UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE

FACTIBILIDAD DE DETECTAR FALLAS EN UNIDAD DE SOPORTE DE RODADO DE ALTA CARGA Y BAJA VELOCIDAD, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES.

TOMÁS PABLO DREVES BAZÁN

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : MG. ING. FERNANDO ROJAS
PROFESOR CORREFERENTE : DR. MANUEL OLIVARES

DICIEMBRE 2017

Esta memoria esta dedicada a:
Mi familia por su eterno compromiso y
a mis compañeros y amigos con los que
mas de una vez se pasaron largas noches en
vela, con libros y certámenes como también
brindando por el puerto querido.

Agradecimientos

Primeramente quisiera agradecer a la Empresa ESO por darme la oportunidad de trabajar con absoluta confianza en sus instalaciones y en especial al equipo de mecánica quienes durante todo mi periodo dentro de Paranal me ayudaron en todo ámbito profesional y además me hicieron sentir como uno más de su equipo, en especial a: Matteo Pozzobon, Juan Pablo Henríquez, Rubén Cárcamo, Erito Flores, Leonardo González, Erich Bugueño y Eloy Fuenteseca.

Quisiera agradecer al Ingeniero Sebastien Poupar del departamento de instrumentación de Paranal quien me ayudó con su conocimiento y tiempo al desarrollo de esta memoria dentro del observatorio y al ingeniero de software Eduardo Peña, de quien estoy infinitamente agradecido por todo lo aprendido por parte de él.

Finalmente agradecer a familia y amigos por estar en este proceso desde el primer día de mi estancia como estudiante dentro de la Universidad.

Resumen

European Southern Observatory (ESO) dentro de sus equipos operacionales ubicados en cerro Paranal (Región de Antofagasta) cuenta con un sistema mecánico llamado Rotation Mechanism (RTM), equipos encargados de hacer girar los domos de los telescopios para realizar las observación astronómica. En los últimos años, estos equipos han presentado fallas en sus rodamientos, problema que ha llegado a parar uno de los telescopios hasta por una semana. Por esta razón ESO plantea y solicita hacer un análisis de vibraciones a los sistemas Rotation Mechanism con el fin de estudiar la factibilidad de detectar de manera anticipada las posibles fallas y planificar el reemplazo de los rodamientos. Esta memoria expone dicho estudio realizado entre Agosto y Diciembre del año 2016.

Los RTM operan a muy bajas revoluciones como también soportan una alta carga,ya que debe sobrellevar de manera completa el peso del domo (ocho por unidad). Esto hace que deban emplearse técnicas no tradicionales para el análisis de vibraciones.

Las técnicas elegidas para el análisis de los datos obtenidos fueron: Promedio de señal en frecuencia y análisis de kurtosis mediante kurtogramas. La primera de estas técnicas se eligió debido a que la señal que se obtiene por medición presenta una gran cantidad de impactos indeterminados que perturban el análisis en frecuencia, por lo que cada medición fué separada por estos impactos dejando sub-mediciones aptas para ser trabajadas. La segunda técnica se escoge debido a la capacidad de detectar señales impulsivas (efecto campana), tales como las que se producen al tener un rodamiento en estado de deterioro en sus componentes. Para el análisis de las señales se elige Python donde se aplican los algoritmos. Las mediciones se realizan tomando muestras a una tasa 5555 muestras por segundo permitiendo registrar un giro completo del domo y al mismo tiempo mantener una respuesta en frecuencia bajo.

Para calibrar las técnicas mencionadas se modelan señales con el fin de simular una falla en rodamiento del tipo impulsiva y repetitiva en el tiempo, añadiéndole altos niveles de ruido aleatorio. Ambos métodos logran extraer las señales impulsivas de manera efectiva. Al analizar las mediciones obtenidas no se observan principios de fallas en los rodamientos de los RTM de la Unidad de Telescopio 2, no obstante este análisis no es concluyente ya que existe la posibilidad que el alto ruido de vibración del enclosure sea demasiado alta comparado con la falla asociada al rodamiento. Finalmente se proponen como futuras técnicas el análisis de lubricante y emisiones acústicas además de la caracterización de las cargas y de las fallas históricas dentro del observatorio.

Summary

European Southern Observatory (ESO) within its mechanical systems located in Cerro Paranal (Antofagasta Region) has one called Rotation Mechanism (RTM), equipment in charge of rotating the domes of the telescopes in order to perform the astronomical observation. In recent years, these equipments have failed in their bearings, a problem that disable one of the telescopes up to a week. For this reason ESO raises and requests to do a vibration analysis to the Rotation Mechanism systems in order to study the feasibility of detecting faults in advance and planning the replacement of bearings at time. This report presents the study carried out between August and December of the year 2016.

The RTMs operate at very low speeds as they also withstand a high load, as they must fully stand the weight of the dome (eight per unit). This implies that non-traditional techniques for the analysis of vibrations must be used.

The techniques chosen for the analysis for the obtained data were: Average of signal in frequency and analysis of kurtosis by the use of kurtograms. The first of these techniques was chosen because the signal obtained by measurement presents a large number of indeterminate impacts that disturb the frequency analysis. So that, each measurement was separated by these impacts leaving sub-measurements suitable for work. The second technique is chosen because of the ability to detect impulsive signals (bell effect), such as those that occur when having a bearing in state of deterioration in its components. For the analysis of the signals, Python is chosen. Measurements are made by sampling at a rate of 5555 samples per second allowing a full turn of the dome to be recorded while maintaining a low frequency response.

Before using the aforementioned techniques, signals are modeled to simulate a rolling failure of the impulsive and repetitive type over time, adding high levels of random noise. Both methods manage to extract the impulsive signals effectively. When analyzing the measurements obtained, there are no principles of failure in the RTM bearings of the Telescope Unit 2, however this analysis is not conclusive since there is the possibility that the high vibration noise of the enclosure is too high compared to the failure associated with the bearing. Finally, as future techniques, the analysis of lubricant and acoustic emissions is proposed as well as the characterization of the loads and the historical faults within the observatory.

Nomenclatura

BPFI Ball Pass Frequency of Inner Race. (Frecuencia de paso de los elementos rodantes sobre la pista interna)

BPFO Ball Pass Frequency of Outer Race. (Frecuencia de paso de los elementos rodantes sobre la pista externa)

BSF Ball Spin Frequency. (Frecuencia de giro de los elementos rodantes)

Csv valores separados por coma

ESO European Southern Observatory

FFT Fast Fourier Transform. (Transformada rápida de Fourier)

FTF Fundamental Train Frequency. (Frecuencia de rotacion de la jaula contenedora de las bolas)

PSD Power Spectrum Density. (Densidad del espectro de potencia)

RTM Rotation Transmission Mechanism. (Mecanismo de transmición de rotación)

SK Kurtosis Espectral

UT Unit Telescope

Índice general

Resumen II

Summary III

1. Introducción y objetivos 8
   1.1. ESO y relación con Chile 8
      1.1.1. Antecedentes ESO en Chile 8
      1.1.2. Cerro Paranal 9
      1.1.3. Los telescopios UT (Unit Telescopes) 10
   1.2. Antecedentes del problema 13
   1.3. Objetivos 16
      1.3.1. Objetivo General 16
      1.3.2. Objetivo Específico 16

2. Mecanismos de Rotación (Rotation Transmission Mechanism; RTM) 17
   2.1. Componentes de RTM 19
      2.1.1. Carro del RTM 19
      2.1.2. Motor/Reductor 20
      2.1.3. Acoplamiento flexible 20
      2.1.4. Patines Guías (Guide Rollers) 20
      2.1.5. Rodamientos 21

