	74817488	04/28/19 14:04:30
51563632	4286603773	74772493	04/28/19 14:04:31
51568492	4286581690	74795345	04/28/19 14:04:32

Se puede observar cómo se guardan los datos adquiridos, las primeras tres filas corresponden a los datos RAW de los ejes “x,” y” y “z”, respectivamente, y en la última columna, se guarda el tiempo en que fue muestreado el cual es cada segundo.

Después de lograr capturar y guardar los datos en un archivo csv, lo siguiente fue poder subir los datos automáticamente, a la nube por lo que se usa en primer lugar la plataforma Drive, para que el sistema almacene esos datos.

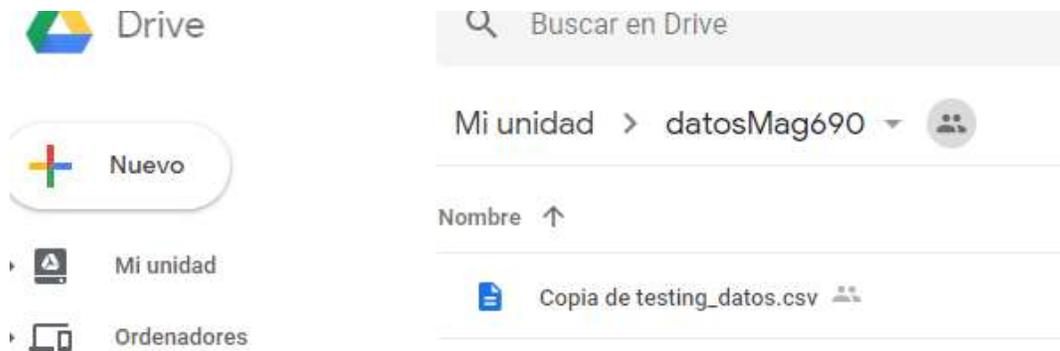


Figura 4.1 Datos Eje x primera versión.

Como se nota en la figura 4.1 lo datos se almacenan, suben y se actualiza un archivo csv, el cual está en la nube de Drive.

Los datos que se obtuvieron en el primer sistema fueron ploteados para poder ver qué información se obtuvo:

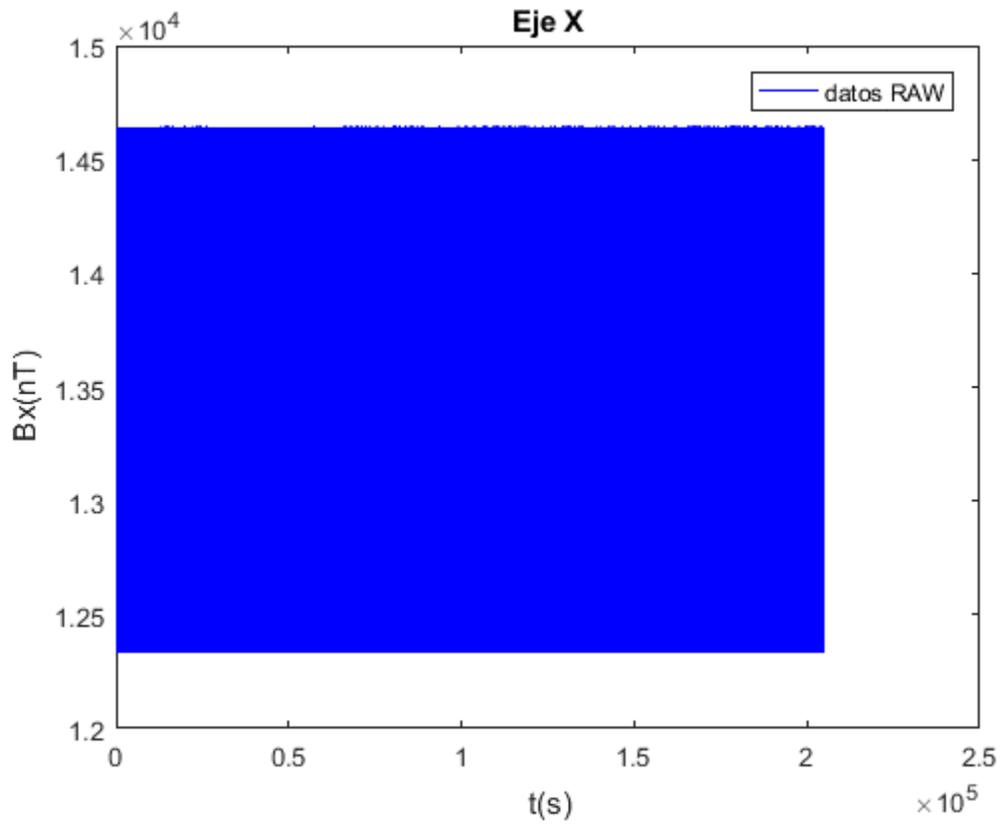


Figura 4.2 Datos Eje x primera versión estación UAS.

En la imagen 4.2 podemos ver que el ruido en el eje X es muy significativo.

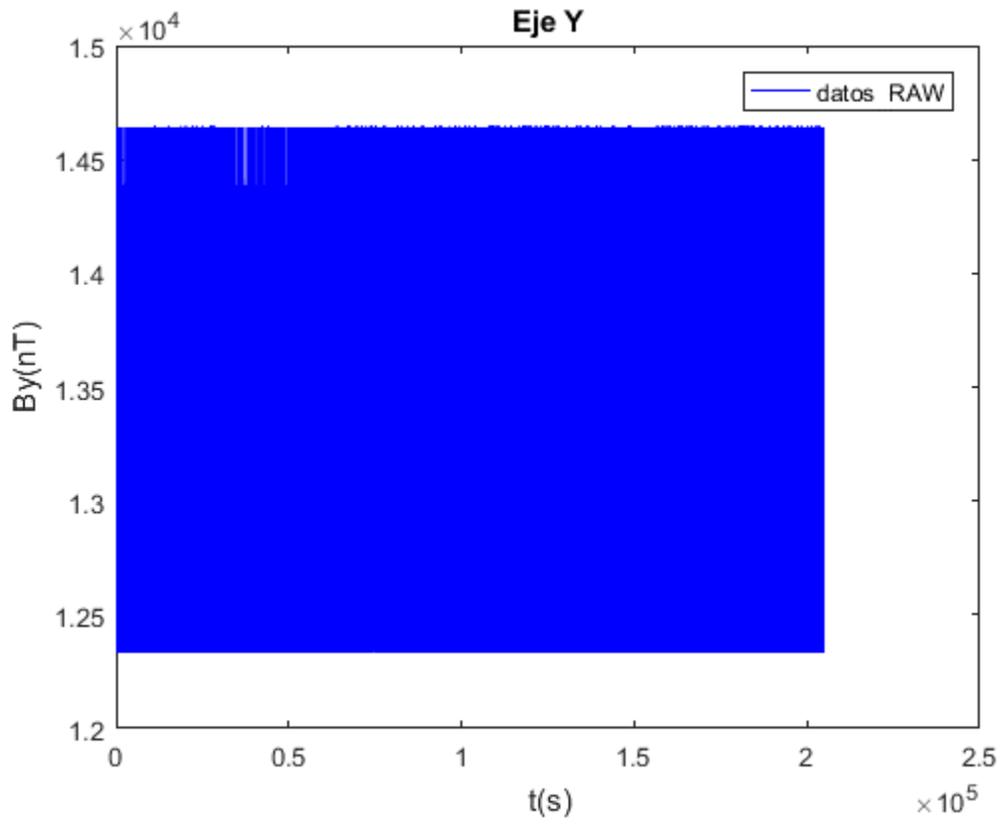


Figura 4.3 Datos Eje Y primera versión estación UAS.

Al igual que en la imagen 4.2, en la imagen 4.3 encontramos mucho ruido y nada visible.

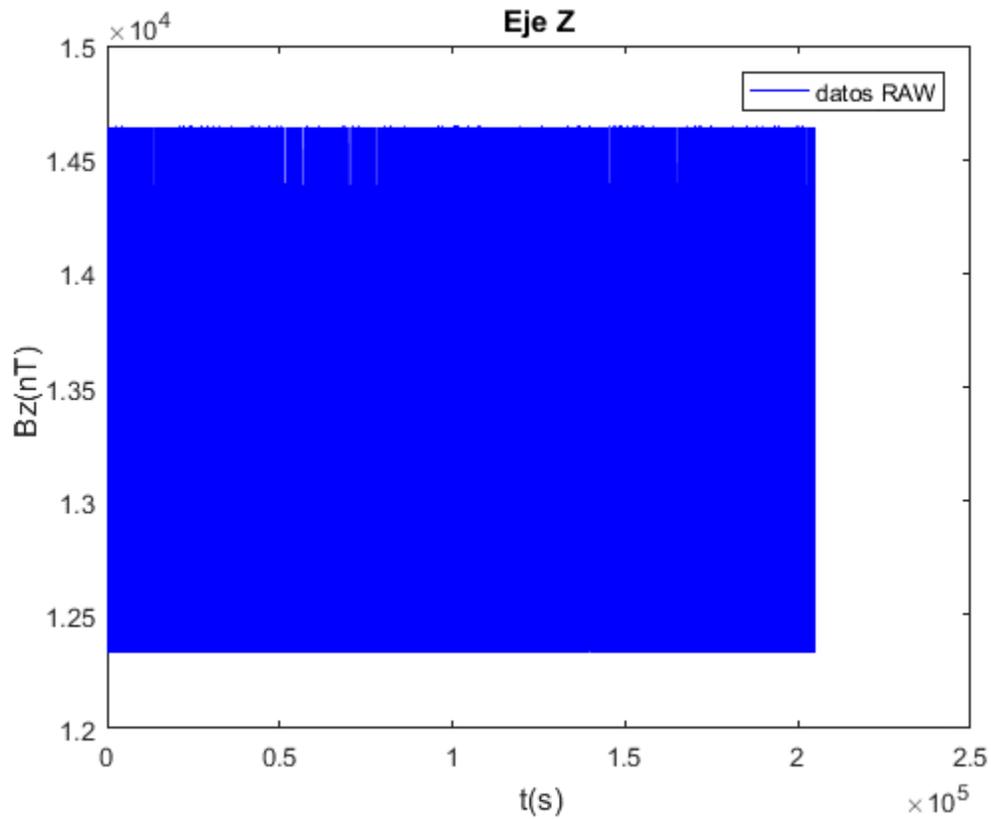


Figura 4.4 Datos Eje Z primera versión estación UAS.

Como se puede observar en las figuras anteriores podemos ver los tres ejes, los cuales se muestra mucho ruido y variación en especial en el eje Z que se puede observar en la figura 4.4, Por esta razón es difícil encontrar datos útiles, que puedan servir para algún estudio real, por lo que gracias a los resultados anteriores, se decidió desarrollar la primera modificación del prototipo para lograr eliminar la mayor cantidad de ruido posible, dando como resultado una gran mejora, como se observa en las figuras siguientes:

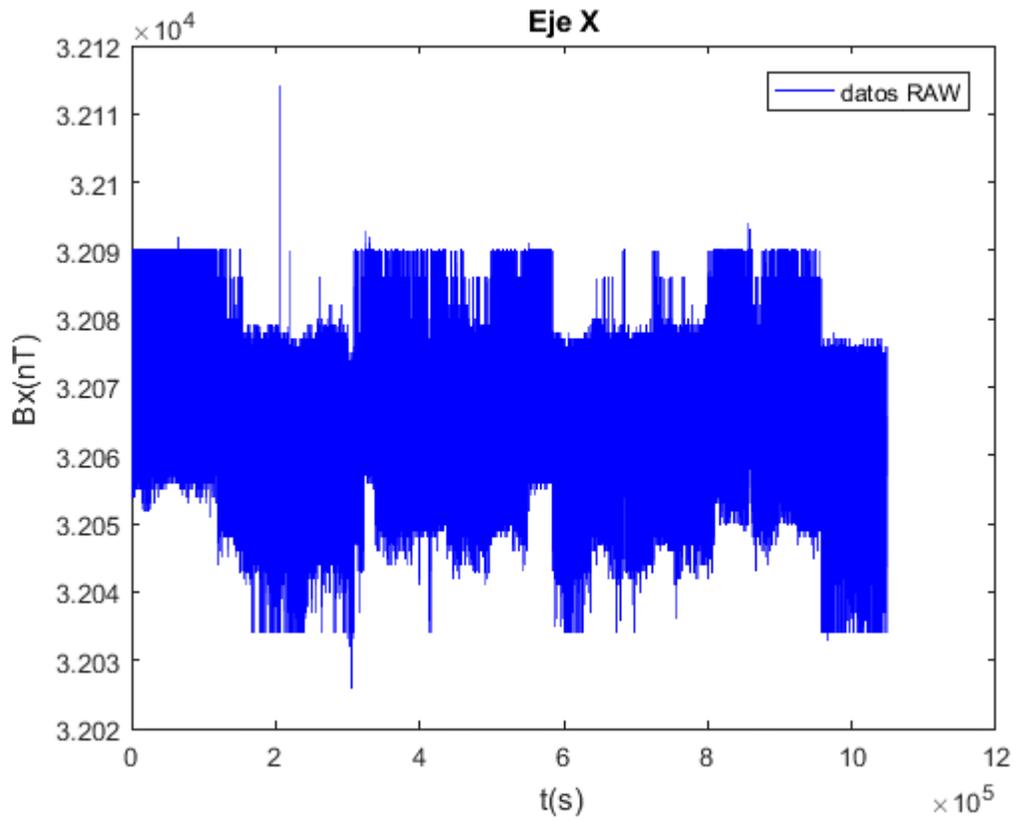


Figura 4.5 Datos eje X primera modificación estación UAS. .

Y como resultado desde la imagen 4.5 que corresponde al eje X de esta primera modificación, se logran apreciar variaciones en el campo magnético terrestre.

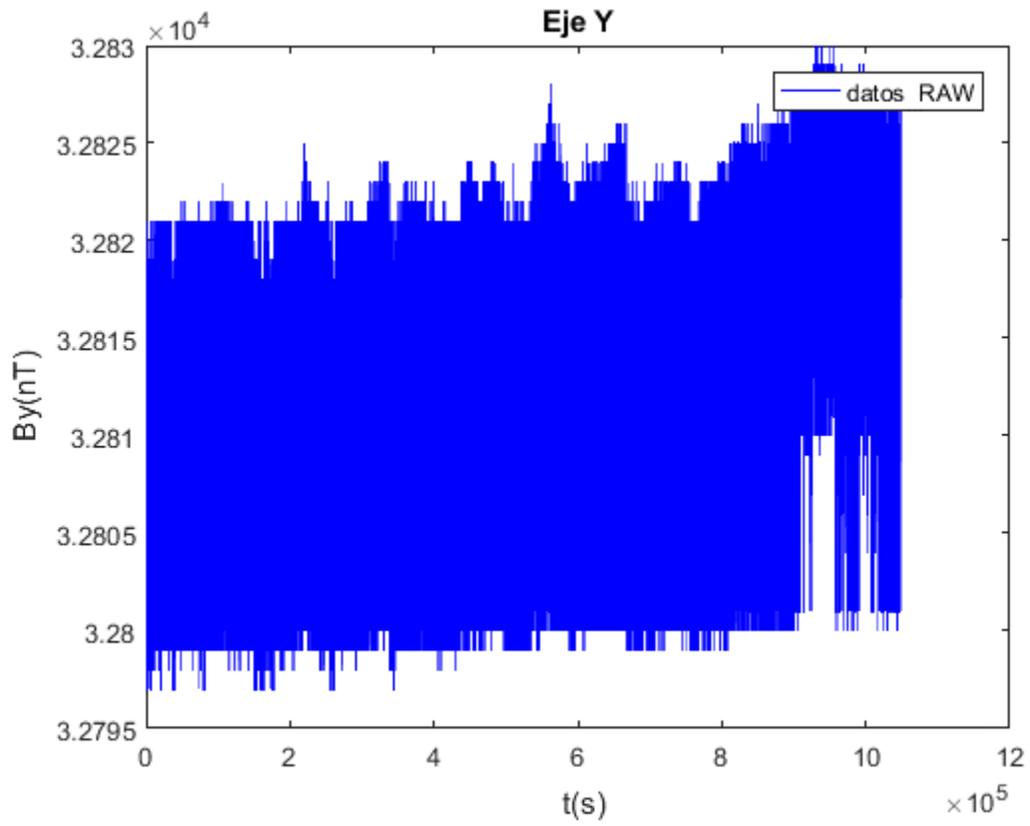


Figura 4.6 Datos eje Y primera modificación estación UAS.

Al igual que en la imagen 4.5, en la imagen 4.6 se puede observar variaciones visibles en el eje Y.

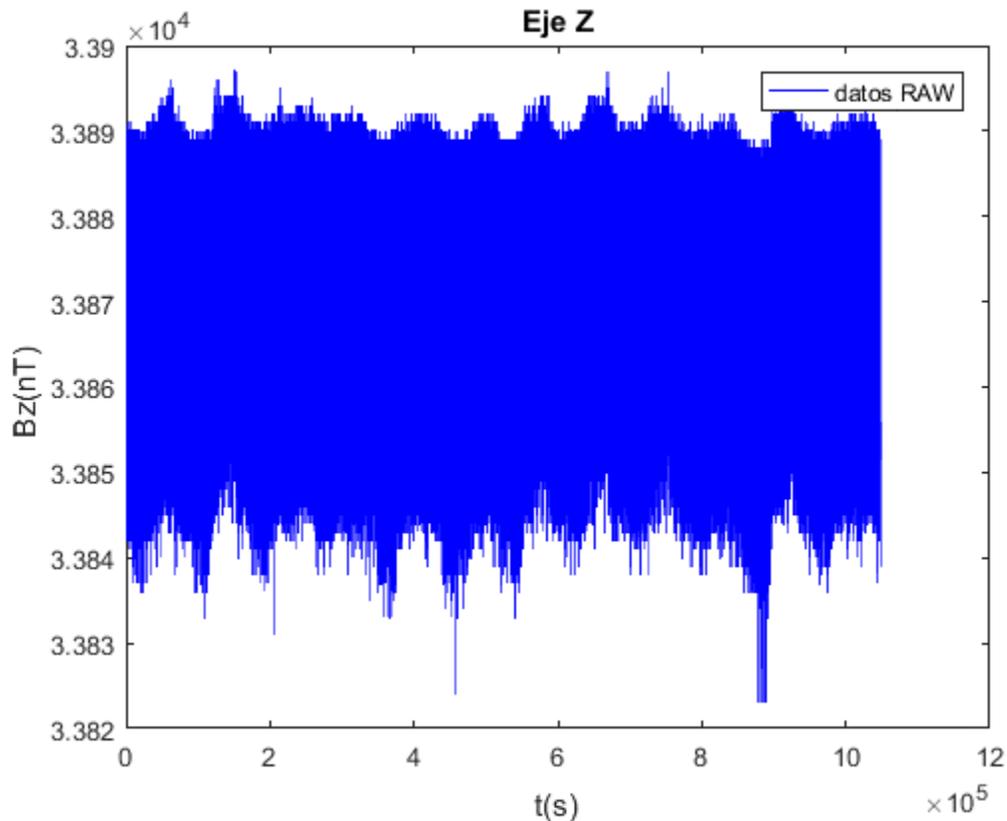


Figura 4.7 Datos eje Z primera modificación estación UAS.

Gracias a los resultados mostrados en las imágenes anteriores 4.5, 4.6, y 4.7 , se pudo observar, un gran cambio en esto, al hacer la modificación, en todos los ejes se puede apreciar una mejora en la adquisición de datos RAW, y en especial en el eje X (figura 4.5) donde las fluctuaciones del campo se vuelven más evidentes, lo cual facilita el trabajo de filtrado y obtención de datos útiles para su análisis.