3. Análisis de vibraciones 24
   3.1. Técnicas de medición de vibraciones 24
      3.1.1. Etapas de la medición 24
      3.1.2. Transformada discreta de Fourier 25
      3.1.3. Densidad Espectral 26
      3.1.4. Detección de fallas en rodamientos 27
         3.1.4.1. Señales moduladas en amplitud 29
   3.2. Análisis de vibración en equipos a baja velocidad 32
      3.2.1. Desafío a bajas revoluciones 32
      3.2.2. Estado actual de técnicas a bajas revoluciones 32
         3.2.2.1. Análisis de forma de Onda 33
         3.2.2.2. Análisis Espectral promediando en frecuencia 33
         3.2.2.3. Kurtosis correlacionada y kurtogramas 34

4. Análisis de vibraciones RTM en Paranal 38
4.1. Proceso de medición 38
4.1.1. equipos de medición 38
4.1.2. Modo de medición 40
4.1.2.1. Configuración de la medición 40
4.1.2.2. Puntos de medición 41
4.2. Transmisión de las vibraciones a través del riel 44
4.3. Influencia del estado del riel sobre las mediciones 45

5. Procesamiento y análisis de resultados 49
5.1. Análisis usando promedios en frecuencia 49
5.1.1. Algoritmo 49
5.1.2. Validación del modelo 50
5.1.3. Análisis de Resultados 53
5.2. Análisis usando Kurtogramas 62
5.2.1. Validación del modelo 62
5.2.2. Análisis de resultados 67
5.3. Análisis y recomendaciones en base a análisis propuesto 71
5.3.1. Análisis de Lubricantes 71
5.3.2. Emisiones Acústicas (EA) 75
5.3.3. Análisis de cargas en RTM 76

6. Conclusión 80

Referencias 81

A. Aspectos de Mantención y de medición de vibraciones 83
A.1. Mantenimiento 83
A.1.1. Generalidades del mantenimiento 83
A.1.2. Tipos de mantenimiento 84
A.2. Vibraciones Mecánicas 85
A.2.1. Transformada de Fourier 86
A.2.1.1. Serie de Fourier 87
A.2.1.2. Transformada de Fourier 89
A.2.2. Consideraciones al adquirir datos para computar FFT 90
A.2.2.1. **Aliasing** 90
A.2.2.2. Fugas Laterales 91
A.2.3. Modelos clásicos de fallas en equipos vibratorios 95
A.2.3.1. Síntomas vibratorios del desbalanceo 95
A.2.3.2. Síntomas vibratorios del desalineamiento 96
A.2.3.3. Síntomas vibratorios de la soltura mecánica 98

B. Código Python con funciones usadas en algoritmo 99

C. Reportes generados para cada RTM de UT2 107

Índice de figuras

1.1. Los tres centros astronómicos de ESO en Chile 9
1.2. Very Large Telescope (VLT) y sus instrumentos 10
1.3. Organigrama principal de un *Unit Telescope* 10
1.4. a) Vista isométrica de un UT, en rojo marcado nivel Nasmyth donde se encuentran los RTM b)Vista interior del telescopio desde nivel Nasmyth, en rojo lugar donde se ubican RTM c) Imagen de uno de los RTM, 8 son el total de equipos dispuestos en la periferia circular 11
1.5. Vista exterior de un UT y sus partes principales 12
1.6. Vista Isometrica del telescopio y sus componentes 13
1.7. Rodamiento de RTM que falló el año 2015 16

2.1. Vista isometrica de un trolley del RTM 17
2.2. Vista superior de RTM en nivel Nasmyth 18
2.3. Árbol de subsistema RTM 19
2.4. Componente motor/reductor de un RTM 20
2.5. Acople flexible que une Motor con reductor de cada RTM 21
2.6. Dos tipos de patines guías en enclosure 21
2.7. Dimensiones de rodamiento SKF23030 22
2.8. Tabla de referencia para selección de rodamiento a partir de velocidad de giro, carga y diámetro de eje. Fuente: (Neale, 2013) 23

3.1. Esquema de un acelerómetro y sus partes principales 25
3.2. Diferencia en operaciones entre FFT y DFT 26
3.3. parámetros usados en tabla 3.1 28
3.4. Ejemplo de señal modulada en amplitud 29
3.5. Ejemplos de envolvente mediante transformación de Hilbert 31
3.6. Espectro y forma de onda de rodamiento con pista externa defectuosa y velocidad variable 33
3.7. Ejemplo de espectros para diferente configuración de promedios y resolución 34
3.8. kurtosis para dos tipos de señales 35
3.9. Ejemplo kurtograma 36
3.10. Pasos para demodulación de señal 37
3.11. Serie de tiempo (izquierda) y su espectro (derecha 37
3.12. Aplicación kurtograma (izquierda) y su demodulación (derecha) 37

4.1. Amplificador Nexus 2692-OS4 38

4.2. Acelerometro TYPE 4370 39
4.3. Osciloscopio y programa 40
4.4. Selección de lugares para realizar medición 41
4.5. Espectros obtenidos en prueba de tapa en UT4@RTM07, se observa que la tapa actúa como filtro natural eliminando las altas frecuencias . . 42
4.6. Configuración de zona de rodamientos, rojo: rodamiento zona frontal y azul: zona posterior. Se observa que en azul no soporta cargas axiales . 42
4.7. Lugar final donde se realizan mediciones en todos los RTM 43
4.8. Kurtogramas y demodulaciones para todos los RTM 44
4.9. Serie de tiempo (medida en segundos) de medición de impactos alrededor del riel 45
4.10. Detalle de una unión de riel 46
4.11. Serie de Tiempo y FFT, análisis de impactos del riel 47
4.12. Serie de Tiempo y FFT posterior al apriete de pernos 47

5.1. Esquema de algoritmo 50
5.2. Señal generada (Azul) y Fft de la señal (Verde) 51
5.3. FFT luego de aplicar algoritmo 51
5.4. Comparación para señal registrada en RTM08 52
5.5. PSD on old RTM04@UT1 54
5.6. PSD on new RTM04@UT1 55
5.7. PSD on RTM02@UT2: (*Izq.* Con Motor/Reductor y *Dcha.* Sin Motor/Reductor (Misma escala) 55
5.8. Baja Frecuencia en RTM06@UT2, aparece señal modulada 56
5.9. Medición RTM06@UT2 sin Reductor 57
5.10. Serie tiempo RTM02@UT2. 360 segunos de muestreo 58
5.11. Serie tiempo RTM02@UT2, 1 segundo de muestreo 59
5.12. Serie de tiempo RTM@UT2, post apriete pernos base 59
5.13. Serie de tiempo RTM@UT2, post apriete pernos base, 1 segundo de medición 60
5.14. PSD para RTM02UT2 post apriete de pernos base. 61
5.15. RTM08@UT2 PSD 62
5.16. a)Señal obtenida a partir de ecuación 5.1 b) Ruido gaussiano c) Suma de a) y b) (solo se muestra 0.2[s]) 64
5.17. Kurtograma de señal impulsiva con ruido Gaussiano modelada a partir de 5.1 64
5.18. Filtrado de la señal a partir de kurtograma 65
5.19. Proceso para obtención de señal a analizar mediante kurtogramas 66
5.20. Análisis de Kurtogramas de señal generada 67
5.21. Kurtogramas y demodulaciones para todos los RTM 67
5.21. Kurtogramas y demodulaciones para todos los RTM 68
5.21. Kurtogramas y filtrado para todos los RTM *(cont...)* 69
5.21. Kurtogramas y filtrado para todos los RTM *(cont...)* 70

5.22. Señal filtrada por kurtosis de RTM06 70
5.23. Evolución de particulado de hierro y cobre en una falla de rodamiento. (Collacott, 2012) 72
5.24. Valores de η_c para niveles de contaminación de -/15/12 73
5.25. Estado de aceite en RTM 75
5.26. Kurtograma y espectros de frecuencia reductor epicíclico 76
5.27. Ejemplificación de la medición con equipo FARO ION 77
5.28. Histograma de un año de observación (2016) de la posición de Azimut, eje vertical representa el numero total de veces de azimuth en determinada posición. 78

A.1. Desplazamiento vibratorio vertical de la caja del rodamiento 86
A.2. Calculo de una FFT desde la medición 87
A.3. Ejemplo función periódica 88
A.4. Problema Aliasing (Linea verde) 91
A.5. Efecto de fugas laterales 92
A.6. Onda replicada de periodo incompleto (se producen cambios bruscos en la forma de onda) 92
A.7. Fugas laterales en registro no periódico 93
A.8. Gráfico de ventana Hann (fuente: Wikipedia) 94
A.9. Efecto de la ponderación de la señal por la ventana Hann 95
A.10. Forma de Onda y FFT característicos de desbalanceo 96
A.11. Tipos de desalineamientos 97
A.12. evolución de los espectros vibratorio debido al desalineamiento 97
A.13. Forma de Onda y FFT característicos de desbalanceo 98

Índice de tablas

1.1. Tabla con historial de modificaciones sobre RTM 14
1.2. Horas de trabajo por Equipo (PPRS) 14
1.3. Horas perdidas de observación y horas usadas en la reparación de los sistemas mecánicos. 15

2.1. Tonos de rodamiento SKF23030 22

3.1. nomenclatura de las frecuencias características de rodamiento 28

4.1. Tabla resumen para mediciones 44

5.1. Valores de la señal simulada 50
5.2. Número de impactos detectados por algoritmo en cada RTM 58
5.3. Escala ISO para clasificar nivel de contaminación con partículas de un aceite 72
5.4. Valores de referencia del factor η_c para diferentes niveles de contaminación 74
5.5. Resultados de medición de cargas mediante uso de láminas de presión fujifilm para ruedas de RTM en UT1 78

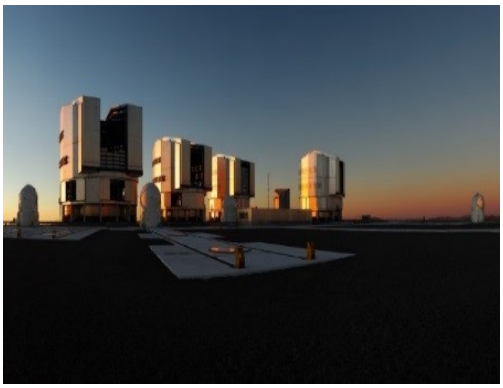
1. Introducción y objetivos

1.1. ESO y relación con Chile

1.1.1. Antecedentes ESO en Chile

Chile, además de tener una gran cantidad de recursos naturales, cuenta con uno de los cielos más atractivos para la astronomía a nivel mundial, en especial aquel que cubre la zona desértica del norte de Chile (desierto de Atacama). El atractivo de este cielo se debe a la gran cantidad de noches despejadas ya que esta ubicado en zonas de altura con baja humedad que permiten una mayor captación de la luz. Por esta razón Chile alberga los telescopios más importantes y modernos del mundo y es un país anfitrión de la ESO.

European Southern Observatory (ESO) es una reconocida organización intergubernamental de ciencia y tecnología. Su centro científico, técnico y administrativo está ubicado en Garching, Alemania. ESO cuenta con un programa de diseño y construcción de instalaciones para la observación astronómica que logra importantes avances en materia de la astronomía. Actualmente tiene tres instalaciones de observación, todas ellas en el desierto de Atacama: La Silla (1.1b), Paranal (1.1a) y Chajnantor (1.1c). Estas instalaciones nacen de un acuerdo entre el estado de Chile y la ESO, firmado en el año 1963. La primera instalación de telescopios en Chile corresponde al centro astronómico La Silla. Cuenta con telescopios ópticos de poca envergadura (diámetro máximo de 3.58 metros). Paranal, situado en la municipalidad de Taltal, es actualmente el centro de observación más importante del mundo el cual cuenta con seis telescopios, de los cuales cuatro de ellos son UT (Unit Telescope) que poseen un espejo primario de un solo cuerpo con un diámetro de 8.2 metros que tienen la posibilidad de trabajar con los llamados AT (Auxiliar Telescope) los que permiten hacer espectrometría, simulando un “Espejo gigante”, de 200 metros de diámetro. El tercer y último sitio, ubicado en Chajnantor (en las cercanías de San Pedro de Atacama), está sobre los 5000 metros de altura, cuenta con un telescopio submilimetrico (APEX) y un telescopio conformado por un arreglo de antenas de 12 metros llamado Large Millimiter Array (ALMA) que es patrocinado por Chile y diferentes países de América del Norte, Asia del Este (ESO, 2017).



(a) Paranal

(b) La Silla

(c) Chajnantor

Figura 1.1.: Los tres centros astronómicos de ESO en Chile

1.1.2. Cerro Paranal

En el año 1988 Chile dona 72500 hectáreas a ESO para la construcción de un observatorio astronómico donde se toma la decisión de instalar un observatorio en cerro Paranal (región de Taltal), proyecto que se concluye el año 1998, año en el cual los telescopios entregan la primera observación gracias al telescopio UT1 (Antu). Es en el año 2001 cuando finalmente se construyen los 4 telescopios UT (figura 1.2) y el año 2007 se construye el VLTI (Very Large Telescope Interferometer) logrando emular espejos de gran diámetro gracias a los telescopios auxiliares (AT) y al VLTI tunnel, lugar donde a través de carros mecánicos se retrasa la llegada de la luz a los instrumentos. A esta tecnología se le conoce como interferometría.

Además de los 4 Unit Telescope mas VLTI, Paranal cuenta con dos telescopios más: VST survey telescope y VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy). Ambos telescopios están diseñados como telescopios de rastreo, es decir, son capaces de fotografiar porciones de cielo mayores a los que son capaces los UT.

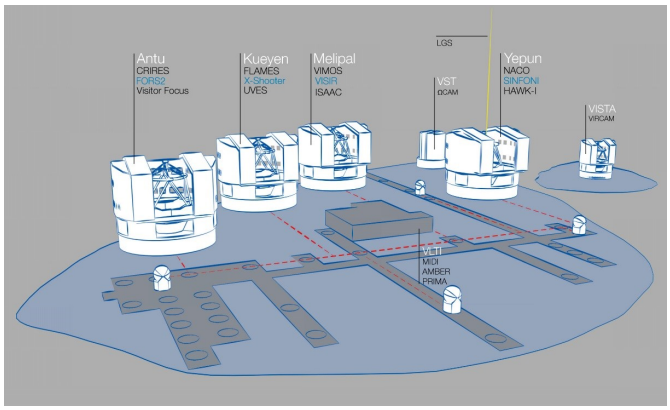


Figura 1.2.: Very Large Telescope (VLT) y sus instrumentos

1.1.3. Los telescopios UT (Unit Telescopes)

Los telescopios están constituidos por diferentes estructuras y sistemas que le permiten funcionar de manera eficiente (figura 1.3). Destacan entre estos la estructura principal que soporta los sistemas ópticos, el telescopio, la cúpula (o Enclosure), el sistema óptico constituido por los espejos y los instrumentos de observación, el sistema hidráulico, el sistema de enfriamiento entre otros. A continuación se detallan los elementos más importantes de los UT.