Aun así, se decidió hacer una tercera modificación como se comentó anteriormente, donde se reemplazaba el ADC de 16 bits, por el de 32 bits. Y los primeros datos obtenidos, arrojaron las siguientes gráficas:

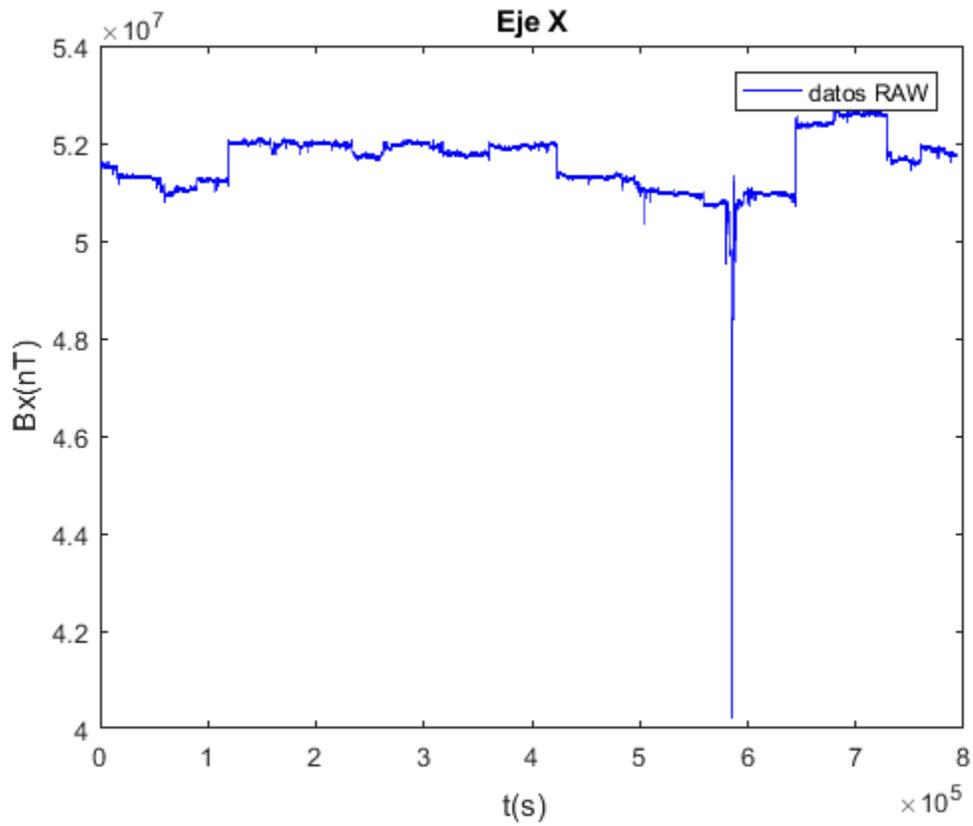


Figura 4.8 Eje X segunda modificación estación UAS.

En la imagen 4.8 podemos observar los datos puros, del eje X de la modificación final del sistema, y el resultado es mucho más claro que con los datos anteriormente obtenidos.

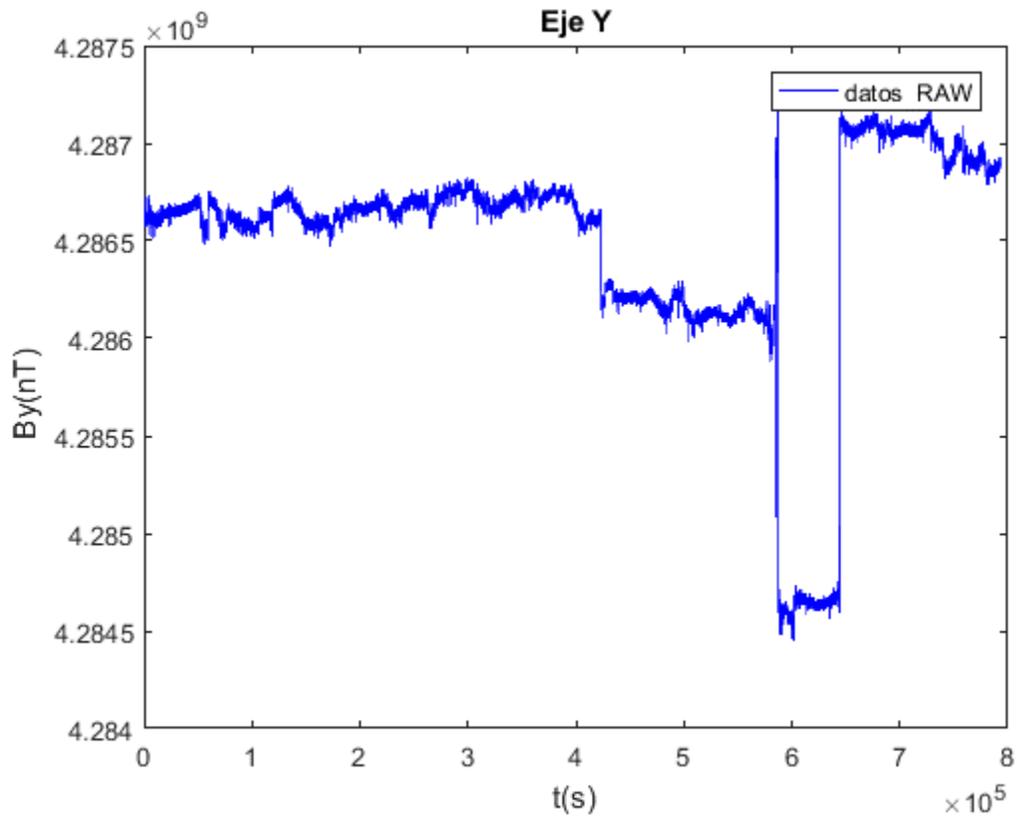


Figura 4.9 Eje Y segunda modificación estación UAS.

También en la figura 4.9 se puede observar una mejora en el eje y con respecto a los datos obtenidos anteriormente, los cuales se pueden observar en la imagen 4.6.

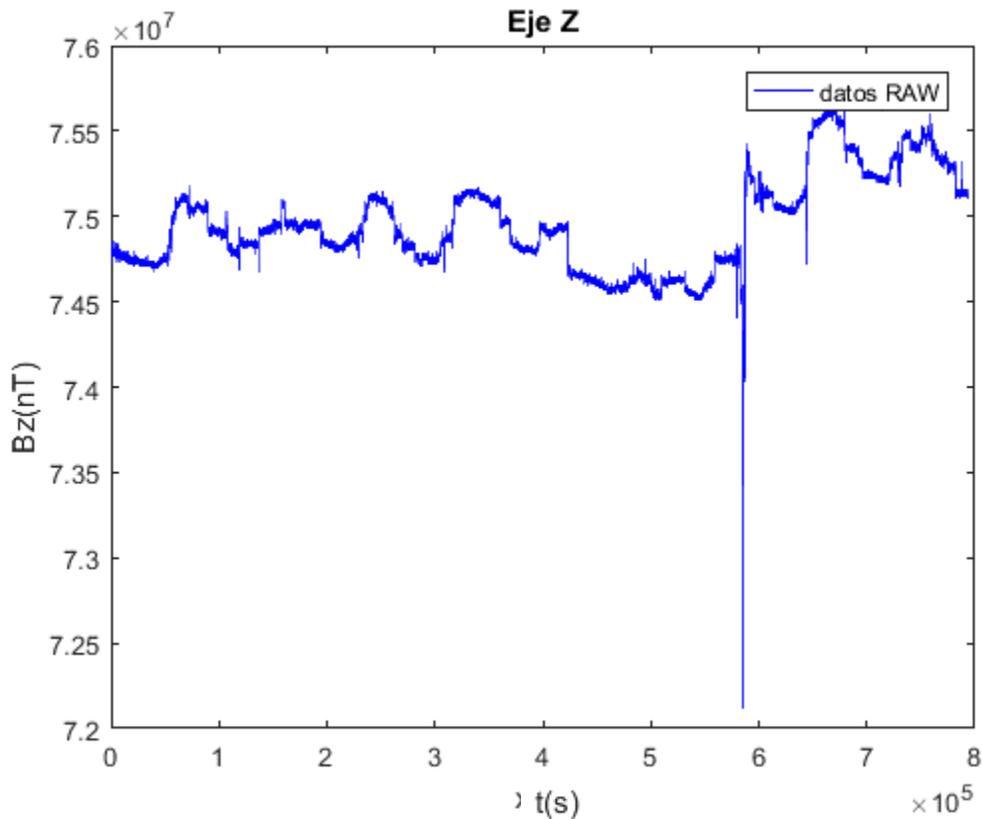


Figura 4.10 Eje Z segunda modificación estación UAS.

Y por último en la imagen 4.10 se observa la mejora en el eje Z y gracias a la última modificación no solo se logró una mejor resolución, sino que además se consiguió mucha atenuación del ruido en la adquisición de datos. Las señales obtenidas por la adquisición, sin algún tratamiento previo, resultan ser mucho más claras, y ahora podemos observar cambios y patrones a simple vista.

4.1 Análisis de evento sísmicos

Con los datos que se han obtenidos con el dispositivo, se decidió analizar 3 eventos que están entre los datos que se pudieron obtener en el tiempo en que el dispositivo estuvo funcionando en sus diferentes etapas:

1. Evento sísmico ubicado a 56 km al SUR de CHOAPAS, VERACRUZ, ocurrido el 29 de enero del 2019 con una magnitud de 5.5.
2. Evento sísmico ubicado a 89 km al SURESTE de SALINA CRUZ, OXACA, ocurrido el 24 de abril del 2019 con una magnitud de 5.3.

3. Evento sísmico ubicado a 259 km al OESTE de CIHUATLAN, JALISCO ocurrido el 31 de mayo del 2019 con una magnitud de 5.8. Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz.

También se adquirieron los datos de la estación TUCSON la cual está ubicada en estados unidos, se decidió utilizar esta estación debido a que es la más cercana, a nuestro dispositivo la cual cumple los requisitos necesarios, debido a que muestrea a 1 Hz, además su sensor tiene una resolución de 24 bits, y tienen registro de los días de interés, como datos anteriores y posteriores.

Todos estos datos fueron adquiridos por medio de la web www.intermagnet.org, estos datos al igual que los datos propios se les hace el mismo filtrado, aplicando filtro media móvil y DWT.

4.1.1 Evento sísmico al SURESTE de SALINA CRUZ, OXACA.

Este evento sísmico es el menos significativo de los tres debido a que no se pudieron obtener datos claros previos al sismo debido a las modificaciones y adecuaciones que se estaban desarrollando sobre el sistema. Los datos sísmicos obtenidos, fueron con el prototipo, en su primera versión. Más las mediciones se hicieron entre la transición del prototipo original y la primera modificación, donde aún se tenía el ADS 8688, pero se retiró el Arduino, para tener una señal más limpia.

Los datos RAW que se obtuvieron en las 3 graficas, son datos con muchos rudos como se ve en la figura siguiente:

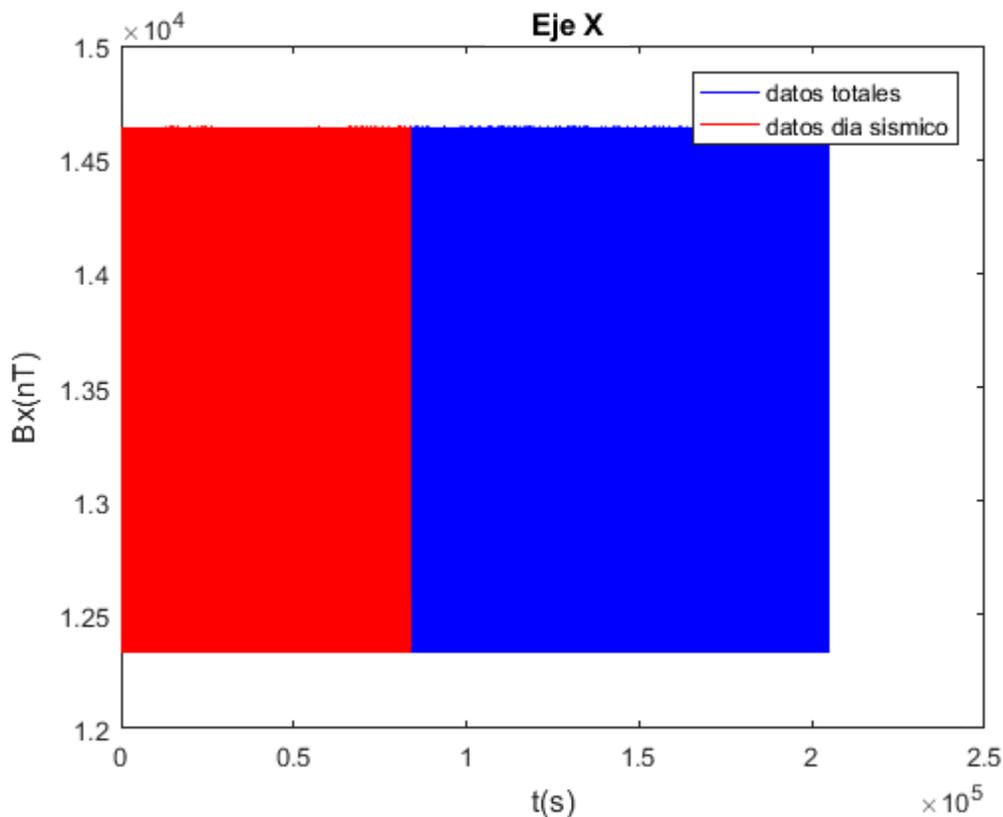


Figura 4.11 Datos estación UAS. Eje x Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz.

Aunque la figura anterior representa solo los datos RAW del eje “X”, a simple vista son datos con demasiado ruido, y es el mismo caso que las figuras 6.1 y 6.2, del anexo donde se logran ver el eje “Y” y “Z”. Gracias a esa gran cantidad de ruido fue que se decidió aplicar el pre procesamiento con el filtro media móvil los cuales dieron como resultado las figuras 6.3, 6.4 y 6.5 en la sección de anexos, y con esos datos obtenidos, como se explicó anteriormente, se utilizan para alimentar el algoritmo de la DWT.

Pero debido al trabajo y las verificaciones que se estuvieron haciendo a los dispositivos, son relativamente pocos los datos que se tiene para poder analizar el evento sísmico además al ser la primera versión, los datos contienen mucho ruido. También se puede notar una gran diferencia entre los datos propios y los datos suministrados por la estación Tucson, la cual utilizamos para ver qué tan fiable son nuestros datos, debido a la calidad y resolución del sensor.

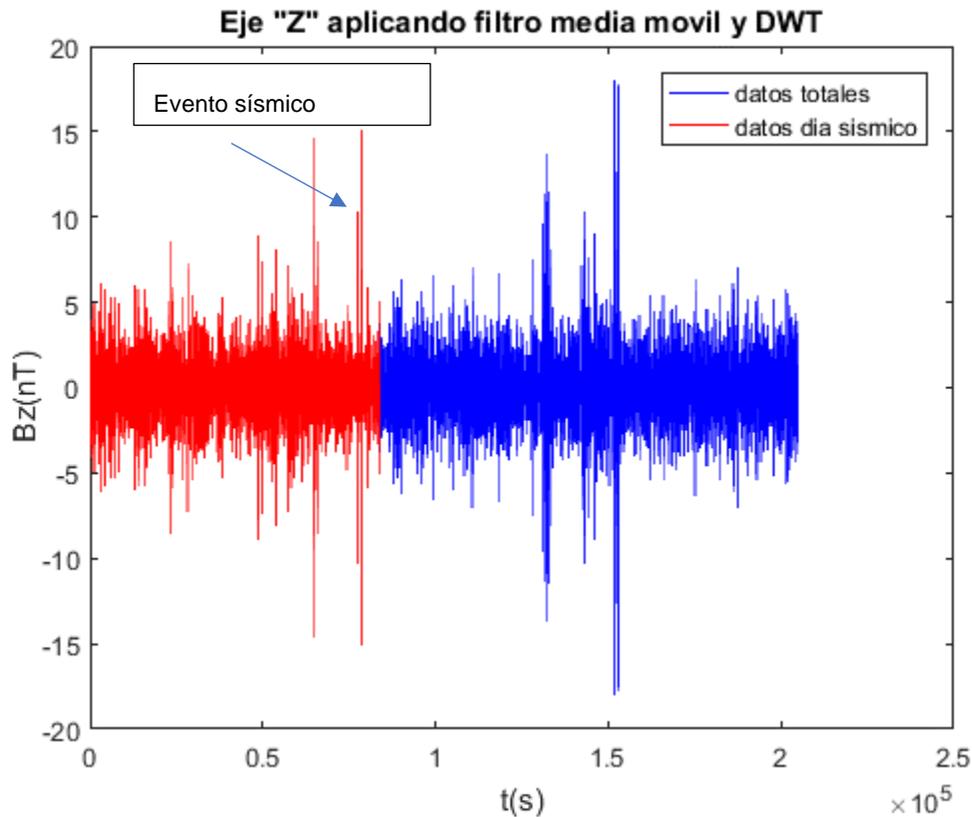


Figura 4.12 Datos estación UAS. Eje Z del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil y DWT.

En la figura anterior como se mencionó antes no se tiene suficientes datos pre sísmicos, se alcanza a notar una anomalía en el campo justo al momento de evento, y un posible evento post sísmico. Aunque se necesitaban más datos para poder ver si hubo tanto otros eventos post sísmicos, como también pre sísmicos.

Se eligió la figura 4.12 que corresponde al eje z ya con todo el proceso de filtrado, debido que fue la que en este caso mostro mejor respuesta al evento, al igual que menos ruido, a diferencia de los otros dos ejes, los cuales los resultados finales se pueden ver en las figuras 6.6 y 6.7 del anexo.

Aunque para este evento sísmico se tiene en cuenta que todos los días donde se obtuvieron datos, el índice DST o "Disturbance Storm-Time" por su nombre en inglés, estuvo fuera de lo normal, lo que podría afectar la medición del sensor. Por lo que se

puede decir que, utilizando la metodología propuesta, es posible resaltar anomalías en el campo magnético terrestre, más por la falta de datos y un índice DST estable en los días medidos, este análisis es inconcluyente.

Cabe recalcar, la diferencia entre los datos de la estación Tucson y esta primera versión, como se puede ver representada en la siguiente figura:

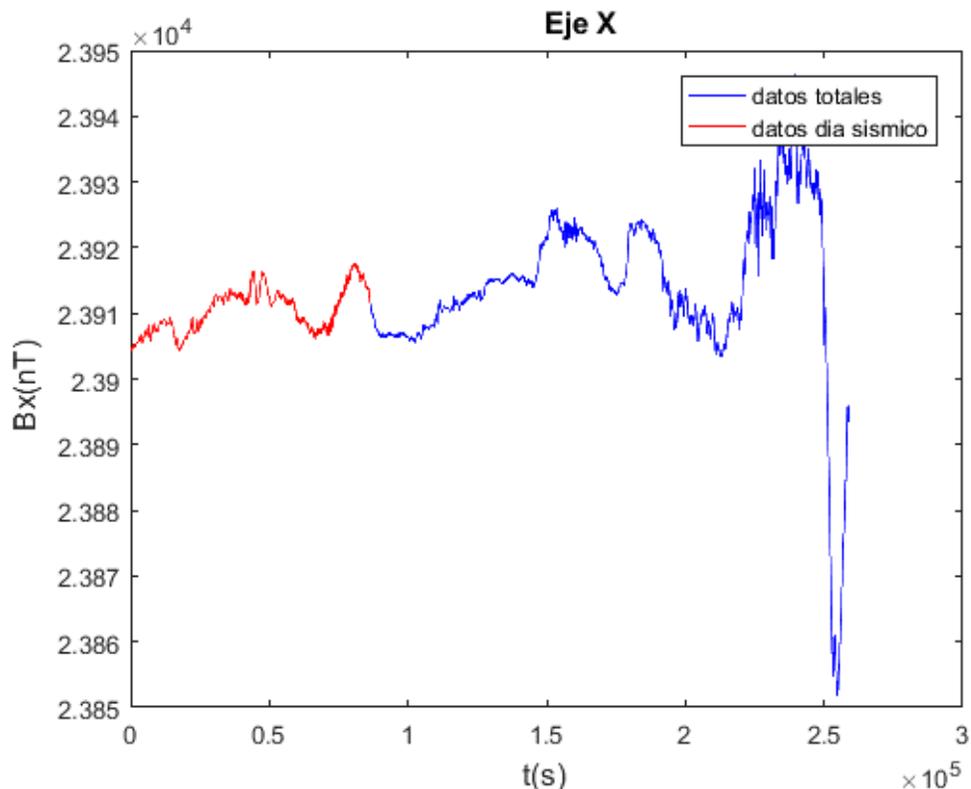


Figura 4.13 Datos estación Tucson, eje X Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz

Se puede observar una gran diferencia entre los datos RAW de la estación Tucson (figura 4.13) y Los de la estación propia (figura 4.11), y esto se puede observar en todo los ejes, incluso en la estación Tucson a simple vista se logran ver sobresaltos en el campo magnético, pero para poder comparar mejor los datos, se les aplica el mismo filtrado y se obtienen resultados mucho más claros, como se pueden observar en las figuras 6.9 y 6.10.