Infraestructura: Estructura principal y fija donde están montados los equipos e instrumentos que conforman el telescopio, soportando todos los componentes del telescopio, es decir, es la estructura integradora donde se dispone el telescopio, además es en esta estructura donde se instalan los encoder de alta precisión para hacer el correcto tracking en las noches de observación (precisión de 0,00001°).

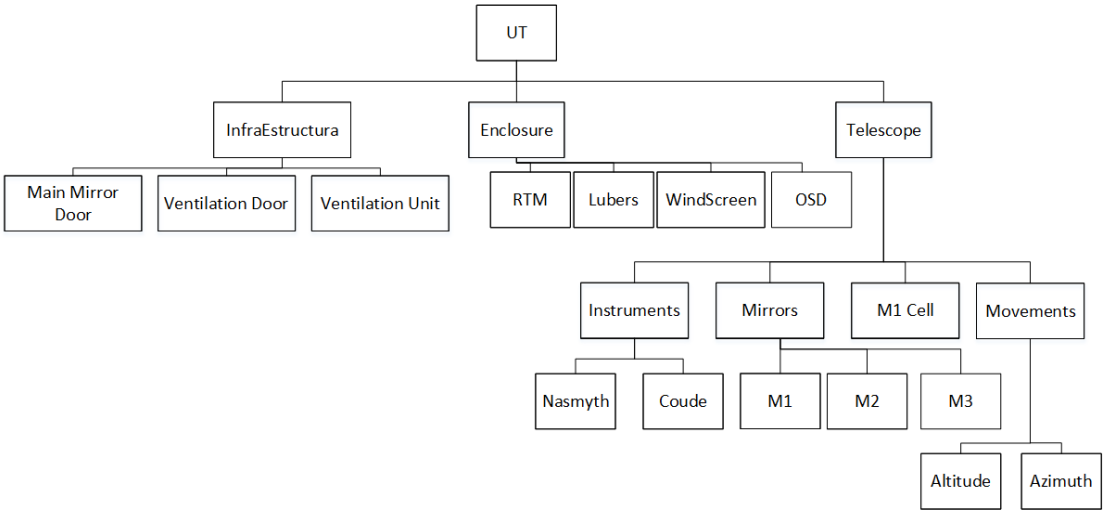


Figura 1.3.: Organigrama principal de un *Unit Telescope*

Enclosure (figura 1.5): Es la estructura que en operación se encarga de proteger el interior del telescopio de diferentes agentes como temperatura, polvo, rayos del sol entre otros. Como el telescopio necesita girar durante las noches de observación, el enclosure debe girar en sintonía con Azimut (giro de Base). El enclosure o domo cuenta con ventanas que en las noches de operación abren para permitir la observación (Observation Slip Doors, OSD). El giro de este mismo se realiza gracias a los Rotation Transmission Mechanism (RTM) los cuales son dispositivos mecánicos en base a dos ruedas dispuestas en forma de balancín que son colocados a lo largo de toda la periferia (8 en total por telescopio) los que soportan el peso del Enclosure y gracias al contacto entre las ruedas y pista del Enclosure, al accionar sus motores permiten el giro del domo. Para efectos de esta memoria, estos equipos son de vital importancia, pues en estos se realiza el análisis de vibraciones propuesto, la ubicación de estos se muestra en 1.4.

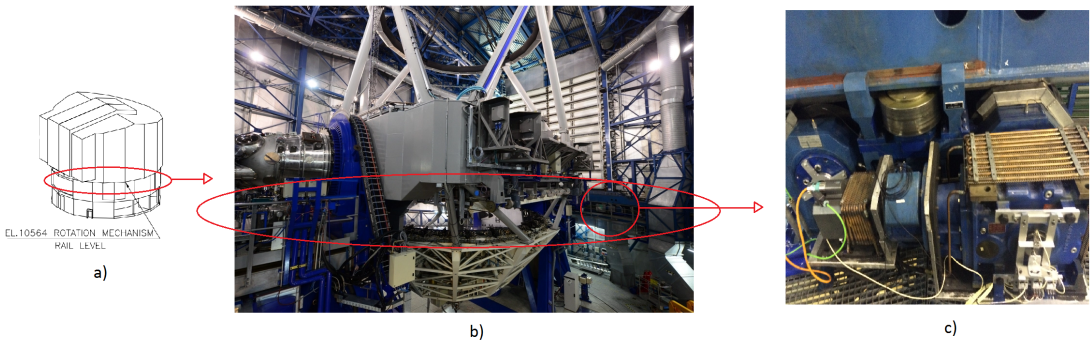


Figura 1.4.: a) Vista isométrica de un UT, en rojo marcado nivel Nasmyth donde se encuentran los RTM b)Vista interior del telescopio desde nivel Nasmyth, en rojo lugar donde se ubican RTM c) Imagen de uno de los RTM, 8 son el total de equipos dispuestos en la periferia circular

El enclosure cuenta con dos subsistemas importantes para la protección del telescopio: luber y windscreens. Al momento de observar es usual tener grandes velocidades de viento, si estos pasaran directamente al telescopio podrían llegar a dañar los instrumentos o espejos. La manera de proteger el interior de los UT es mediante configuraciones de estos componentes que convierten la turbulencia del viento en un flujo laminar.

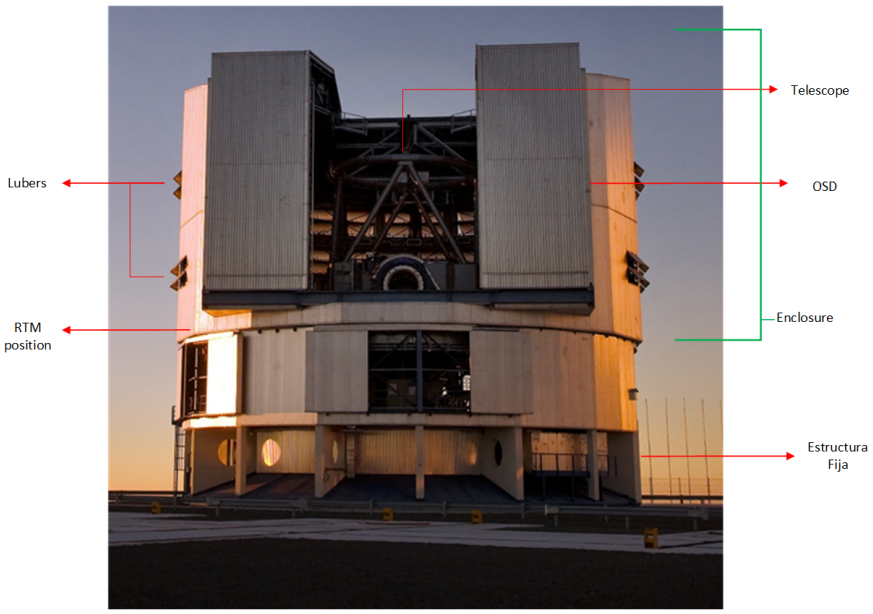


Figura 1.5.: Vista exterior de un UT y sus partes principales

Telescopio (figura 1.6): El telescopio es el corazón de cada UT, pues son ellos los encargados tanto de recibir la luz como también de procesarla. Cada telescopio cuenta con un espejo principal de 8.2 [m] de diámetro (M1) los cuales son los que reciben la luz del cielo, seguido del espejo M2 y finalmente el espejo M3 que gracias a su posición en ángulo de 45° cumple la función de guiar la luz a Nasmyth A ó B, lugar donde se encuentran situados los instrumentos, además tiene una posición para dejar pasar la luz directamente hacia Coude donde también se dispone de un instrumento. Una de las particularidades del espejo principal es la de poseer óptica Activa (tecnología creada por la ESO) que permite corregir las deformaciones sufridas por el espejo percibidas al movimiento de altitud y azimut Esto se realiza mediante 150 soportes dispuestos en la parte baja del telescopio, que mediante software de control, logran percibir cambios en la forma del espejo y corregirlas rápidamente, la estructura que soporta este sistema es el llamado M1 cell, estructura de acero, de aproximadamente 10 toneladas. Sus funciones son:

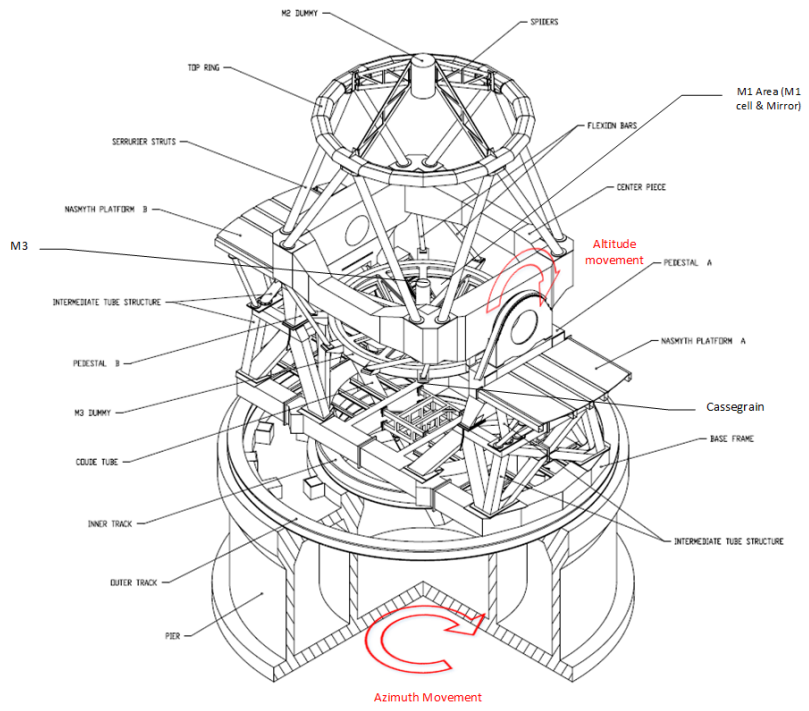


Figura 1.6.: Vista Isometrica del telescopio y sus componentes

1. Soportar el espejo de manera axial y lateral
   a) Aplicar desde los 150 actuadores fuerzas axiales para deformar de manera activa al espejo.
   b) Proveer de promedios para ajustar remotamente la posición del espejo primario
2. Soportar el espejo terciario y seleccionar su posición para la selección del foco
3. Enfriar activamente el espejo primario

1.2. Antecedentes del problema

El observatorio VLT (Cerro Paranal) está compuesto por cuatro telescopios de iguales características, conocidos como UT (unit telescope). Los equipos responsable del giro del domo, o enclosure (ver figura 1.5), llamados RTM (Rotation Transmission Mechanism), serán el objeto de estudio y análisis del presente trabajo de título.

El conjunto de telescopios en Paranal logró diez y seis años de operación ininterrumpida, teniendo el año 2013 un primer evento crítico sobre los RTM el cual hace

suponer que la vida útil de estos sistemas está llegando a su término. Con posterioridad, el año 2015, ocurre un segundo incidente que involucra un RTM; En esta ocasión un rodamiento falló, dejando por una semana uno de los telescopios fuera de operación. A partir de la información recopilada en el observatorio se realizó una tabla 1.1 que da cuenta de todas las intervenciones realizadas hasta ahora de los mecanismos

Tabla 1.1.: Tabla con historial de modificaciones sobre RTM

Fecha	Lugar	Trabajo realizado
Agosto 2013	UT1-RTM07	Cambio de bogie
Septiembre 2014	UT3-RTM08	Se retiran ambos bogie, instalando desde UT3 a UT4
	UT4-RTM08	y modificando UT4 para finalmente ser instalado en UT3
Septiembre 2015	UT4-RTM05	Cambio en rodamientos
Agosto 2016	UT1-RTM04	Cambio de bogie (se instala uno nuevo)

En el sistema de organización de trabajos de Paranal, existe una plataforma llamada PPRS (Sistema de reporte de problemas) en la cual se recopilan las fallas mecánicas, electrónicas, eléctricas, de instrumentación, de software y de ciencias & operaciones ocurridas en cada uno de los telescopios operativos en el año 2015. La tabla 1.2 resume los datos obtenidos tomando como referencia un solo telescopio (UT1) y los tiempos de las tareas asignadas para cada equipo de MSE.

Tabla 1.2.: Horas de trabajo por Equipo (PPRS)

Tareas y horas de trabajo asignadas por grupos en UT1		
Grupo de Trabajo	Cantidad de ordenes	Carga de horas de trabajo
Mecánicos	347	512.20
Software	180	319.89
Eléctrico/Electrónicos	272	178
Otros	38	11.87
Instrumentación	8	10
Total	845	1032.48

Se puede observar que cerca de un 50 % de los trabajos realizados corresponden a fallas mecánicas. Este 50 % se desglosa en los subsistemas a cargo del grupo Mecánico. En la tabla 1.3 se detallan estos sistemas junto con el tiempo destinado a la reparación de cada falla.

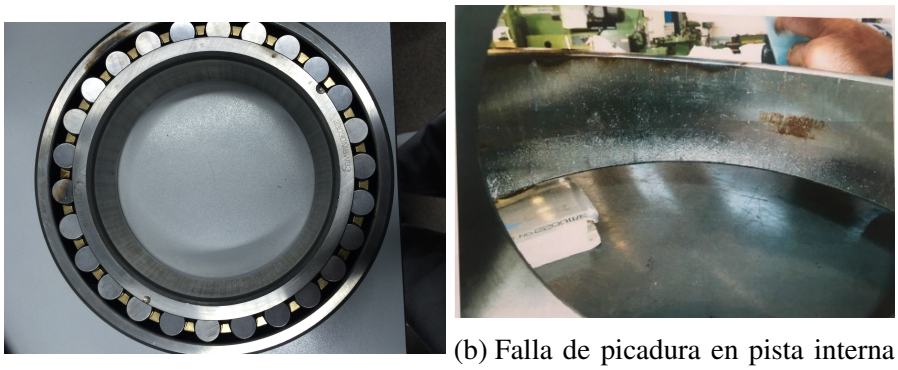
Tabla 1.3.: Horas perdidas de observación y horas usadas en la reparación de los sistemas mecánicos.

Cantidad de horas perdidas por problemas reportados			
Sistema	Cantidad de tareas	Horas perdidas de observación	Horas (totales) usadas en reparación del problema
RTM	24	71.63	235.60
Windscreen	26	4.78	66.57
OSD	65	4.18	65.55
Thermal	132	1.60	56.50
Louvers	19	1.18	27.47
Seal	22	0.83	23.36
MMD	2	0.75	17.15
Otros	30	0.65	10.50
VDS	17	0.33	6.50
Park Enc	10	0.17	4
TOTAL	347	86.10	512.20

Como se observa en la tabla 1.3, la mayor cantidad de horas hombres del grupo mecánico se destinó a arreglar fallas en RTM (46 % del total) esto supuso un 78,91 % de tiempo perdido para observaciones astronómicas, actividad fundamental de todo observatorio.