Por ultimo para este evento sísmico podemos ver también grandes diferencias entre las señales ya filtradas, como se ve a continuación en la figura 4.14, los sobresaltos o

anomalías en el campo geo magnéticos están mucho más resaltadas y visibles, con comparación a la figura 4.13 que son menos visibles y contienen más ruido.

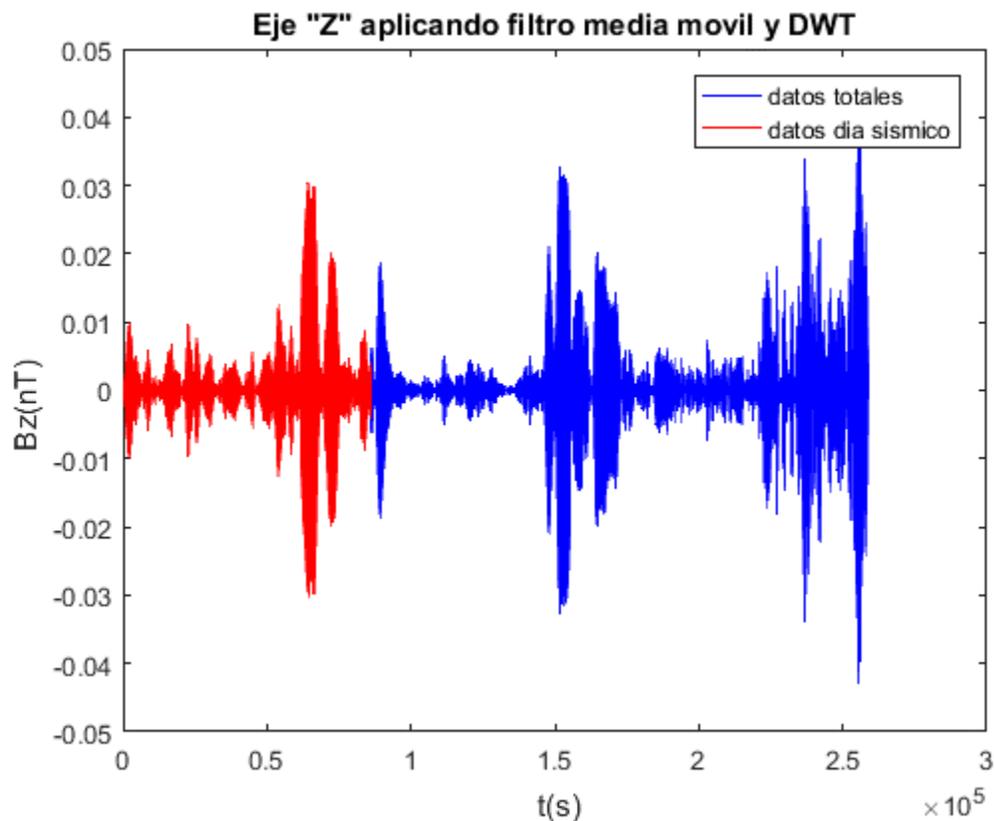


Figura 4.14 Datos Tucson, Eje Z del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil y DWT.

4.1.2 Evento sísmico del sureste de salina cruz

El evento sísmico del sureste de salina cruz se analizó debido a que se tienen los rangos de días y datos necesarios para trabajar. Para esto se tomaron datos. 4 días antes del sismo, el día del sismo y 4 días después del sismo.

Estos datos, fueron tomados con un ADC de 16 bits, a 1 Hz, solo que ya correctamente configurada e implementada la primera modificación donde se retiraba el Arduino del sistema. Lo que se muestra a continuación son los datos puros (RAW) obtenidos por el sensor, el cual evidentemente en las gráficas se muestra una gran mejora y eliminación de gran parte del ruido, aunque nos encontramos con errores de cuantización debido a la baja resolución del ADS 8688.

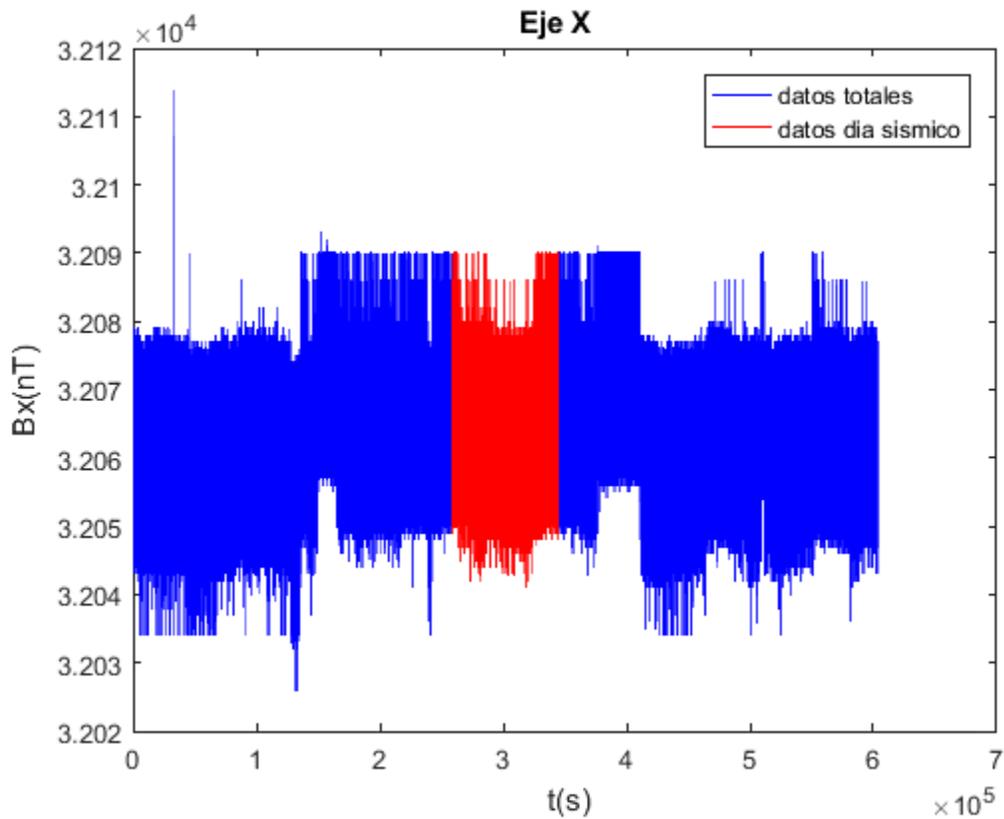


Figura 4.15 Datos estación UAS. Eje x evento sísmico del sureste de salina cruz.

Es mucho más evidente el cambio si observamos la figura 4.15 con comparación a la figura 4.11 del sismo anterior, al igual que al observar las figuras de los demás en el anexo.

Aunque de igual manera como se ve en las figuras 6.23, 6.24, 6.25 del anexo, la estación Tucson, sigue teniendo datos más limpios y claros que los datos tomados por la estación UAS.

Observando los datos RAW, de la estación propia se logra ver en la figura 4.29 del eje "x", una mayor variación en el día del evento sísmico, en comparación con las figuras de los otros dos ejes. Y de igual manera se logra apreciar un comportamiento muy similar en los datos obtenidos de la estación Tucson. Lo siguiente es aplicarles media móvil y DWT para poder resaltar más los datos.

Por lo que podemos suponer que será el eje que también al aplicarle los filtros se pueda ver una mejor respuesta.

Gracias a los resultados obtenidos nos podemos dar cuenta de una anomalía en el campo magnético antes, durante y después del día del terremoto, por lo que se podría decir que son posible eventos pre sísmicos, sísmicos y post sísmicos. Este fenómeno se puede observar más fácilmente en el eje "x", el cual fue el más afectado por este.

E incluso en los datos obtenidos en la estación Tucson, el eje con más datos anormales fue el eje X.

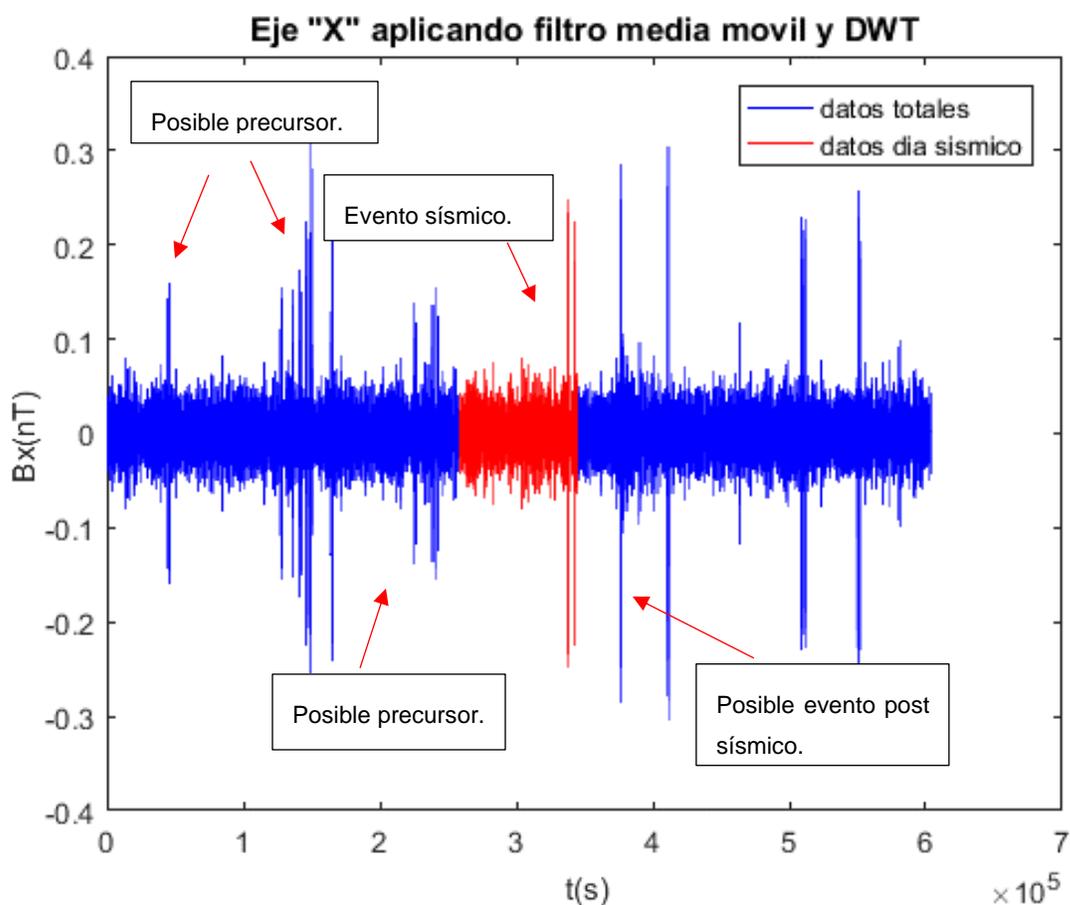


Figura 4.16 Datos estación UAS. Eje X filtro media móvil y DWT evento del sureste de salina cruz, mostrando posibles anomalías.

Se puede apreciar en la figura anterior, varios eventos pre sísmicos, los cuales imitan el efecto ocurrido el día del evento sísmico, estos efectos, se asemejan mucho entre sí, y como menciona (Chavez et al., 2018), normalmente ocurren "explosiones" pre y post

sísmicas, las cuales suelen imitar un comportamiento similar entre ellas, e irregular a los demás datos, en ese trabajo utilizaron DWT, las cuales daban como resultado ondas muy parecidas a las señaladas en la gráfica.

Aunque si vemos en los datos obtenidos por la estación Tucson, tenemos datos tanto en el eje y como en el eje "Z" datos muy anómalos marcados, los cuales suelen referirse a fallas en el sensor, por lo que para efectos prácticos utilizaremos el eje "X" aunque parece ser de los 3 el eje más marcado, pero el que meno fue afectos por las fallas de su sensor, de igual manera como dato curioso si vemos las figuras y del anexo, nos podemos dar cuenta que el eje "Y" y el eje "Z" tienen comportamientos o forma de ondas iguales pero a la vez inversas.

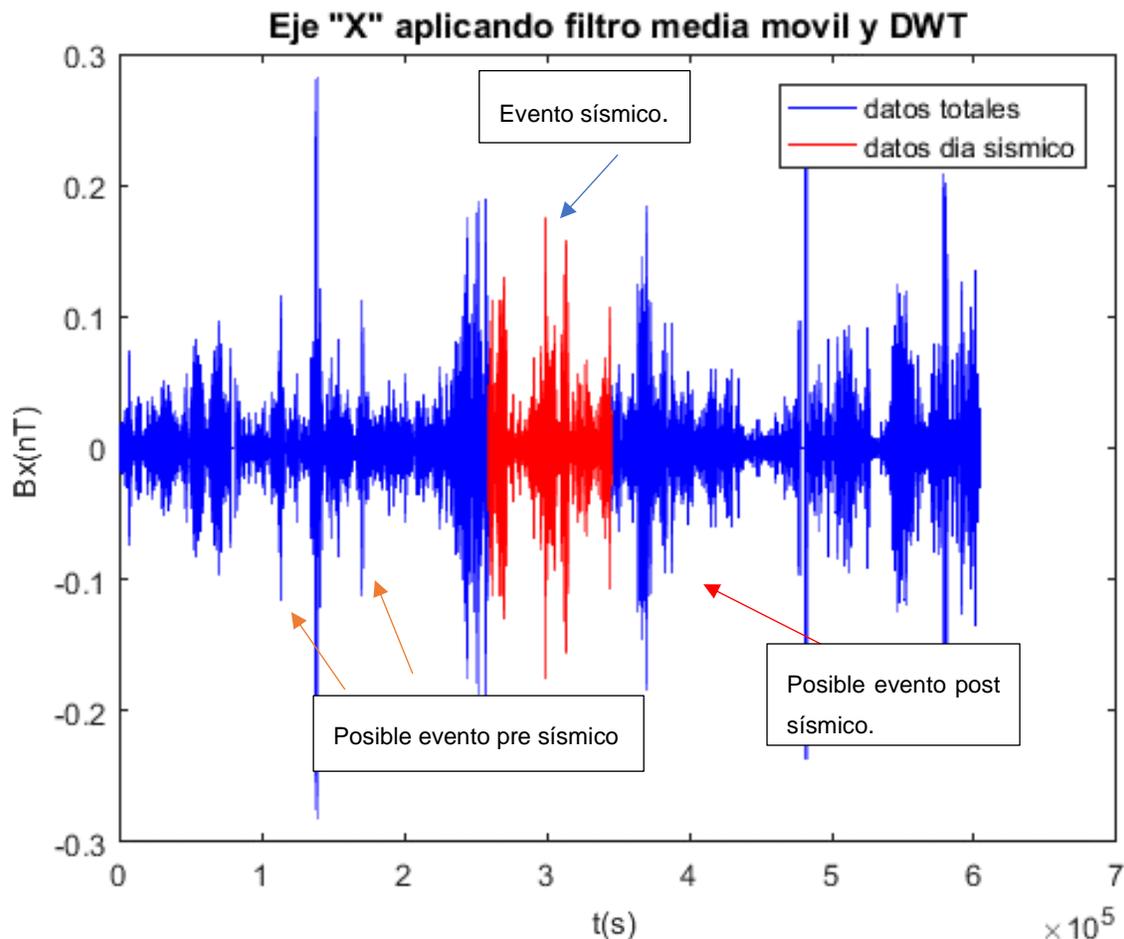


Figura 4.17 Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

Como nos damos cuenta en la figura anterior también podemos notar algunos eventos anómalos que como fueron señalados pueden ser eventos pre y post sísmicos en los datos de la estación Tucson.

4.1.3 Evento sísmico al oeste de Cihuatlán, Jalisco.

Este evento es de los más reciente, por lo que se decidió analizarlo, además que este evento ocurrió con el prototipo en su modificación final funcionando, la cual fue donde se le actualizo el ADC por uno de mayor resolución. Al igual que en el anterior se tomaron 4 días antes 4 días después del evento sísmico para el análisis.

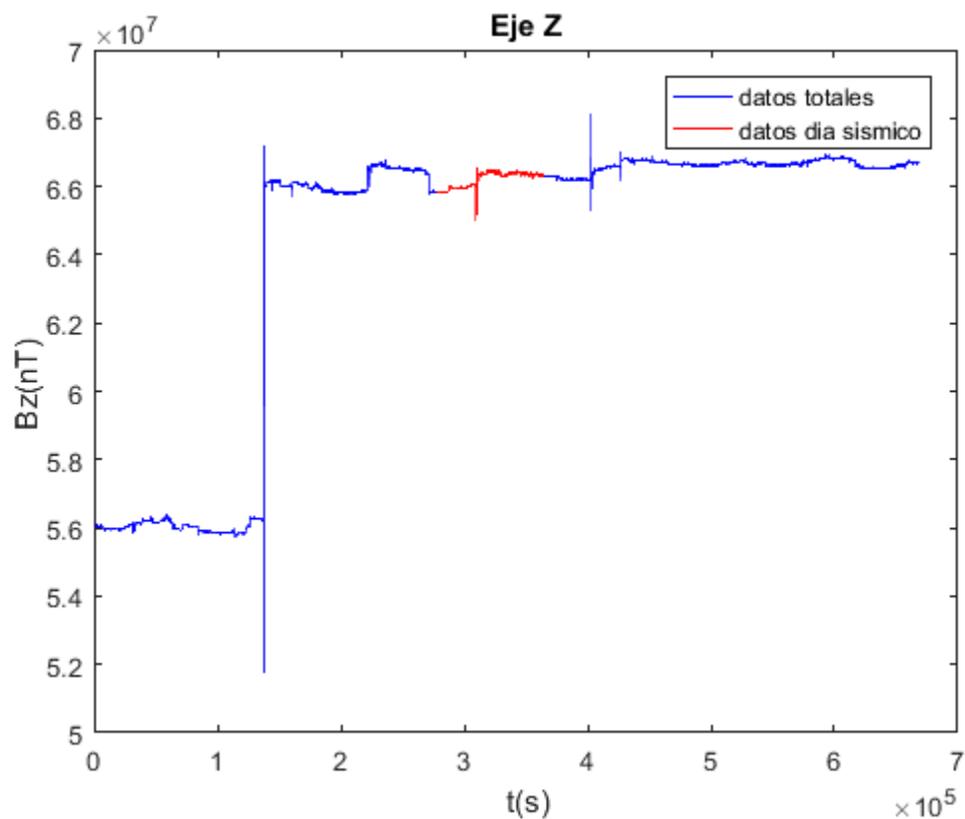


Figura 4.18 Datos estación UAS. Eje Z evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

Los datos obtenidos en la estación Tucson, muestran una mayor diferencia y variaciones que incluso la estación final que se desarrolló, aunque es un equipo mucho más costoso y con mucho más tiempo de desarrollo.

También nos damos cuenta gracias a las figuras 6.33, 6.37 que el eje “Y” no está aportando información útil sobre el terremoto, por lo que se analiza los resultados de eje “Z”:

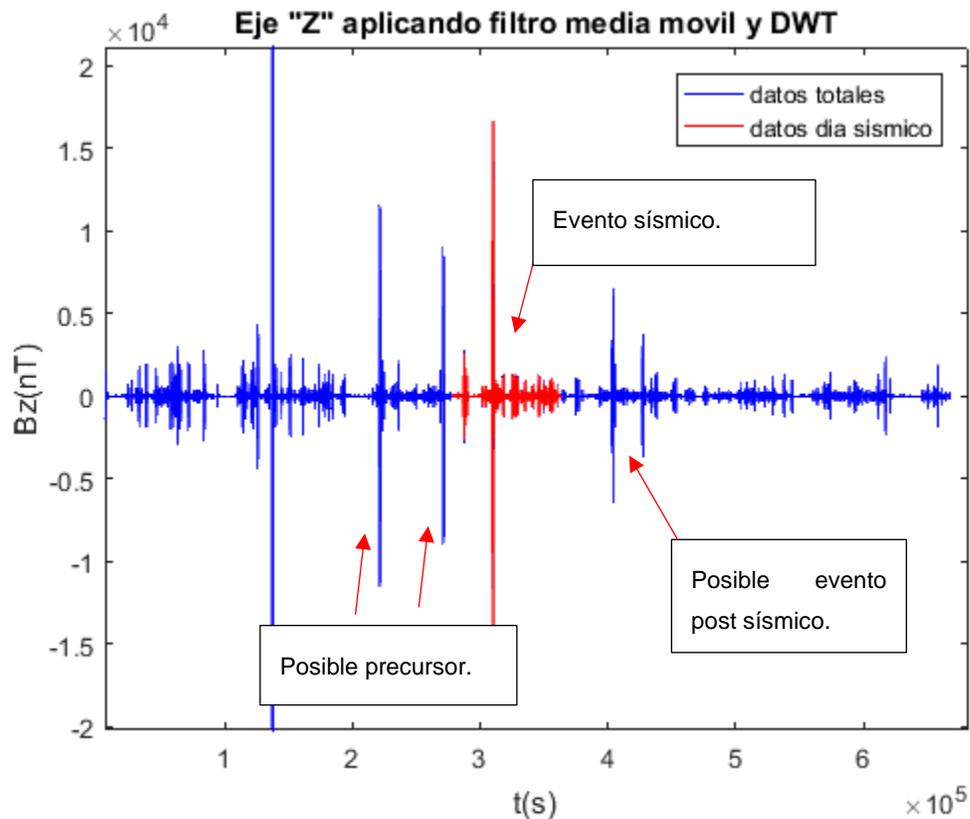


Figura 4.19 Datos estación UAS. Eje z media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco mostrando posibles anomalías.