Estos resultados nos permiten concluir que los Rotation Transmission Mechanism pueden ser considerados un sistema crítico del equipo de mecánica. Estas fallas impactan la actividad fundamental de la empresa (tanto a nivel de observaciones como de mantención) por lo que el grupo de mecánica está en busca de sistemas para aumentar la confiabilidad de los RTM o de caracterizar el estado en que se encuentran. Una de las posibles técnicas de monitoreo escogido a analizar son las vibraciones mecánicas.

Debido a que estos equipos se componen de elementos mecánicos en rotación, esta memoria tiene como finalidad estudiar la factibilidad técnica del uso de análisis de vibraciones en los RTM con el objetivo de encontrar anomalías en su funcionamiento. El desafió de trabajar en estos equipos es la alta carga y baja velocidad a la que se encuentran en su operación normal, haciendo difícil el análisis de vibraciones ya que no se generan fuerzas dinámicas de gran amplitud. Estos equipos no llegan a superar las 15 Revoluciones por minuto en su capacidad máxima de giro. Por esta razón, se estudiarán dos técnicas de análisis para equipos que cumplen con estas condiciones de operación: Promedios en frecuencia y aplicación de la correlación de kurtosis mediante kurtogramas. A través de ambas técnicas se verá la factibilidad de encontrar fallas en los rodamientos de los RTMs. En la figura 1.7 se observa una imagen del rodamiento instalado en los RTM como también una imagen de la pista interna de uno de los pares de rodamiento que presentó falla.



(a) Rodamiento SKF23030

(b) Falla de picadura en pista interna de rodamiento

Figura 1.7.: Rodamiento de RTM que falló el año 2015

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Estudiar la factibilidad de implementar un método de análisis de falla mediante vibraciones mecánicas que permitan caracterizar el estado de equipos que trabajan a baja velocidad y con alta carga.

1.3.2. Objetivo Específico

- Analizar los componentes y entorno en el cual trabajan los RTM.
- Estudio y evaluación de técnicas de análisis de señales aplicables a equipos con señales de falla débiles
- Proponer una pauta de medición que permita estandarizar el registro de las señales de vibraciones de los RTM.
- Evaluación de registros de vibraciones en los RTM, mediante algoritmos computacionales que implementan los procesos de las técnicas de análisis seleccionadas.
- Desarrollar recomendaciones y presentar alternativas para el análisis de los equipos
- Presentar conclusiones del trabajo desarrollado.

2. Mecanismos de Rotación (Rotation Transmission Mechanism; RTM)

Los RTM son subsistemas dentro del sistema llamado *Cúpula o Enclosure* (Figura 1.5), los cuales son los encargados de soportar la cúpula y transmitirle el movimiento rotativo en ambos sentidos de giro, permitiendo así que en momentos de observación, la ventana de observación (OSD) gire en sincronía con el giro de azimut del telescopio teniendo una velocidad de operación (llamada tracking) de no mas de 0,03 $\left[\frac{\circ}{sec}\right]$. y una velocidad de pre seteado de 2 $\left[\frac{\circ}{sec}\right]$. El movimiento se transmite desde las ruedas teniendo una de sus pares conectadas a un motor/reductor. Ambas ruedas están en contacto directo con un riel de perfil cuadrado y curvatura circular dispuesto en la periferia del domo (fig 2.2).

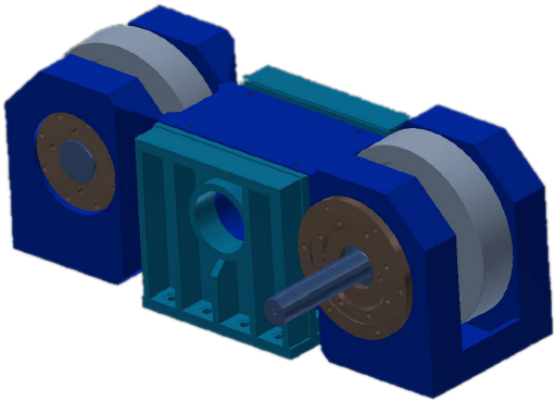


Figura 2.1.: Vista isometrica de un trolley del RTM

Cada telescopio cuenta con ocho unidades de RTM puestos equidistantes el uno con el otro emplazado en la parte fija del edificio. Los RTM soportan una carga total de 280,000$[Kg]$, lo que se traduce en 35000$[Kg]$ repartidos por RTM o de 17,500$[Kg]$ por cada rueda lo que hace que estos equipos operen a una alta carga. La ubicación física de estos equipos se encuentro en el nivel llamado *Nasmyth* el cual se ubica aproximadamente a 11 metros del nivel *G* o ground level (figura 2.2).