El día del evento sísmico, y justo a la hora del evento se encontró una gran anomalía en los datos obtenidos, y este mismo efecto se encuentra uno y dos días antes del sismo, lo cual podría tratarse de eventos pre- sísmicos. Al igual que se encontró un evento que sigue el mismo patrón un día después, por lo que podría ser un evento post sísmico, producido por el sismo de Cihuatlán.

Por el contrario, en las gráficas obtenidas de los datos de la estación Tucson, centramos datos pocos concluyentes, siendo los más claros los del eje “Y” (Figura 6.47) puesto que aunque también los del eje “Z” (figura 4.20) son parecidos, en el eje “Y” se nota mejor las

alteraciones los datos. Por otro lado, el eje "X" (figura 6.46) no es muy claro por lo que no se puede utilizar para analizar los datos

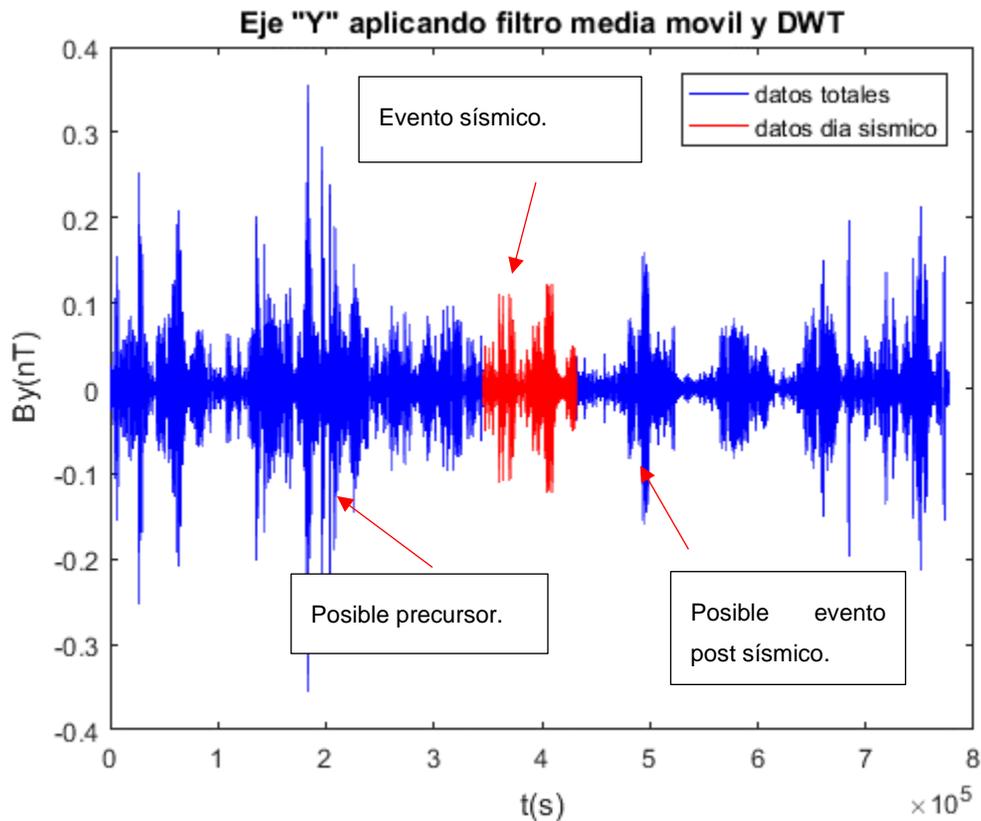


Figura 4.20 Datos estación Tucson, Eje Y filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

Aunque se señala el evento sísmico, en la figura anterior, como se había estado comentando no logran ser muy claros los datos de la estación Tucson, esto es debido a que esos días en algunos momentos la estación tuvo fallos, los cuales se vieron reflejados en sus datos, al igual que los eventos pre y post sísmicos no son fácilmente identificables.

5 CONCLUSIONES.

5.1 Conclusión.

Se logró diseñar un sistema propio para el monitoreo del campo magnético terrestre, utilizando tanto conocimientos previos como también conocimientos adquiridos en la maestría, por lo cual el dispositivo no solo logro tener un costo menor a sistemas comerciales, sino que también, se logró que fuera open hardware Y software, esto da la posibilidad de modificarlo y utilizarlo a voluntad propia.

Y se logró mejorar el mismo como dando por resultado un sistema mínimo, donde de la primera versión, a la versión final, se observa una gran mejoría gracias a la eliminación de elementos los cuales ocasionaban ruido, como también, el eliminar errores de cuantificación al usar un ADC de mayor resolución.

Los datos que se adquirieron en su mayoría fueron datos de buena calidad, con los cuales utilizando una computadora promedio, sin grandes prestaciones, se pudo hacer un buen análisis y poder detectar posibles precursores sísmicos con lo cual se abre una ventana para que cualquier persona con interés y sin necesidad de gran capital, pueda hacer sus estudios propios sobre el campo magnético terrestre.

Para comprobar el resultado del sistema propio, se utilizó los datos de una estación externa, de los cuales, aunque en general la estación externa tuvo mejores resultados, a la hora de graficar, y verse los datos más claramente, se puede comprobar a simple vista que siguen un patrón similar las señales a las que se pudieron observar con el sistema propio.

El dispositivo final desarrollado tiene un costo de alrededor de 1500 Usd, por el contrario, un dispositivo comercial, su precio mínimo es de 10.000 Usd, Además que no es fácil adquirirlos.

Al igual que se deja una base útil para que en trabajos futuros se puedan analizar estos fenómenos a más profundidad y por medio del uso de la media móvil y el DWT, se comprobó que se puede observar ciertos comportamientos inusuales.

5.2 Trabajo futuro.

- El sensor que se utilizó es bueno, pero limitado por su tamaño y alcance, en un trabajo futuro, se plantea la posibilidad de cambiar este sensor por alguno aún más fiable y sensible.
- Utilizar técnicas de análisis de señales más rudas clasificarse, para poder captar mejor los comportamientos inusuales en el campo magnético terrestre.
- Probar técnicas de análisis nuevas, que se están proponiendo en algunos trabajos, como el método de fluctuaciones críticas, sobre los datos adquiridos por nuestro sistema.
- Poder analizar los datos obtenidos y dar avisos en tiempo real de anomalías, para poder estudiarlas, incluso antes de que ocurra algún evento sísmico.
- Lograr dar acceso fácil y rápido a los datos obtenidos, puesto que en la actualidad se hace de forma manual.

BIBLIOGRAFÍA.

- A. Meljarego. (2017). *Procesamiento y análisis de información geoespacial en busca de precursores sísmicos en la ionosfera en México*. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SINALOA.
- Alegria, O. C., Valtierra-Rodriguez, M., Amezcuita-Sanchez, J. P., Millan-Almaraz, J. R., Rodriguez, L. M., Moctezuma, A. M., ... Cruz-Abeyro, J. A. (2015). Empirical wavelet transform-based detection of anomalies in ULF geomagnetic signals associated to seismic events with a fuzzy logic-based system for automatic diagnosis. In *Wavelet transform and some of its real-world applications*. IntechOpen.
- Auster, H. U., Glassmeier, K. H., Magnes, W., Aydogar, O., Baumjohann, W., Constantinescu, D., ... Harvey, P. (2008). The THEMIS fluxgate magnetometer. *Space Science Reviews*, 141(1–4), 235–264.
- Baschiroto, A., Dallago, E., Ferri, M., Malcovati, P., Rossini, A., & Venchi, G. (2010). A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup. *Measurement*, 43(1), 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.06.007>
- Chávez Alegría, O. (2011). *Análisis de perturbaciones magnéticas tipo ULF asociadas con eventos sísmicos*.
- Chavez, O., Millan-Almaraz, J. R., Rodríguez-Reséndiz, J., Amezcuita-Sanchez, J. P., Valtierra-Rodriguez, M., & Cruz-Abeyro, J. A. L. (2018). DWT-based methodology for detection of seismic precursors on electric field signals in Mexico. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 281–294. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1428229>
- Chulliat, A., Macmillan, S., Alken, P., Beggan, C., Nair, M., Hamilton, B., ... Thomson, A. (2015). *The US/UK world magnetic model for 2015-2020*.
- Cruz-Abeyro, J. A. L., Enríquez, R. P., Zúñiga, R., & Kotsarenko, A. (2004). ¿ Por qué estudiar señales electromagnéticas durante sismos? *Revista Geofísica*, (60).
- Dudkin, F., Korepanov, V., Dudkin, D., Pilipenko, V., Pronenko, V., & Klimov, S. (2015).

Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1–60 Hz. *Geophysical Research Letters*, 42(14), 5686–5693.

Forslund, Å., Belyayev, S., Ivchenko, N., Olsson, G., Edberg, T., Marusenkov, A., ... Rymd- och, plasmafysik. (2008). Miniaturized digital fluxgate magnetometer for small spacecraft applications. *Measurement Science and Technology*, 19(1), 15202. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015202>

Freund, F. T. (2003). Rocks that crackle and sparkle and glow: strange pre-earthquake phenomena. *Journal of Scientific Exploration*, 17(1), 37–71.

Gordon, D., & Brown, R. (1972). Recent advances in fluxgate magnetometry. *IEEE Transactions on Magnetics*, 8(1), 76–82. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1972.1067268>

Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561–566.

Hattori, K., Han, P., & Huang, Q. (2013). Global variation of ULF geomagnetic fields and detection of anomalous changes at a certain observatory using reference data. *Electrical Engineering in Japan*, 182(3), 9–18. <https://doi.org/10.1002/eej.22299>

Hemshorn, A., Auster, H. U., & Fredow, M. (2009). DI-flux measurement of the geomagnetic field using a three-axial fluxgate sensor. *Measurement Science and Technology*, 20(2), 27004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/027004>

Huircán, J. I. (2007). Conversores Análogo-Digital y Digital-Análogo: Conceptos Básicos. *Recuperado El*, 28.

I. Gordon, D., E. Brown, R., & F. Haben, J. (1972). Methods for Measuring the Magnetic Field. *Magnetics, IEEE Transactions On*, 8, 48–51. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1972.1067266>

Jashank, M., Gupta, S. J., & Nair, J. M. (2014). Analysis of environmental temperature variation as a precursor of earthquake prediction using I2C. *2014 Annual IEEE India*

- Conference (INDICON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2014.7030523>
- Johnston, M. J. S., & Mueller, R. J. (1987). Seismomagnetic Observation during the 8 July 1986 Magnitude 5.9 North Palm Springs Earthquake. *Science*, *237*(4819), 1201–1203. <https://doi.org/10.1126/science.237.4819.1201>
- Joseph, O. O., Yamazak, Y., Cilliers, P., Baki, P., Ngwira, C. M., & Mito, C. (2015). A study on the response of the Equatorial Ionization Anomaly over the East Africa sector during the geomagnetic storm of November 13, 2012. *Advances in Space Research*, *55*(12), 2863–2872. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.011>
- Kanata, B., Zubaidah, T., & Wiriasto, G. (2016). *Correlation of Geomagnetic Signal for Earthquake Studies in Indonesian, Australian and Pacific Regions*. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828693>
- Kirschvink, J. L. (2000). Earthquake prediction by animals: Evolution and sensory perception. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *90*(2), 312–323.
- Le, H., Liu, J., Zhao, B., & Liu, L. (2015). Recent progress in ionospheric earthquake precursor study in China: A brief review. *Journal of Asian Earth Sciences*, *114*, 420–430. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.06.024>
- Lenz, J., & Edelstein, S. (2006). Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensors Journal*, *6*(3), 631–649. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.874493>
- Masci, F. (2012). Comment on “Possible association between anomalous geomagnetic variations and the Molise Earthquakes at Central Italy during 2002” by Takla et al. (2011). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *202–203*, 92–94. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.02.006>
- Masci, F., & Di Persio, M. (2012). Retrospective investigation of geomagnetic field time-series during the 2009 L’Aquila seismic sequence. *Tectonophysics*, *530–531*, 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.008>
- Medford, L. V., Maclennan, C. G., Rosenfeld, P. E., Lanzerotti, L. J., & Acuna, M. H. (1981). Low-Power Portable Geophysical Data Acquisition System And Its Use in

- Geomagnetic Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-19(3), 122–128. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1981.350340>
- Mokhtari, M. (2010). Earthquake prediction activities and Damavand earthquake precursor test site in Iran. *Natural Hazards*, 52(2), 351–368.
- Richon, Patrick, Klinger, Y., Tapponnier, P., Li, C.-X., Van Der Woerd, J., & Perrier, F. (2010). Measuring radon flux across active faults: Relevance of excavating and possibility of satellite discharges. *Radiation Measurements*, 45(2), 211–218.
- Richon, Patrik, Sabroux, J., Halbwegs, M., Vandemeulebrouck, J., Poussielgue, N., Tabbagh, J., & Punongbayan, R. (2003). Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: a likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994). *Geophysical Research Letters*, 30(9).
- Rodríguez, G. P. (2019). *Estación De Monitoreo Geo Electromagnetico Para Aplicaciones De Procesamiento Digital De Señales En La Nube*. Universidad Autónoma De Sinaloa.
- Rokityansky, I., Babak, V., & Tereshyn, A. (2016). An analysis of geomagnetic response functions prior to the Tohoku, Japan earthquake. *Journal of Volcanology & Seismology*, 10(6), 395–406. <https://doi.org/10.1134/S0742046316060063>
- Romanovskaya, Y. V, Namgaladze, A. A., Zolotov, O. V, Starikova, N. A., & Lopatiy, V. Z. (2012). Searching for seismo-ionospheric earthquakes precursors: Total electron content disturbances before 2005-2006 seismic events. *ArXiv Preprint ArXiv:1205.0419*.
- Ross, J. (1835). *Narrative of a Second Voyage in Search of a North-West Passage and of a Residence in the Arctic Regions During the Years 1829, 1830, 1831, 1832, 1833: Including the Reports of Capt. JC Ross... and the Discovery of the Northern Magnetic Pole* (Vol. 92). Baudry.
- Ruiz, F., Sánchez, M. A., Martínez, M., Gimenez, M., Leiva, F., Alvarez, O., & Introcaso, A. (2011). *La Estación Magnética Zonda: Estudio De Perturbaciones Magnéticas Relacionadas Con Terremotos. San Juan, Argentina* (Vol. 01).

- Sanchez, J. P. A., Alegria, O. C., Rodriguez, M. V., Abeyro, J. A. L. C., Almaraz, J. R. M., & Gonzalez, A. D. (2017). Detection of ULF Geomagnetic Anomalies Associated to Seismic Activity Using EMD Method and Fractal Dimension Theory. *IEEE Latin America Transactions*, 15(2), 197–205. <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7854612>
- Trivedi, N. B., Russell, C. T., Barbosa, M. J. F., Dutra, S. L. G., Teixeira, N. R., Means, J. D., & Neri, J. A. (2000). Geomagnetic field investigation on the polar microsatellite SACI-1. *Advances in Space Research*, 25(7), 1315–1323. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00640-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00640-7)
- Tsutsui, M. (2014). Behaviors of electromagnetic waves directly excited by earthquakes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(11), 1961–1965.
- Uyeda, S., Nagao, T., & Tanaka, H. (2004). A report from the RIKEN international frontier research project on earthquakes (IFREQ). *TERRESTRIAL ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCES*, 15(3), 269–310.
- Vestine, E. H. (1954). Winds in the upper atmosphere deduced from the dynamo theory of geomagnetic disturbance. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 59(1), 93–128. <https://doi.org/10.1029/JZ059i001p00093>
- Wadatsumi, K. (1995). *Precursory Quake Information 1519 prior to Hanshin Earthquake*. Tokyo Pub.

6 ANEXOS.

6.1 Códigos.

https://drive.google.com/open?id=14WTnpqylex_MtP732CdRx8HNID48UOPG

6.2 Gráficas.

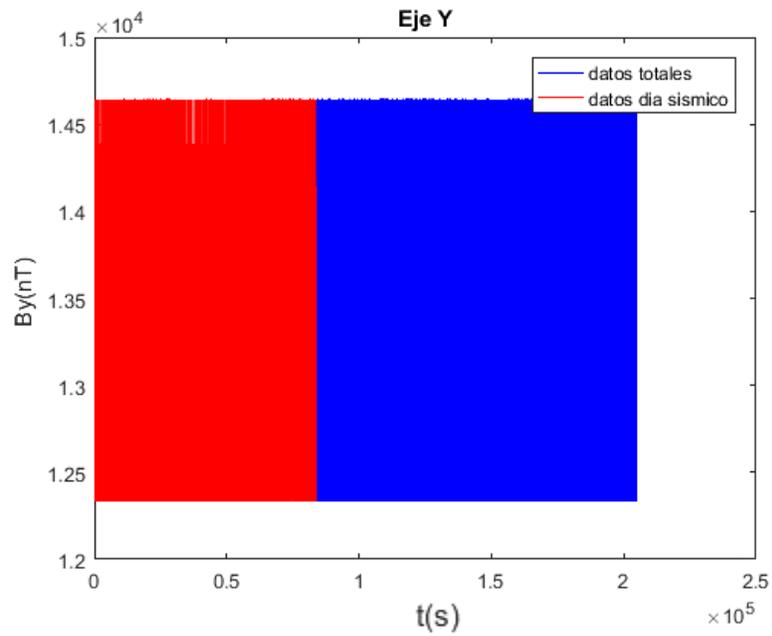


Figura 6.1 Datos estación UAS. Eje Y Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz.

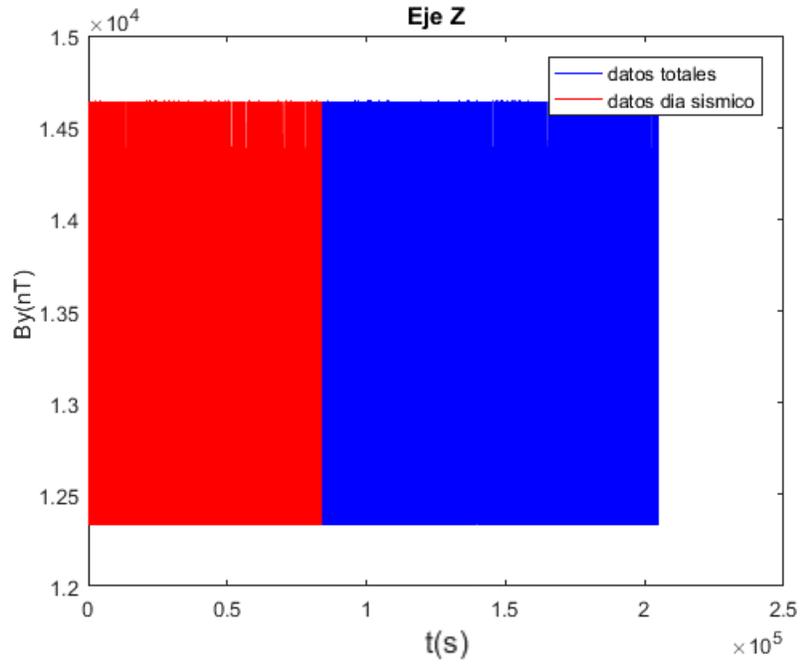


Figura 6.2 Datos estación UAS. Eje Z Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz.

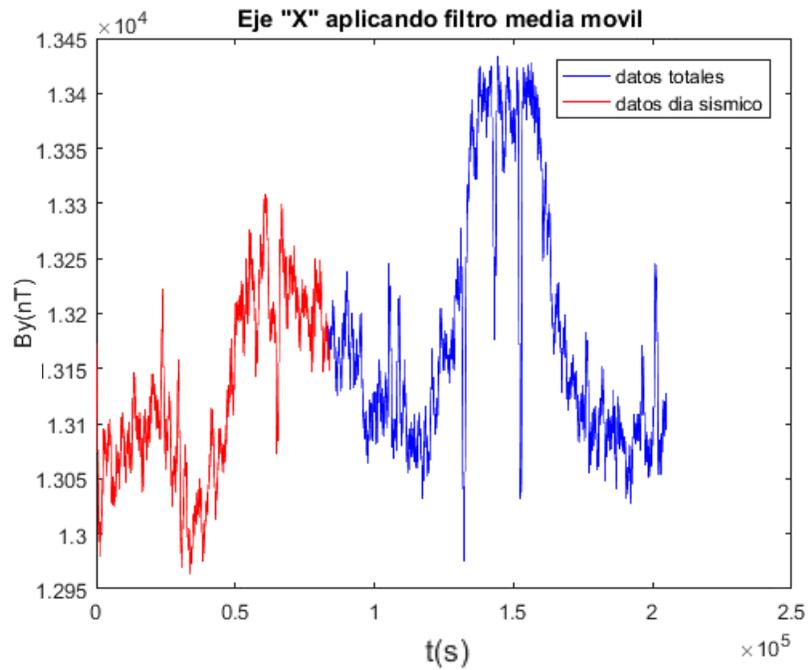


Figura 6.3 Datos estación UAS. Eje X del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil.

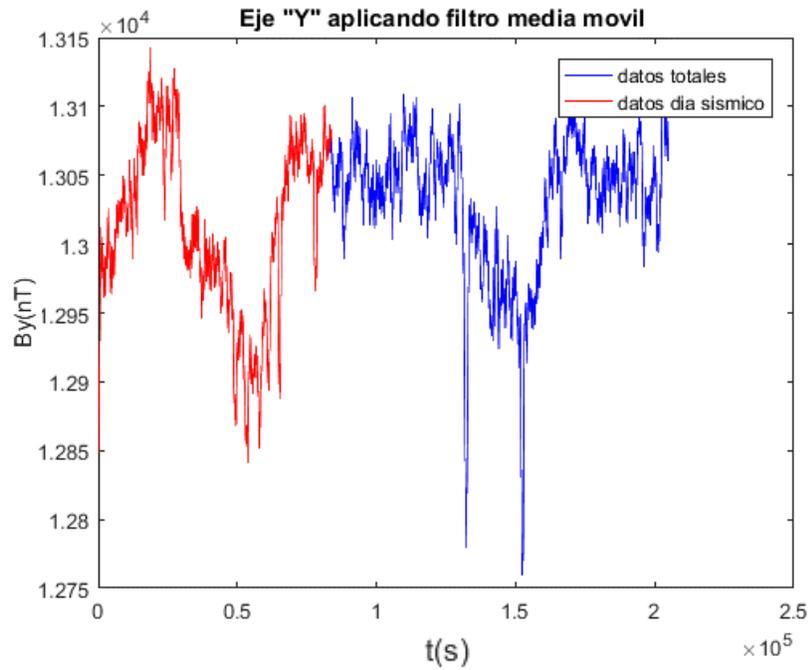


Figura 6.4 Datos estación UAS. Eje Y del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil.

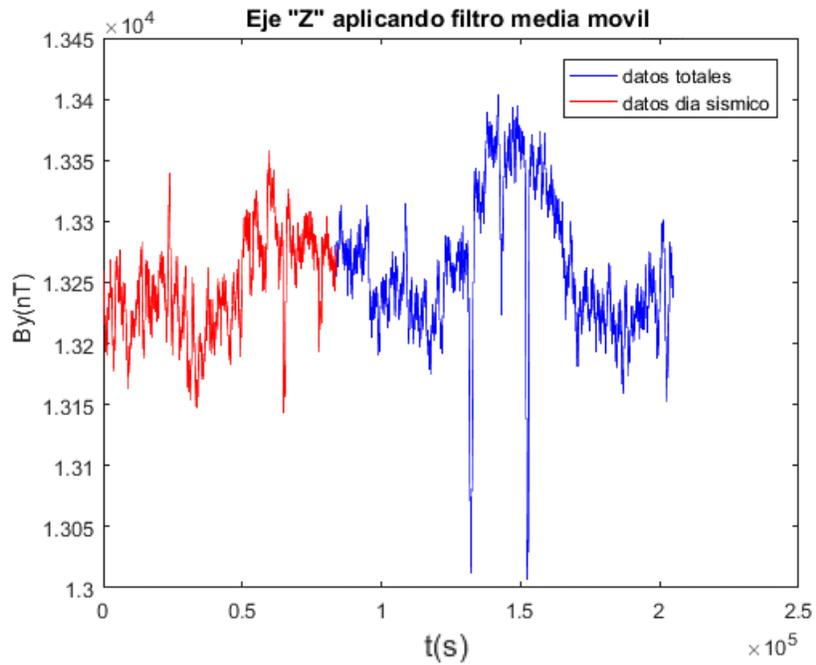


Figura 6.5 Datos estación UAS. Eje Z del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil.

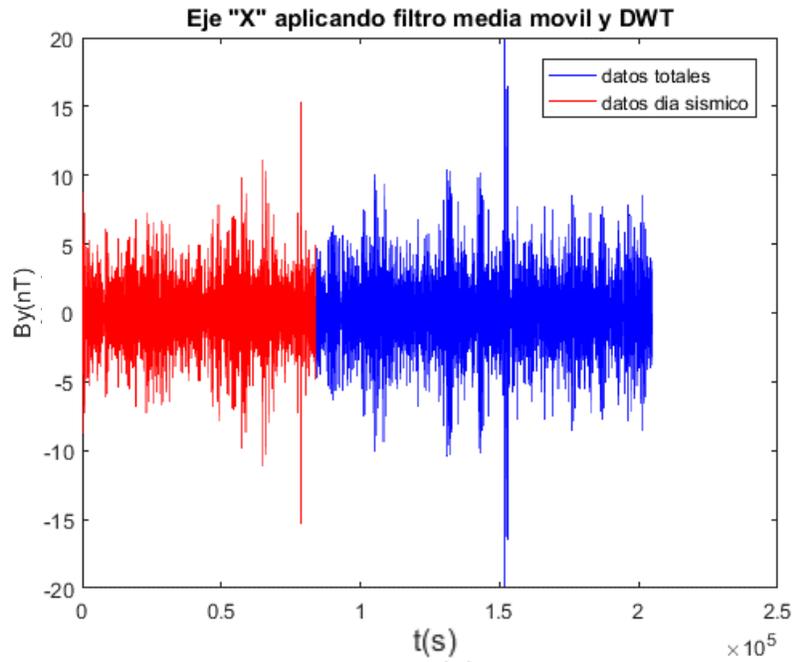


Figura 6.6 Datos estación UAS. Eje X del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil y DWT.

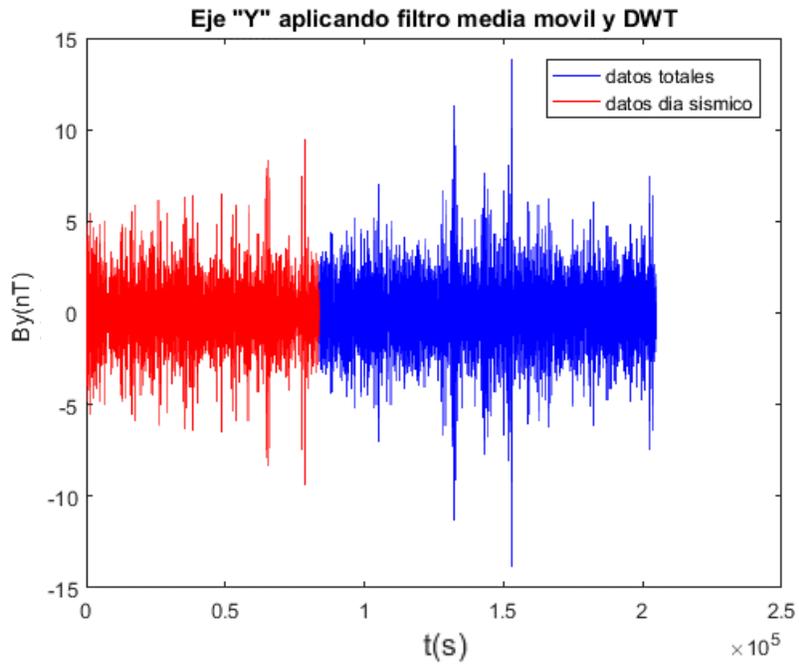


Figura 6.7 Datos estación UAS. Eje Y del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil y DWT.

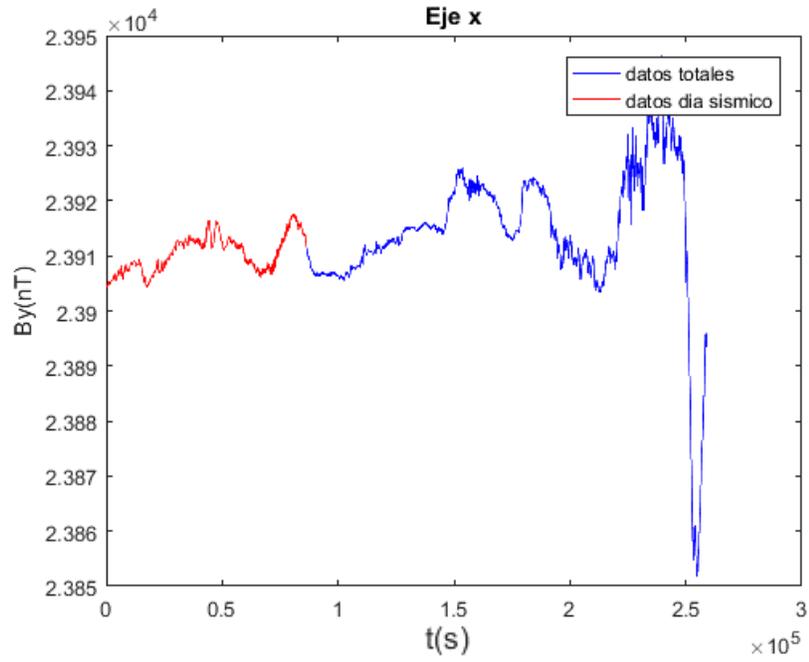


Figura 6.8 Datos estación Tucson, eje X Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz

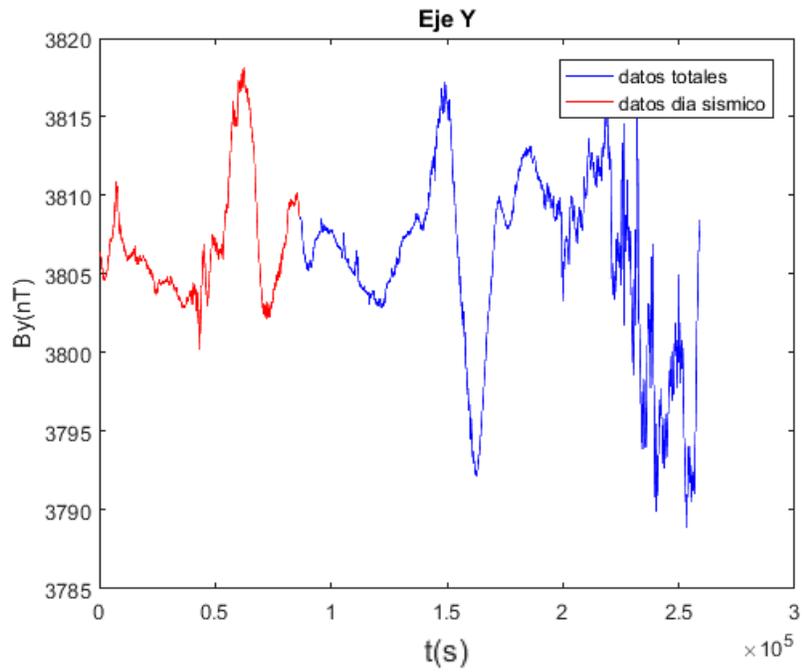


Figura 6.9 Datos estación Tucson, eje Y Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz

$t(s)$,

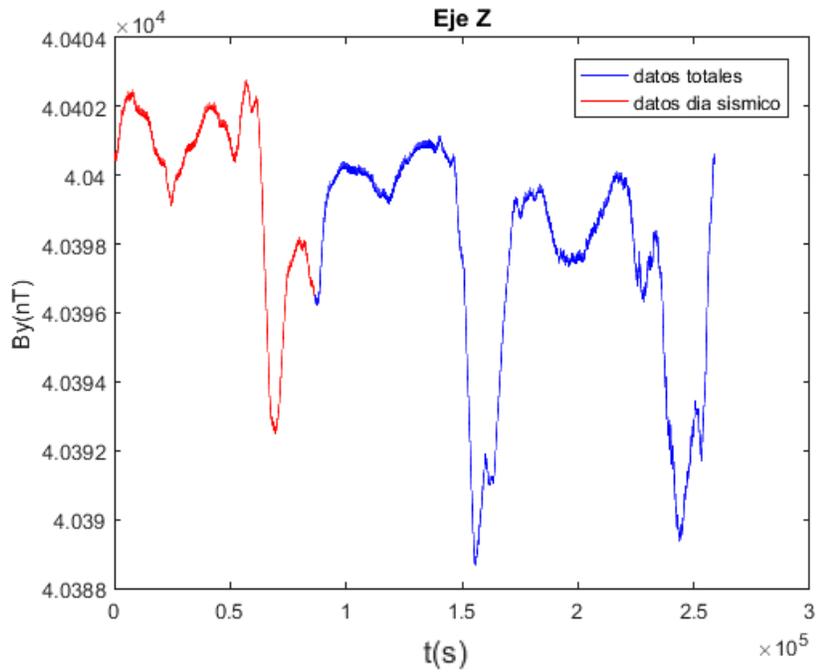


Figura 6.10 Datos estación Tucson eje Z Evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz

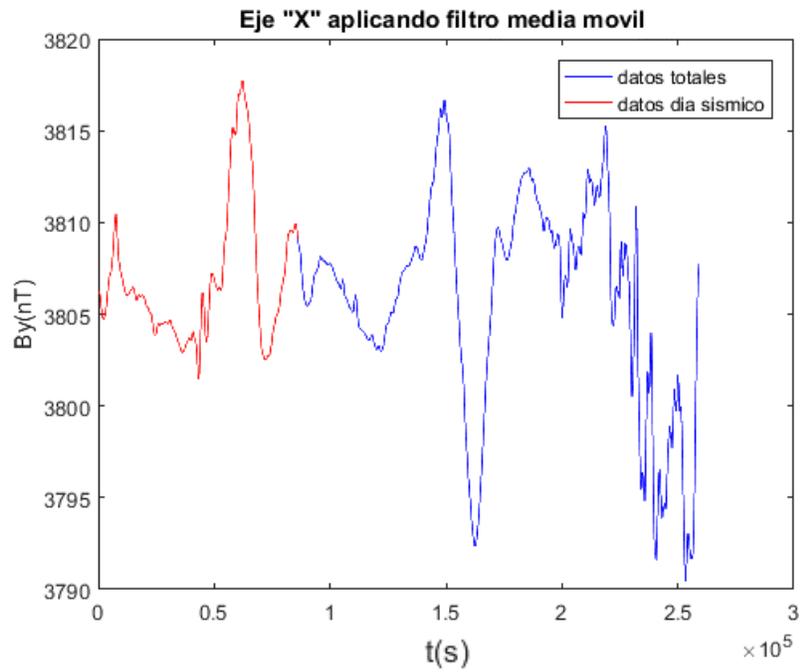


Figura 6.11 Datos estación Tucson, Eje X del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz filtro aplicando media móvil.

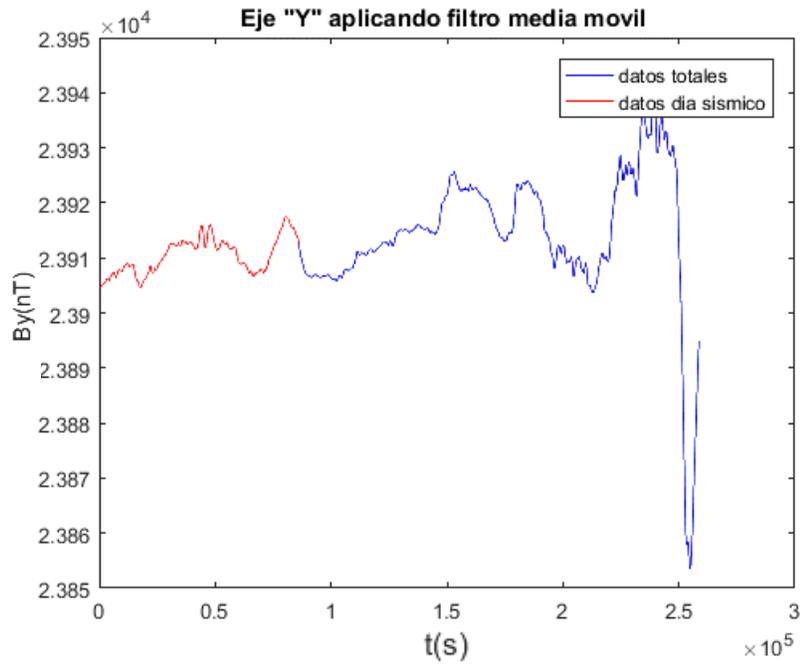


Figura 6.12 Datos estación Tucson, Eje Y del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil.

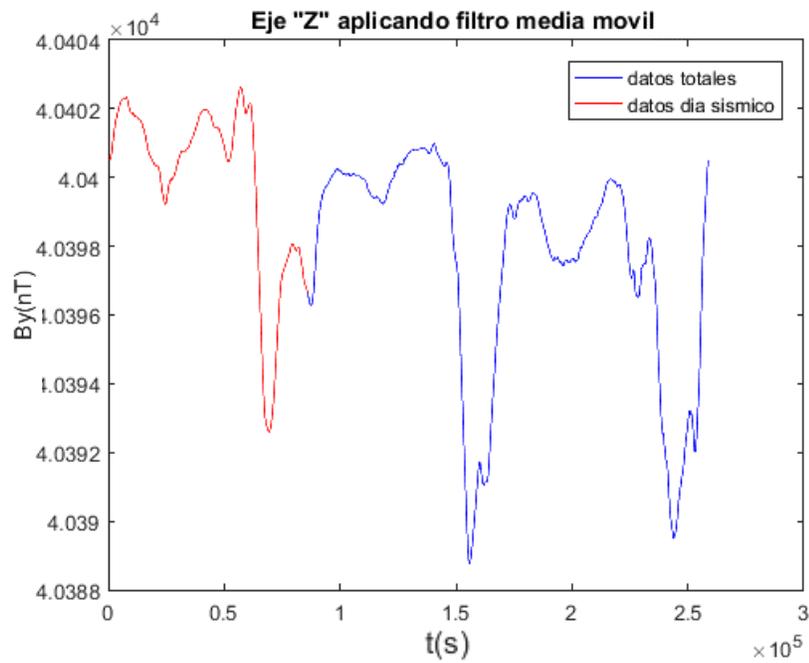


Figura 6.13 Datos estación Tucson, Eje Z del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil.

t(s)

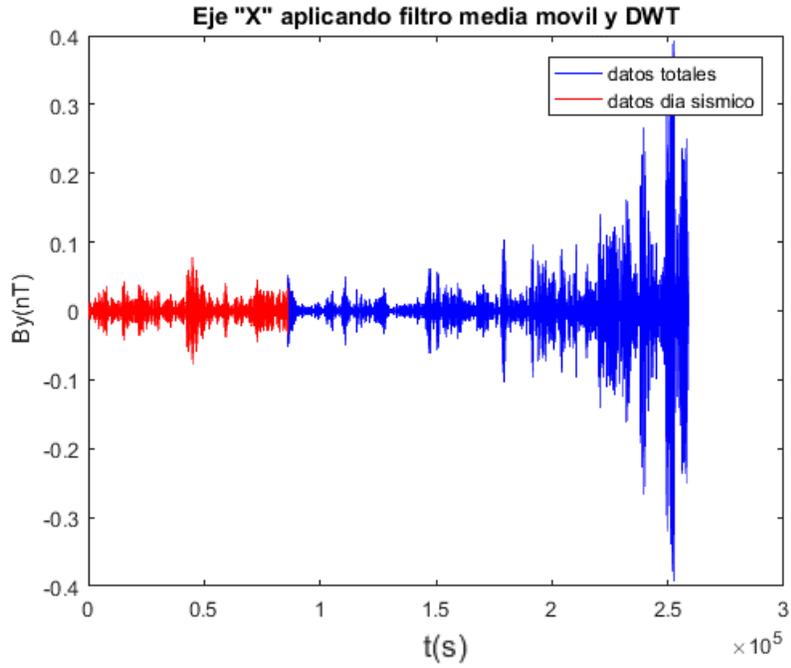


Figura 6.14 Datos Tucson, Eje X del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil y DWT.