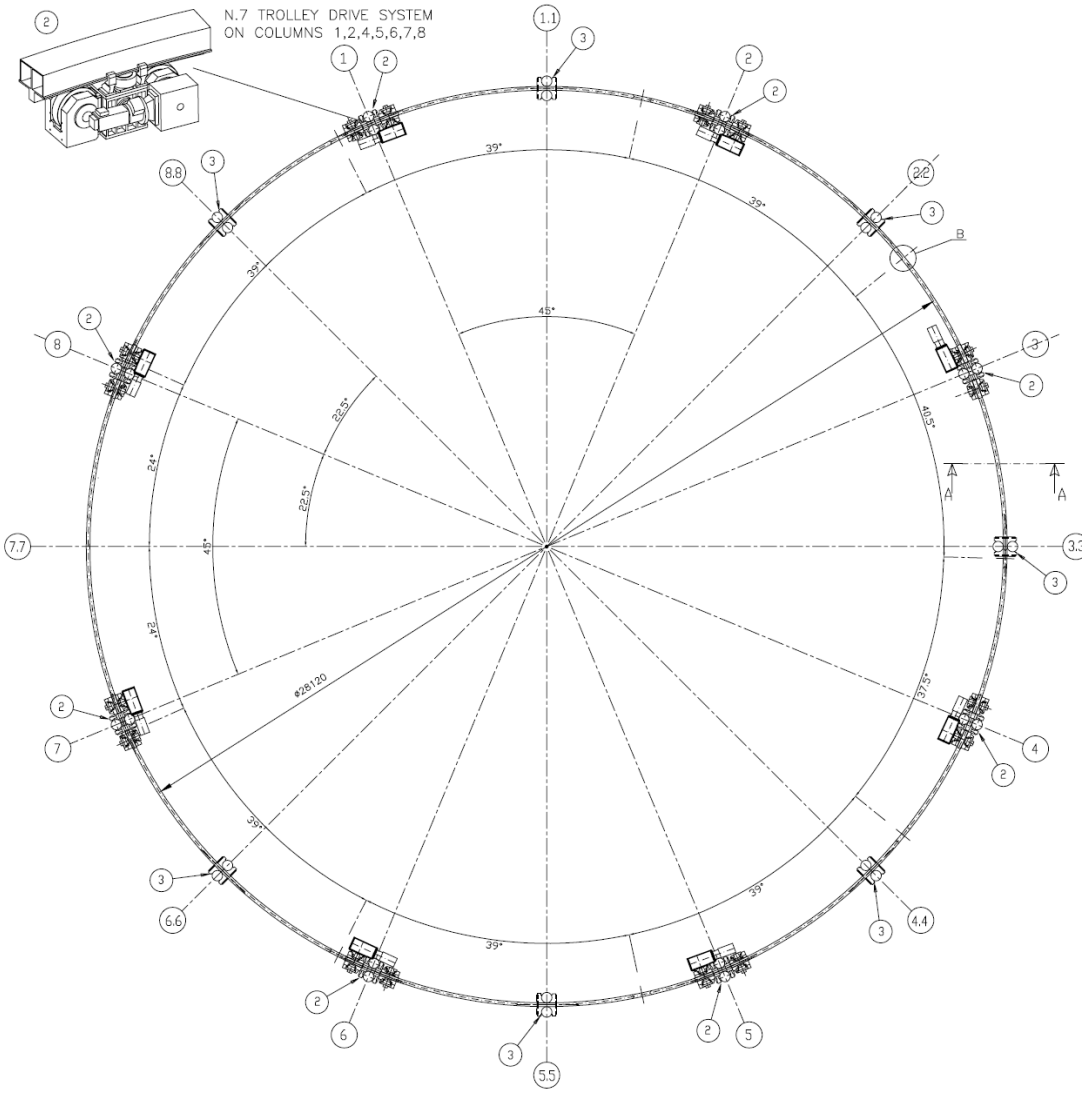


Figura 2.2.: Vista superior de RTM en nivel Nasmyth

2.1. Componentes de RTM

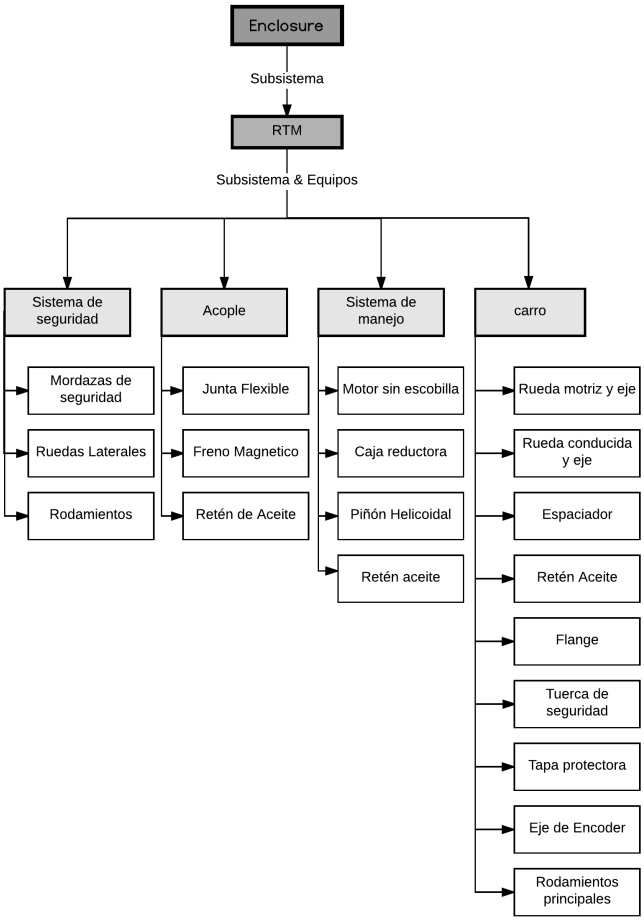


Figura 2.3.: Árbol de subsistema RTM

En la figura 2.3 se indican los sub-sistemas que componen al mecanismo de rotación. A continuación se describen los más críticos:

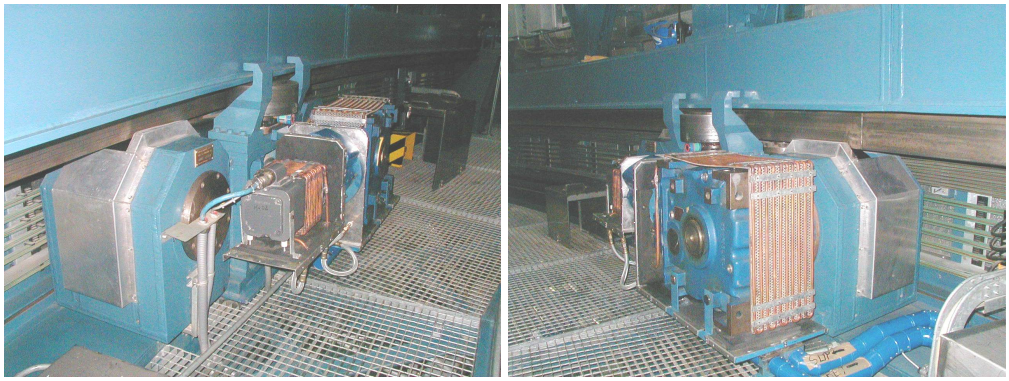
2.1.1. Carro del RTM

Este subsistema es el más importante de todos, este componente es en sí el cuerpo del RTM, el cual está montado en la parte central por una viga con un eje, el cual le permite al trolley actuar de balancín permitiendo una correcta distribución del peso de la cúpula en cualquier posición del movimiento de rotación (figura 2.1).

Este equipo está constituido por dos ruedas montadas a cada extremo del trolley, una rueda conductora (conectada al motor/reductor) y una segunda rueda que tiene el eje conducido (o idle wheel)

2.1.2. Motor/Reductor

La función principal de este componente es la transmisión del movimiento hacia una de las ruedas del RTM (Drive wheel o Rueda motriz), cada RTM funciona como un equipo independiente, es decir, cada uno cuenta con su propio motor/reductor. El motor marca *Siemens* modelo *FT5 106-OAA71-7* posee un torque nominal de 45$[Nm]$, que posee la capacidad de girar a diferentes frecuencias gracias al uso de un variador, este motor además posee un sistema de freno el cual tiene un torque: estático de 100 [Nm] y dinámico de 40[Nm] el que permite frenar el enclosure (en caso de emergencia) en un tiempo menor a 5 [seg]



(a) motor (b) reductor

Figura 2.4.: Componente motor/reductor de un RTM

En el reductor de velocidad, se encontró una inconsistencia entre lo indicado por la hoja de cálculo (Doc.N°: VLT-TRE-SEB-12300-0013) donde se indica que el reductor seleccionado posee un factor de reducción de $i = 65{,}51$, al verificar la placa del equipo se nota que el reductor real seleccionado por la empresa encargada del diseño del sistema tiene un factor de reducción igual a 113.2 modelo RAO 90D C montaje tipo B8 modelo *BONFIGLIOLI* (Link ficha técnica)

2.1.3. Acoplamiento flexible

Este sistema, conecta el motor con el reductor. El acople elegido para unir ambos sistemas es del tipo flexible (figura 2.5) el cual actúa como elemento de seguridad o fusible mecánico. Cuando se genera un torque excesivo este acople se rompe haciendo que el motor se detenga de manera inmediata deteniendo al enclosure.