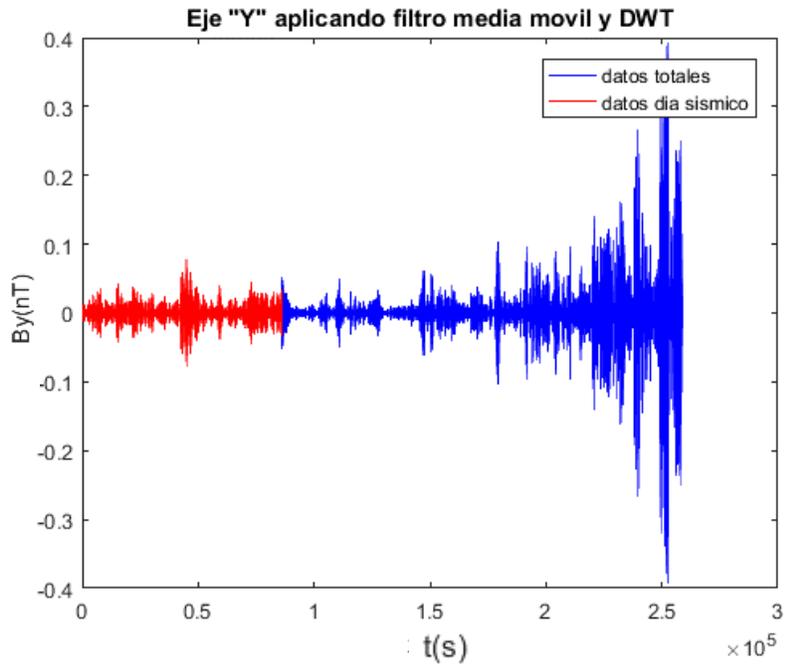


Figura 6.15 Datos Tucson, Eje Y del evento sísmico del Sur de las Choapas, Veracruz aplicando filtro media móvil y DWT.

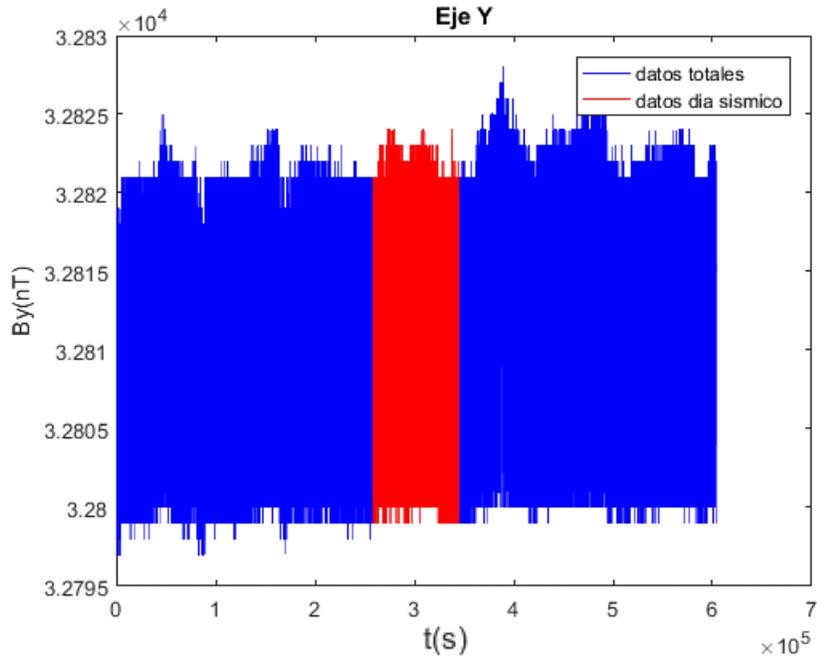


Figura 6.16 Datos estación UAS. Eje Y evento del sureste de salina cruz.

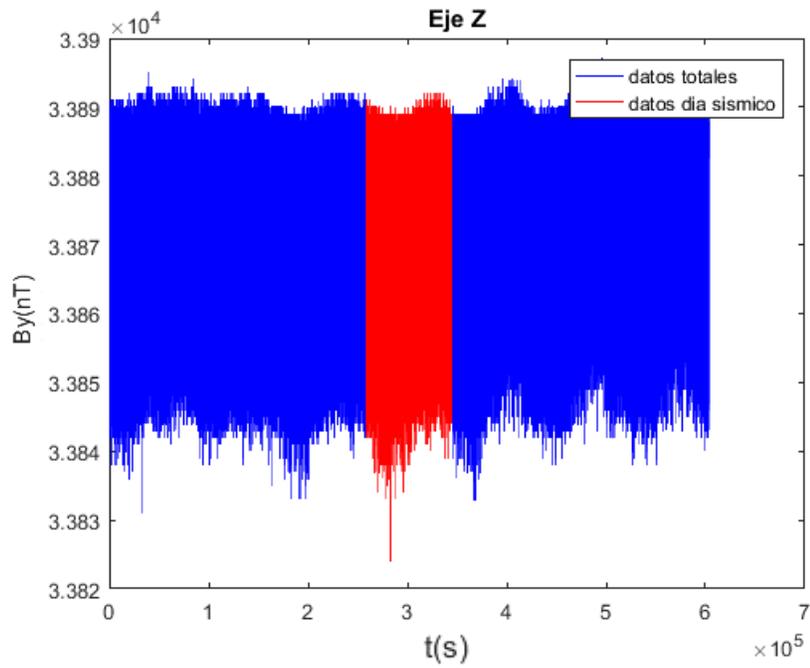


Figura 6.17 Datos estación UAS. Eje z evento del sureste de salina cruz.

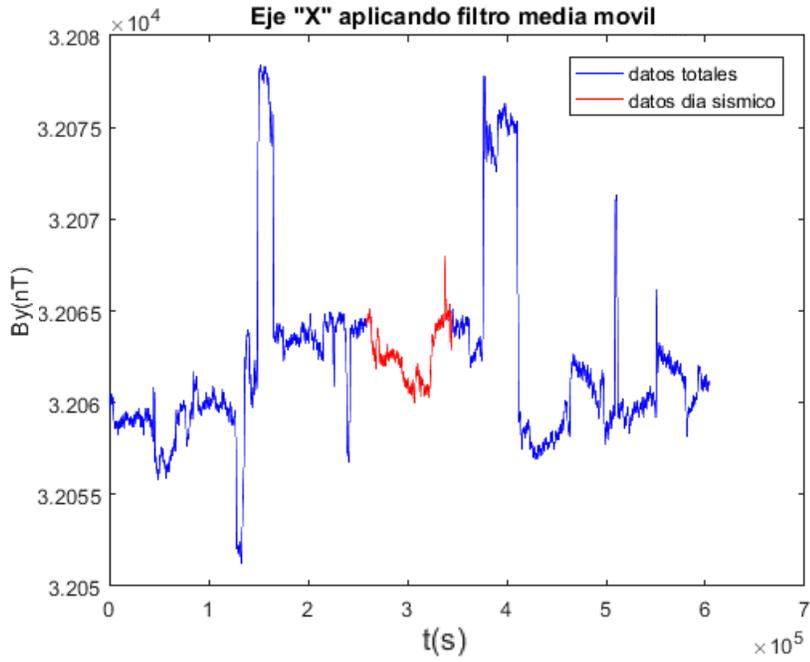


Figura 6.18 Datos estación UAS. Eje X filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

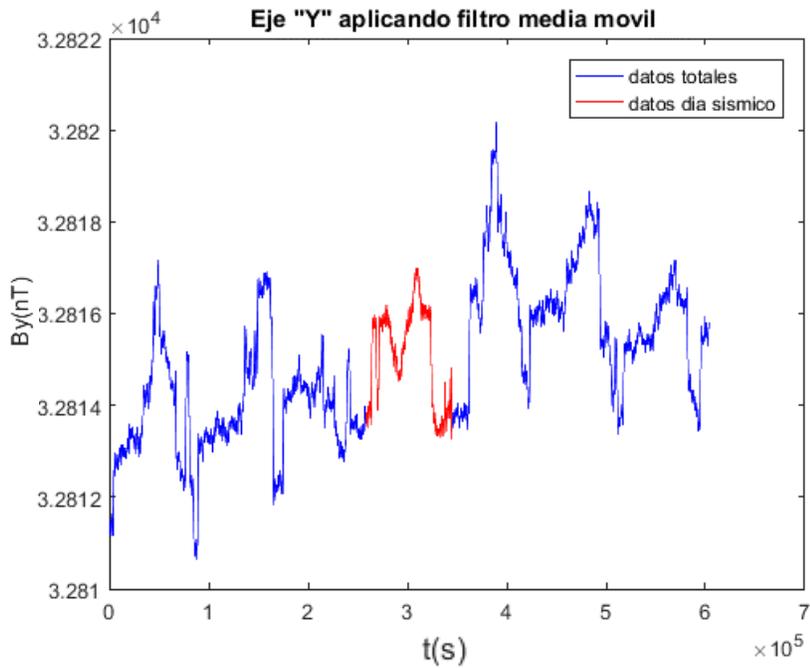


Figura 6.19 Datos estación UAS. Eje Y filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

t(s)

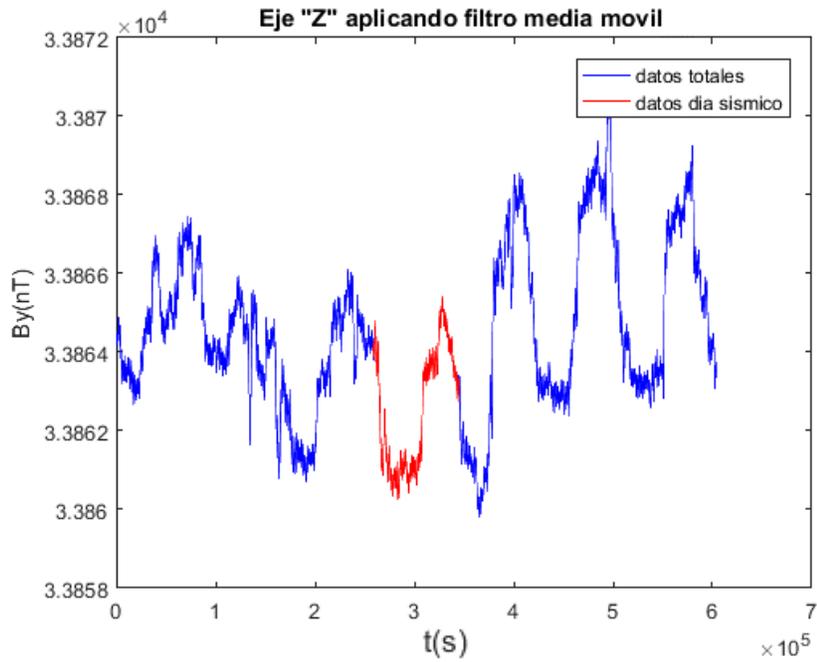


Figura 6.20 Datos estación UAS. Eje z media móvil evento del sureste de salina cruz.

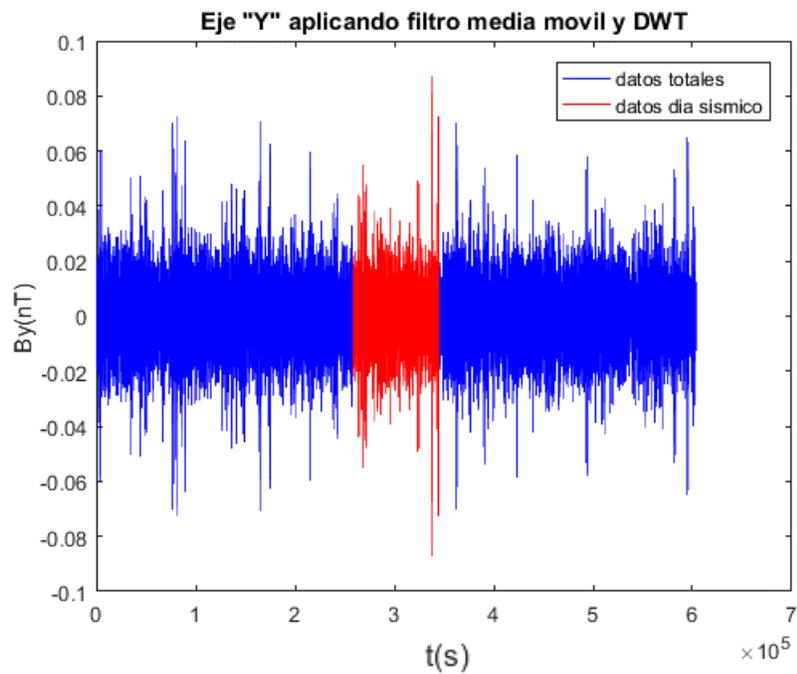


Figura 6.21 Datos estación UAS. Eje Y filtro media móvil y DWT evento del sureste de salina cruz

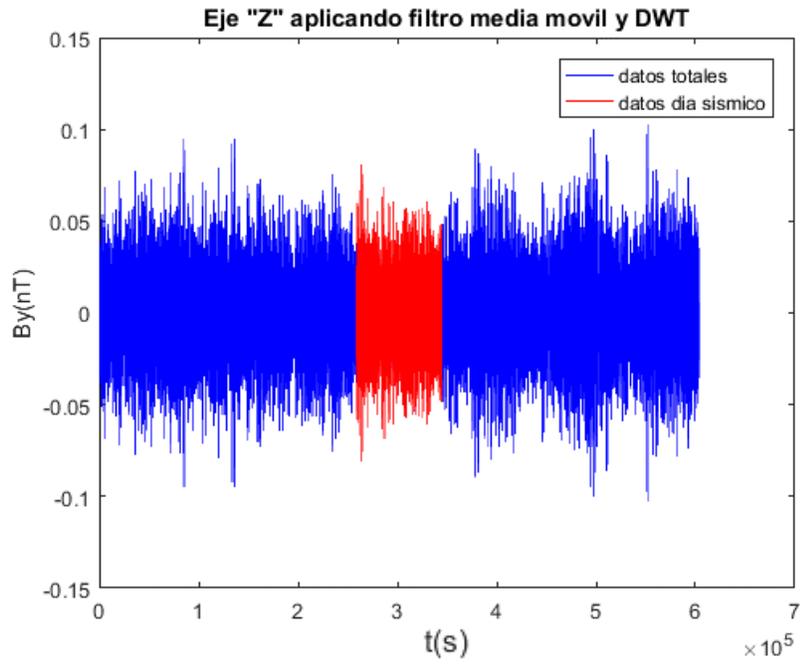


Figura 6.22 Datos estación UAS. Eje Z filtro media móvil y DWT evento del sureste de salina cruz.

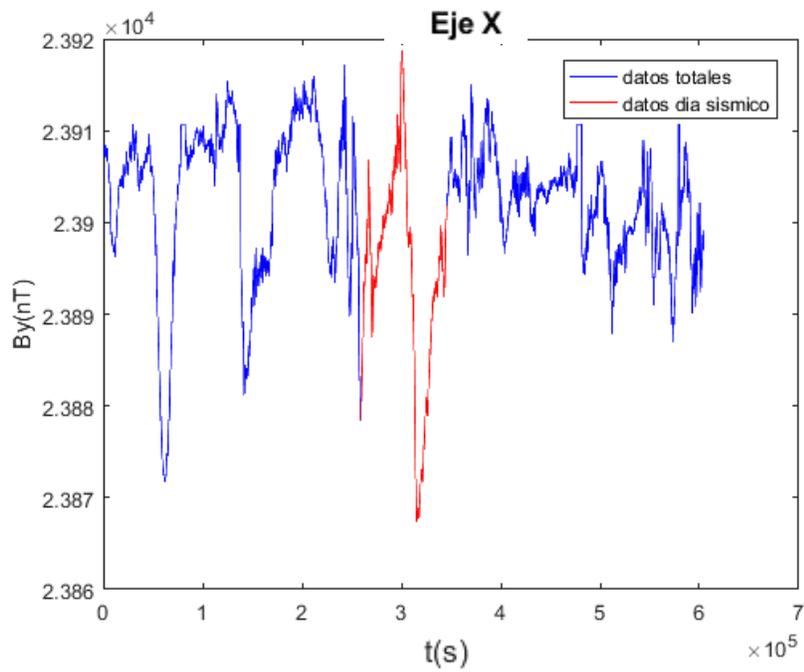


Figura 6.23 Datos estación Tucson eje X evento del sureste de salina cruz.

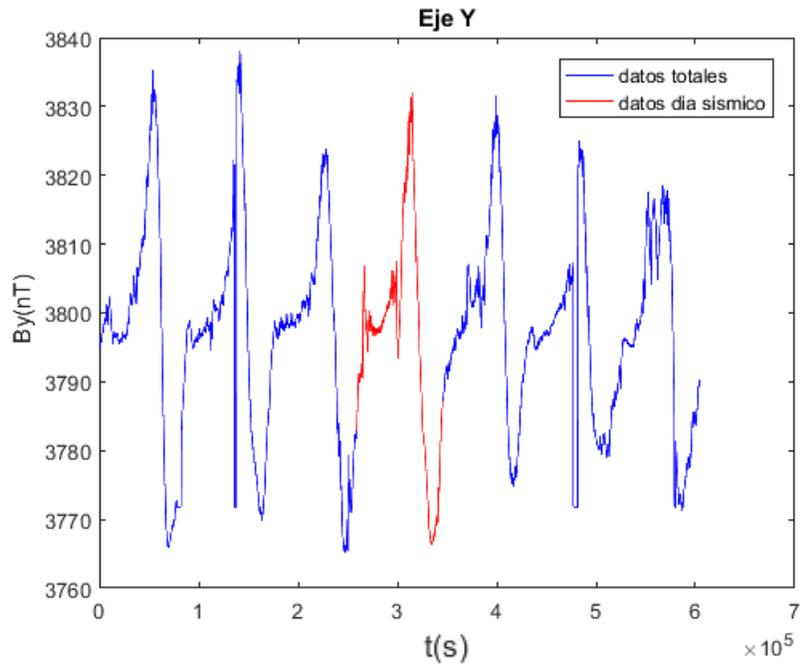


Figura 6.24 Datos estación Tucson eje Y evento del sureste de salina cruz.

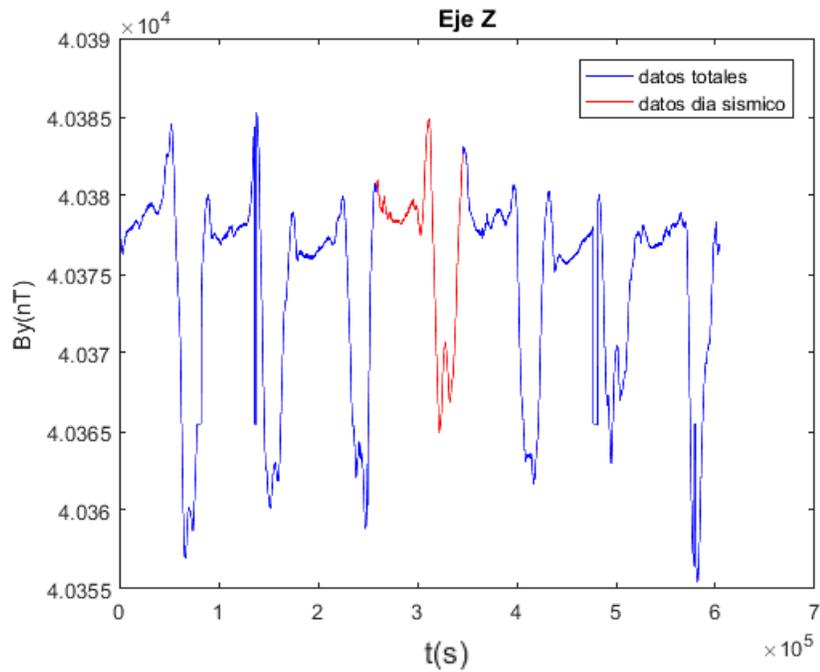


Figura 6.25 Datos estación Tucson eje Z evento del sureste de salina cruz.

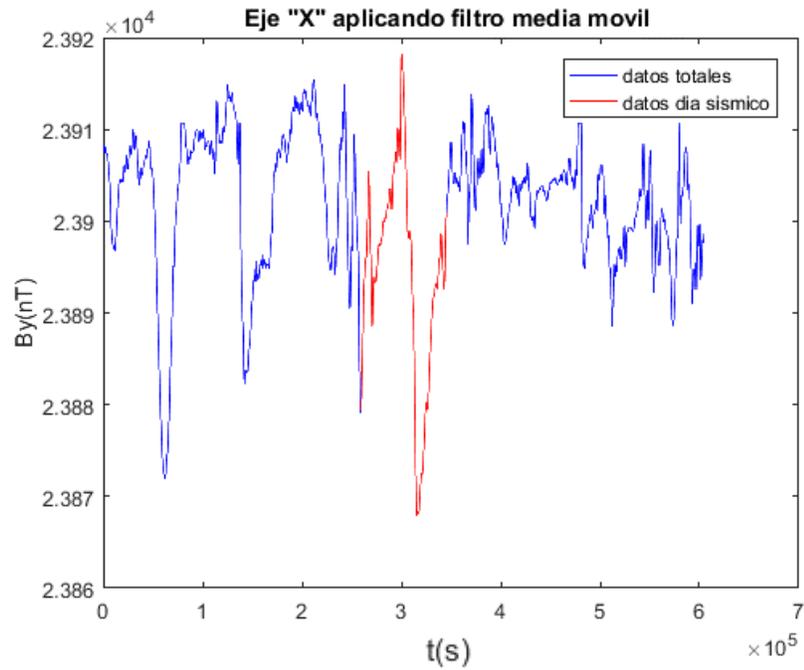


Figura 6.26 Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

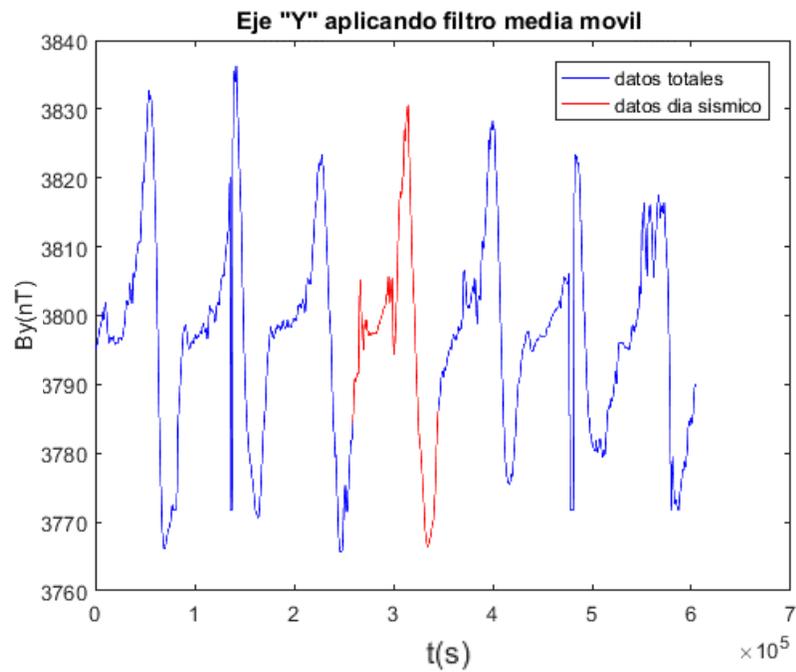


Figura 6.27 Datos estación Tucson, eje Y filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

$t(\text{s})$

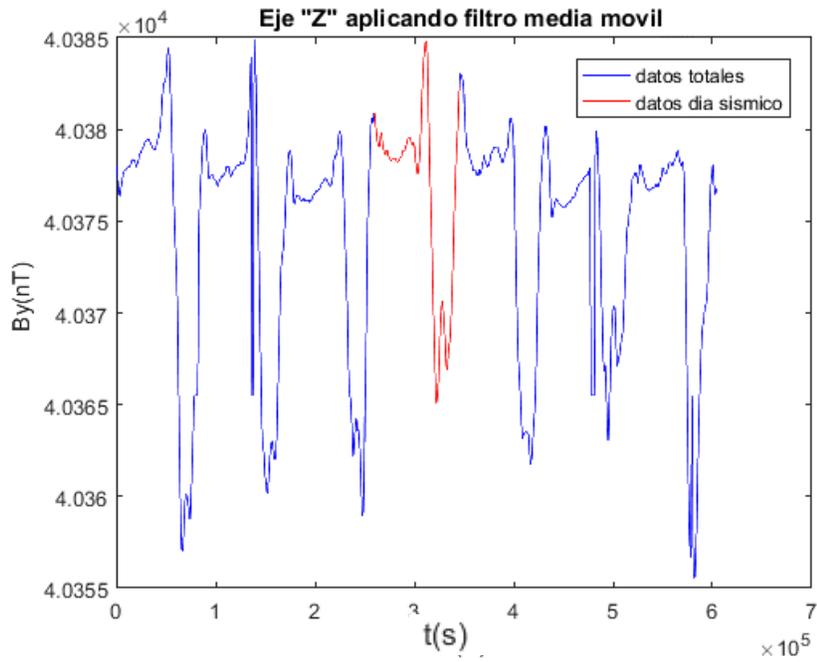


Figura 6.28 Datos estación Tucson, eje Z filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

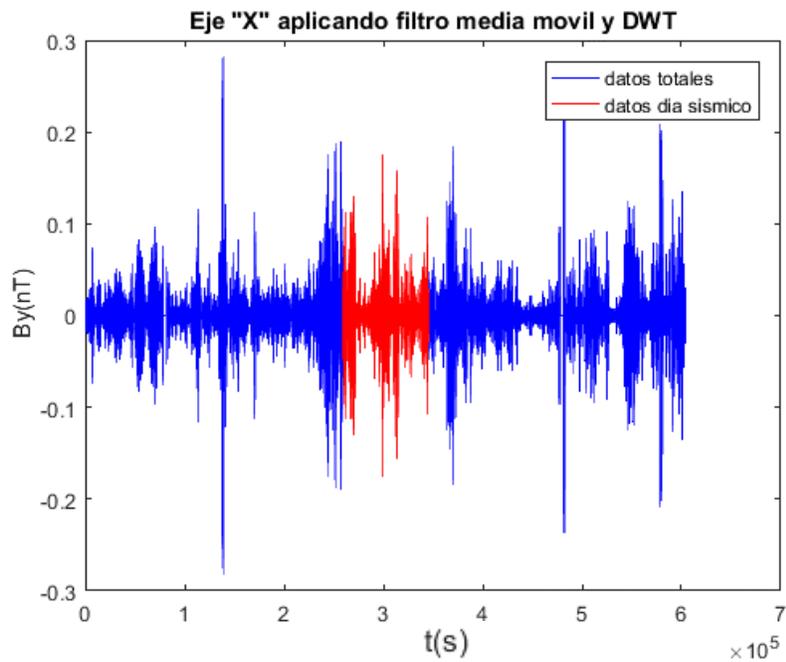


Figura 6.29 Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

t(s)

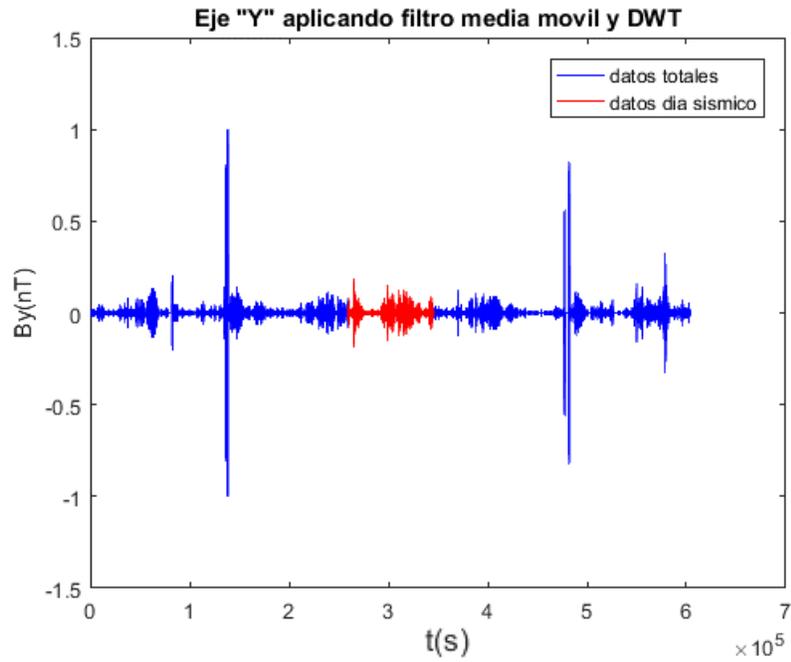


Figura 6.30 Datos estación Tucson, eje Y filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

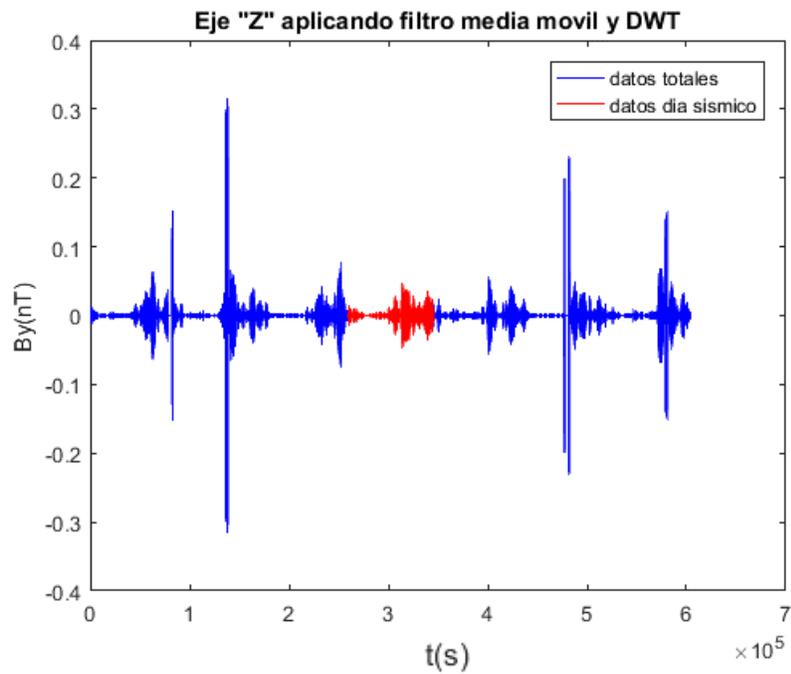


Figura 6.31 Datos estación Tucson, eje Z filtro media móvil y DWT evento del sureste de salina cruz.

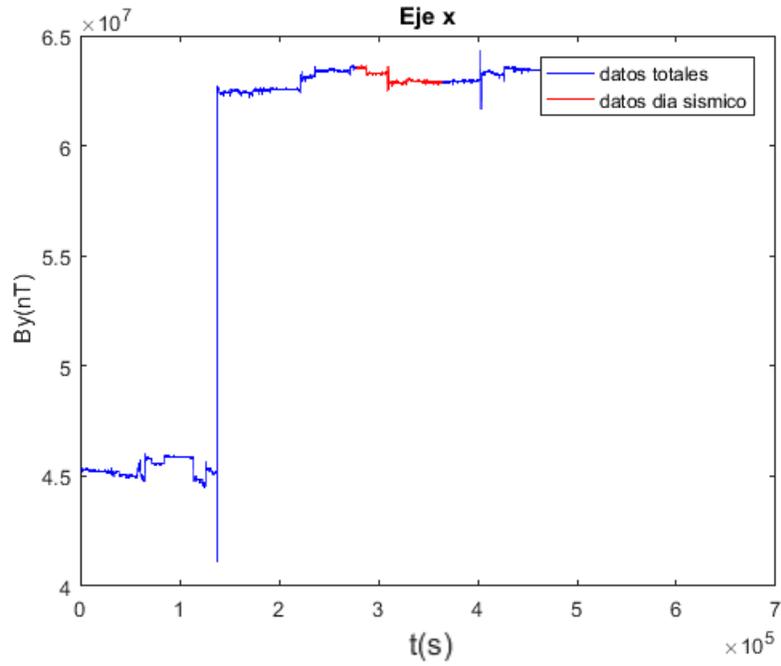


Figura 6.32 Datos estación UAS. Eje x evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

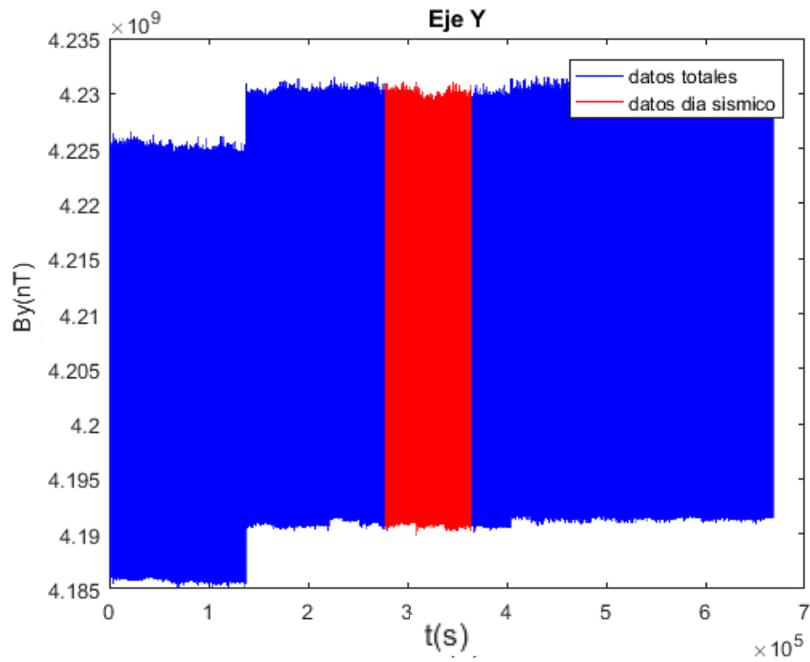


Figura 6.33 Datos estación UAS. Eje Y evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

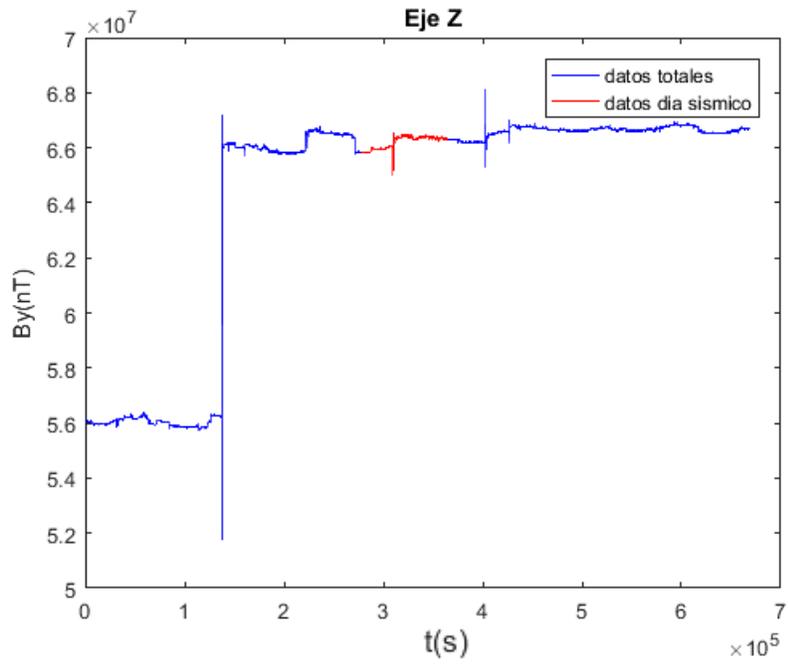


Figura 6.34 Datos estación UAS. Eje Z evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

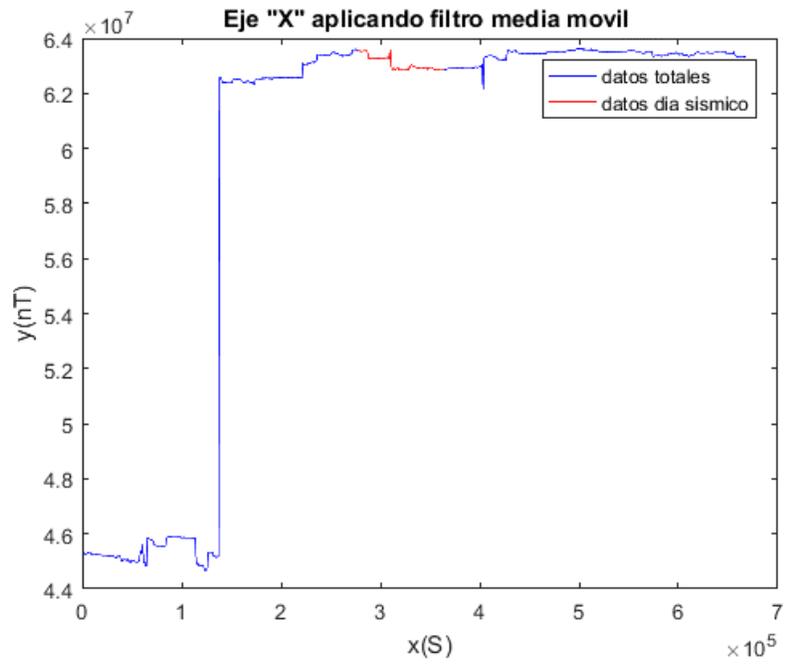


Figura 6.35 Datos estación UAS. Eje X filtro media móvil evento de Cihuatlán, Jalisco.

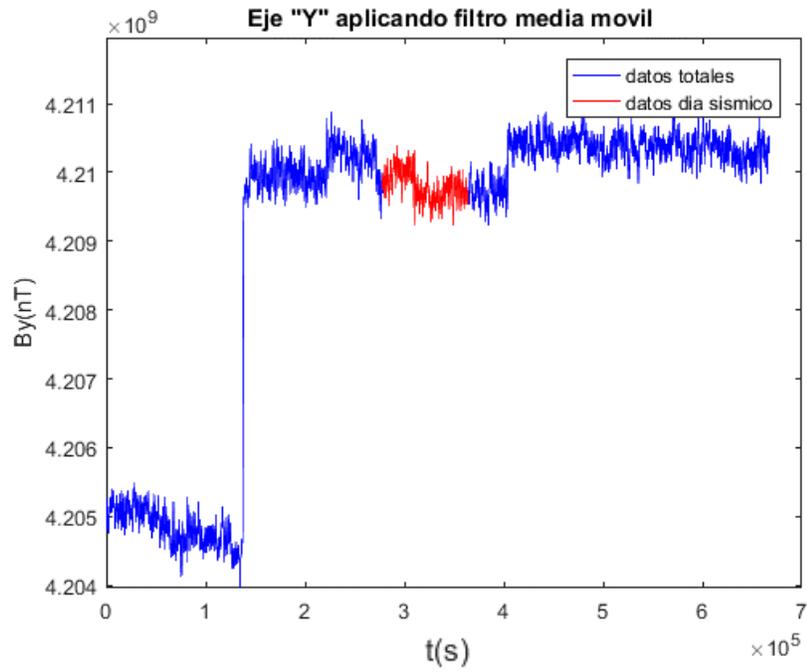


Figura 6.36 Datos estación UAS. Eje Y filtro media móvil evento de Cihuatlán, Jalisco.

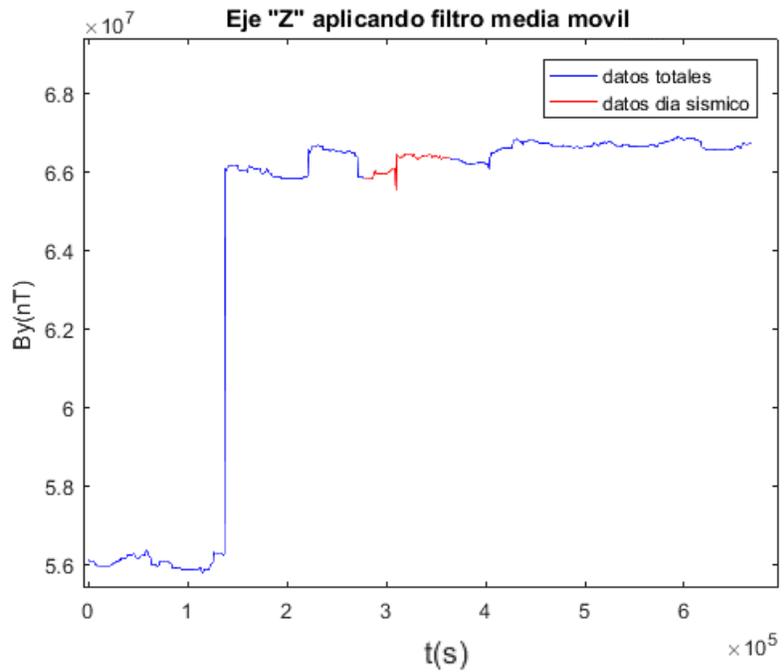


Figura 6.37 Datos estación UAS. Eje Z filtro media móvil evento de Cihuatlán, Jalisco.

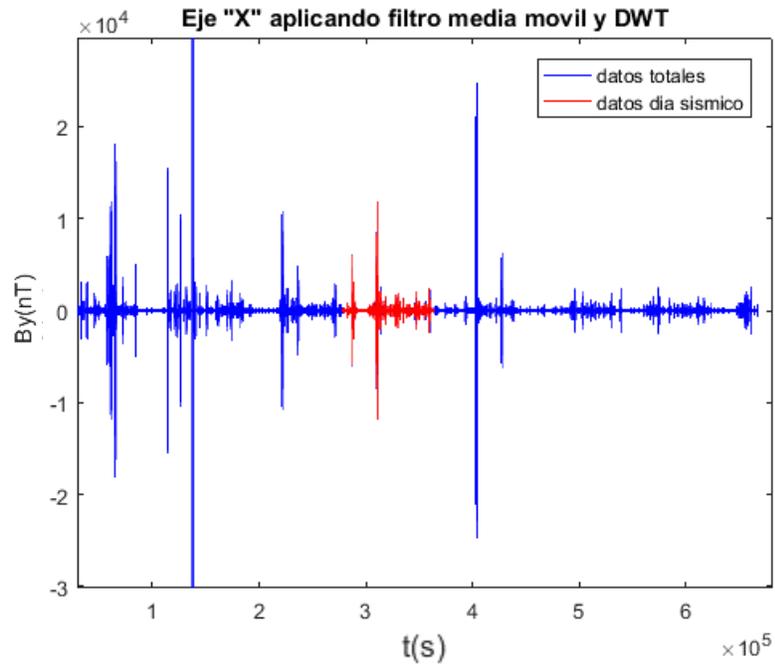


Figura 6.38 Datos estación UAS. Eje X filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

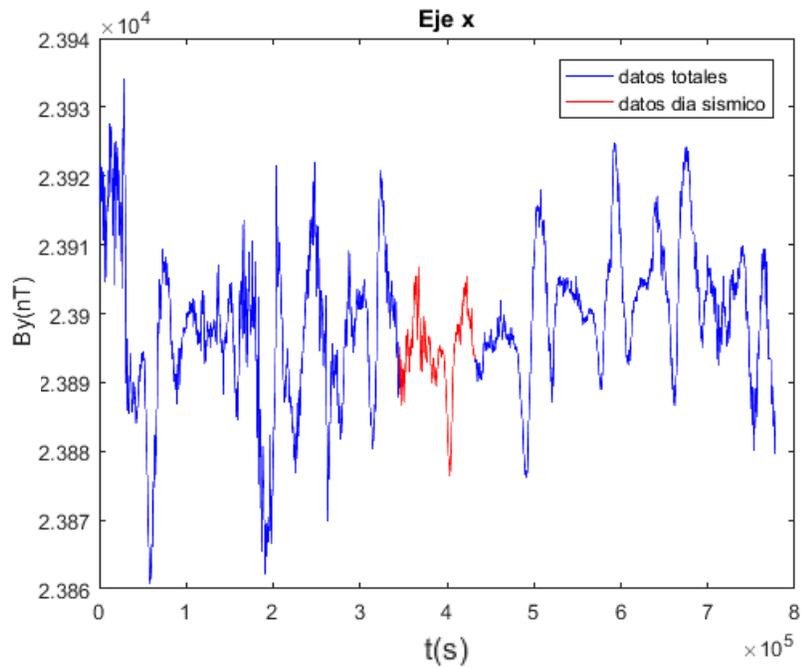


Figura 6.39 Datos estación Tucson, eje X evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

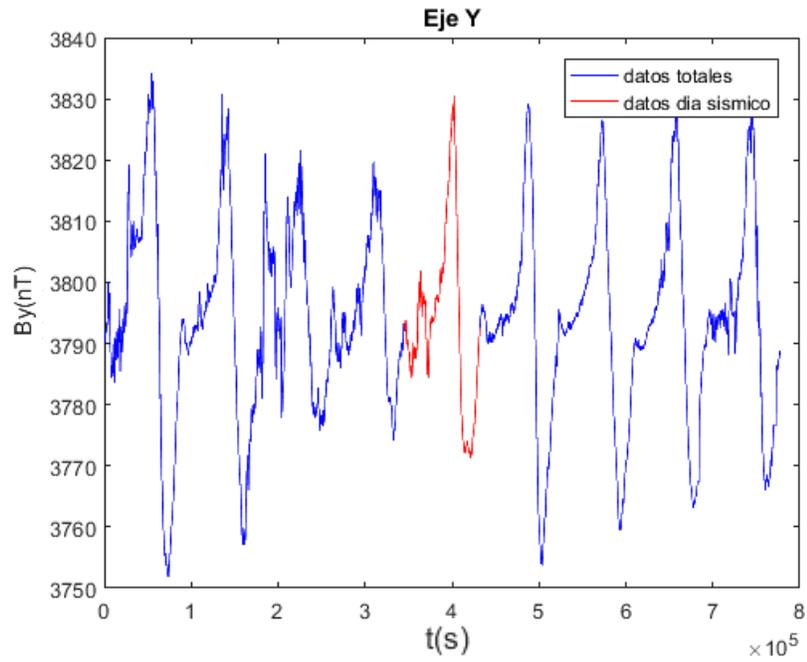


Figura 6.40 Datos estación Tucson, eje Y evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

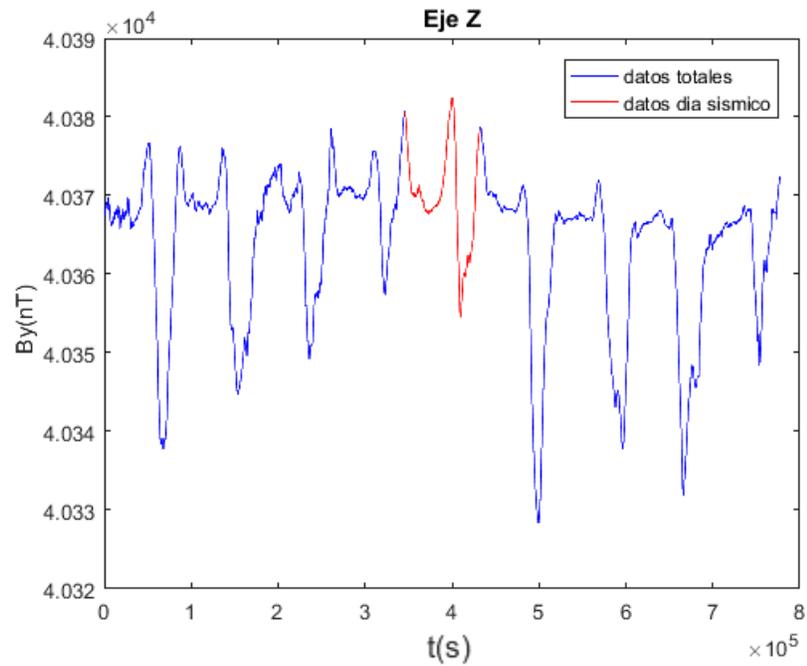


Figura 6.41 Datos estación Tucson, eje Z evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

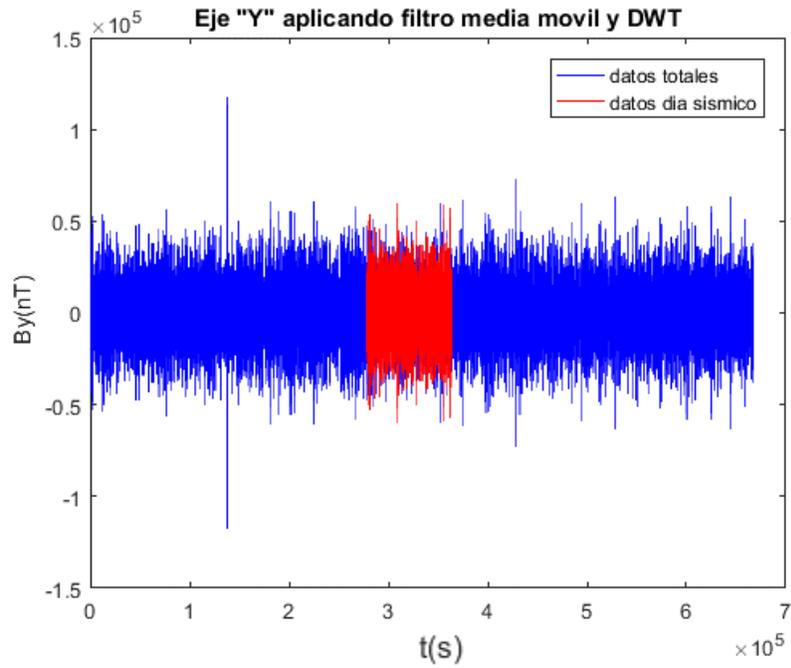


Figura 6.42 Datos estación UAS. Eje Y filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

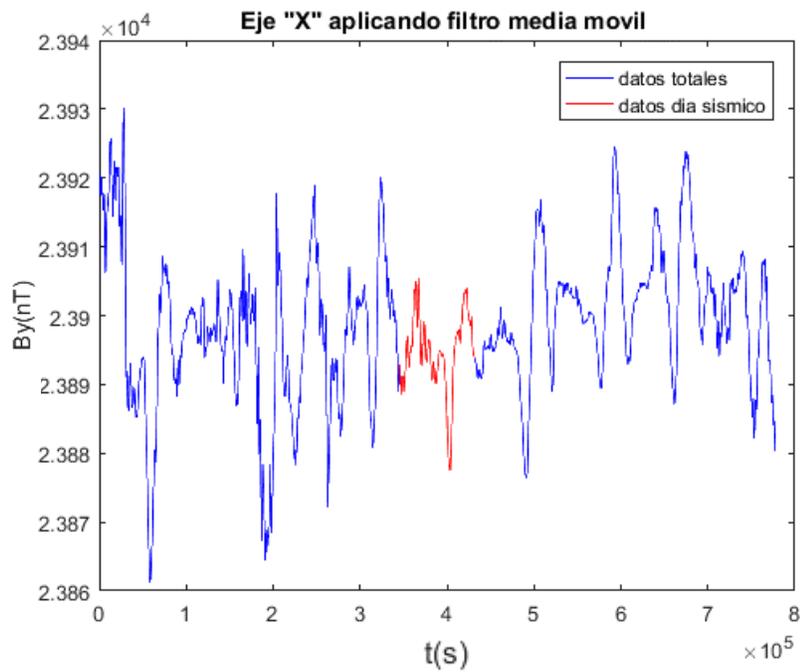


Figura 6.43 Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil evento de Cihuatlán, Jalisco.

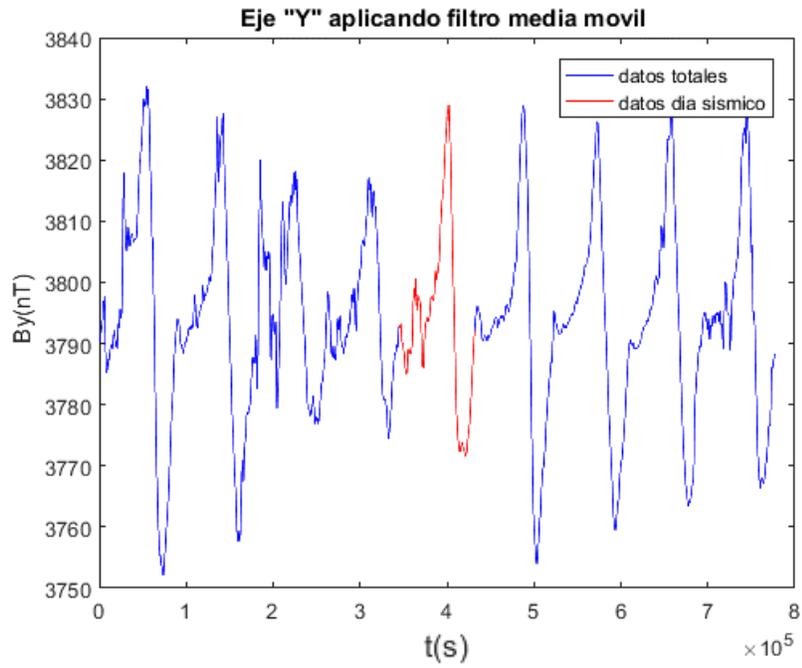


Figura 6.44 Datos estación Tucson, eje Y filtro media móvil evento de Cihuatlán, Jalisco.

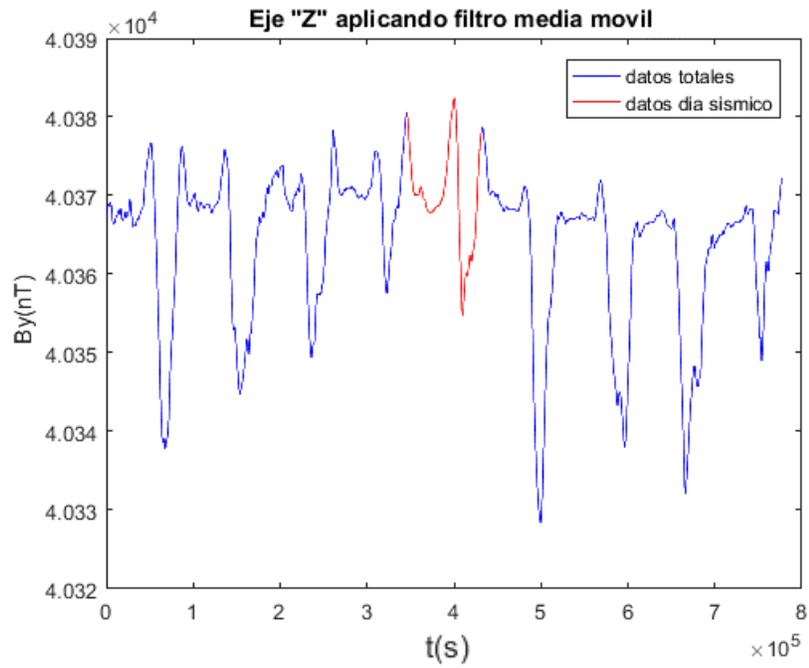


Figura 6.45 Datos estación Tucson, eje Z filtro media móvil evento de Cihuatlán, Jalisco.

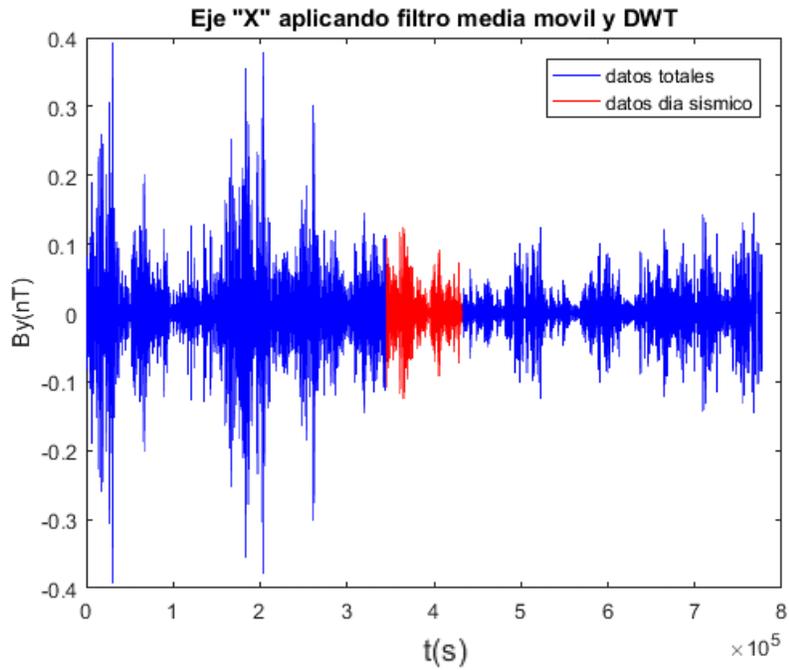


Figura 6.46 Datos estación Tucson, Eje X filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

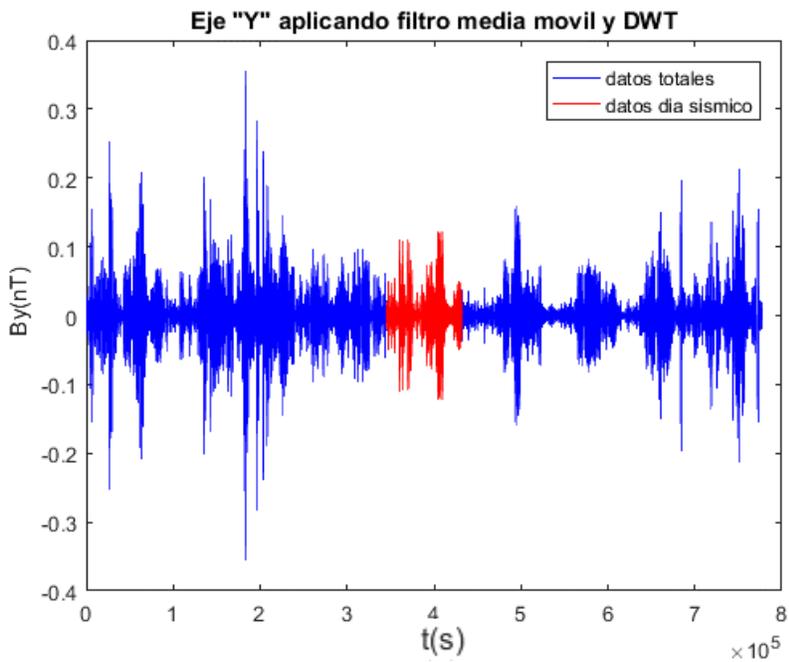


Figura 6.47 Datos estación Tucson, Eje Y filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

t(s)

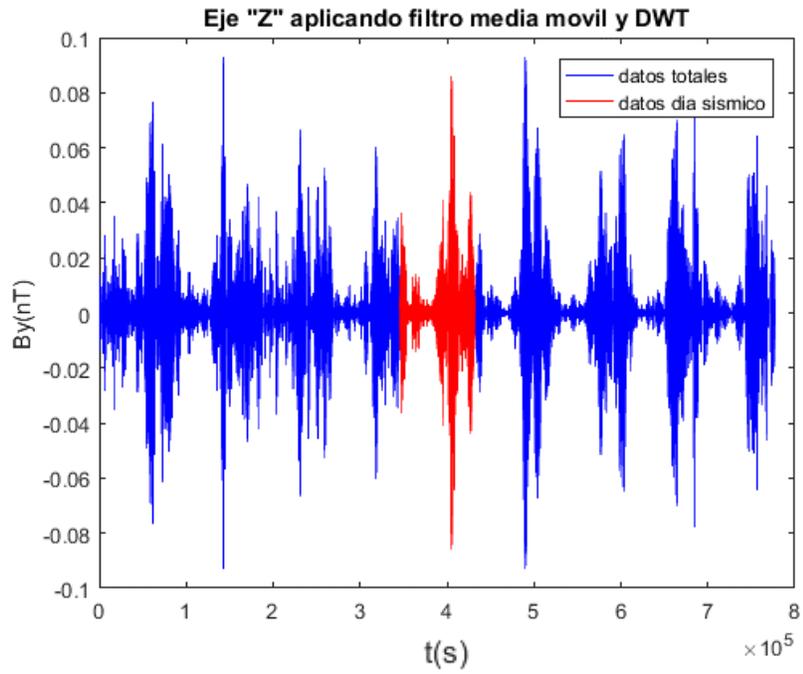


Figura 6.48 Datos estación Tucson, Eje Z filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.