2.1.4. Patines Guías (Guide Rollers)

Este mecanismo o subsistema permite que el enclosure mantenga su eje de giro, para eso cada RTM cuenta con dos ruedas guías (Figura 2.2, 2.6b) junto con siete patines guías puestos de manera alternada entre RTM (figura 2.6a, elementos rotulados como

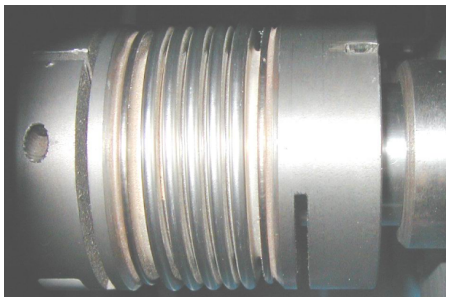
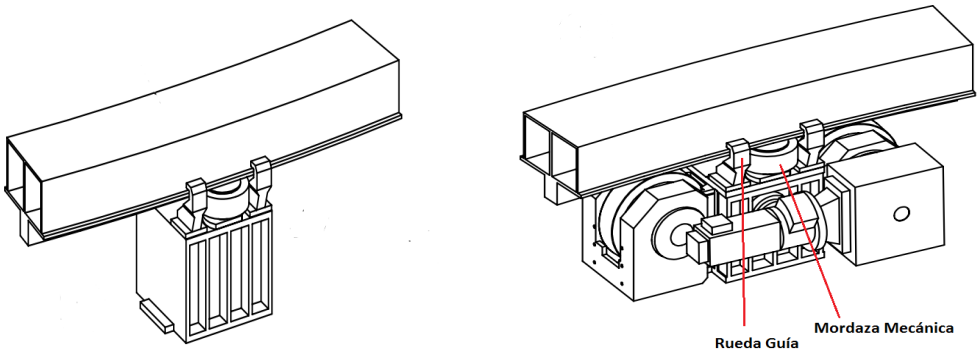


Figura 2.5.: Acople flexible que une Motor con reductor de cada RTM

1.1, 1.2, 1.3, ...), además de las ruedas guías, el sistema cuenta con cuatro mordazas que actúan como tope mecánico en caso de que alguna de las ruedas laterales falle.



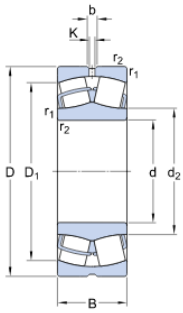
(a) Patines guías entre RTM

(b) Patines guías en RTM

Figura 2.6.: Dos tipos de patines guías en enclosure

2.1.5. Rodamientos

Los rodamientos en los RTM son modelo SKF23030 del tipo esférico. Este tipo de rodamiento tiene la capacidad de auto alinearse convirtiéndolos en insensibles a problemas de alineamiento del eje relativo al descanso del rodamiento. Los rodamientos del tipo esférico se usan en aplicaciones donde existen altas fuerzas radiales (como en el caso de los Rotation Transmission Mechanism). Según fabricante estos rodamientos estan diseñados para soportar cargas de $531[kN]$ limite muy por sobre los $175[kN]$ que cada descanso debe soportar. Cada RTM cuenta con cuatro rodamientos en total, dos por eje de ruedas. Sus especificaciones geométricas se muestran en la figura 2.7:



d		150	mm
D		225	mm
B		56	mm
d_2	≈	169	mm
D_1	≈	203	mm
b		8.3	mm
K		4.5	mm
$r_{1,2}$	min.	2.1	mm

Figura 2.7.: Dimensiones de rodamiento SKF23030

y sus tonos de rodamiento para el análisis en frecuencia indicados en la tabla 2.1

Tabla 2.1.: Tonos de rodamiento SKF23030

Bearing Frequencies [Hz] @8.2 RPM	
Velocidad Giro	0.137
BPFI	2.023
BPFO	1.667
FTF	0.062
BSF	0.695
2*BSF	1.391

Las fallas asociadas a los equipos RTM (históricos) se han debido a fallas en los rodamientos, siendo este componente el elemento crítico a observar en fallas, además por las bajas revoluciones a las cuales opera el sistema de ruedas (en su velocidad máxima, 15 Rpm) no se espera encontrar fuerzas dinámicas que puedan generar algún tipo de vibración asociada al rodamiento, por lo que solamente se buscará encontrar señales transientes o de impacto de alta amplitud. Debido a las altas cargas a las cuales operan, cualquier imperfección generará un efecto de resonancia por respuesta al impacto.

A partir de la figura 2.8 se corrobora la selección de este tipo de rodamiento (esférico) a partir de los parámetros de entrada de velocidad de giro, carga y diámetro del eje. Además se observa de manera comparativa la baja velocidad en la que trabaja el sistema. De misma manera la se aprecia una alta carga para la de trabajo de los RTM. Finalmente a partir del gráfico se observa que otro tipo de descanso utilizado en equipos de baja velocidad es del tipo buje, configuración que se encuentra en la mayoría de los casos en la industria.

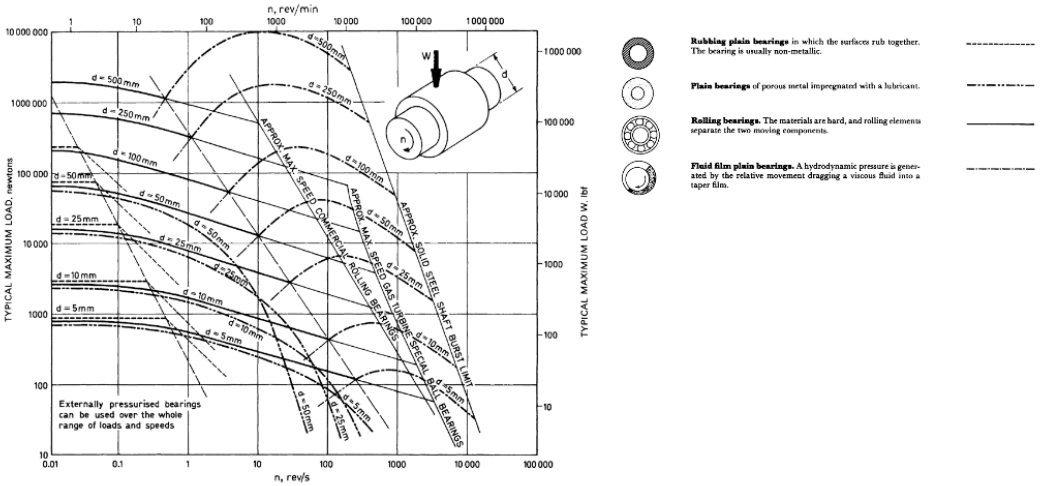


Figura 2.8.: Tabla de referencia para selección de rodamiento a partir de velocidad de giro, carga y diámetro de eje. Fuente: (Neale, 2013)

3. Análisis de vibraciones

3.1. Técnicas de medición de vibraciones

3.1.1. Etapas de la medición

Las etapas a seguir para la medición y análisis de las vibraciones se clasifican de la siguiente manera:

1. ***Etapa transductora***: Etapa donde el sensor de vibraciones transforma la señal análoga (vibración del equipo) en una señal eléctrica **proporcional** a la magnitud medida.

2. ***Etapa de acondicionamiento de la señal eléctrica***: Algunas señales entregadas por el sensor no pueden ser registradas o introducidas directamente, es decir, necesitan ser acondicionadas previamente. Por ejemplo, la señal de un sensor de vibración necesita de una amplificación de la señal en orden de ser percibida. Por lo general los sensores de aceleración (acelerómetros piezoeléctricos) usados en la industria vienen con un preamplificador (ICP, integrated circuit piezoelectric) de la señal integrada, haciendo que esta etapa no sea percibida.

3. ***Etapa de procesamiento y medición***: Etapa fundamental del análisis de vibración, pues esta etapa consiste en usar técnicas o procedimientos para sacar la mayor información de señal eléctrica acondicionada. El procesamiento clásico de la medición de vibraciones es el análisis de frecuencia mediante el uso de la transformada de Fourier. Otro ejemplo de procesamiento y medición es capturar los valores RMS, valor pico, valor pico-pico.

4. ***Etapas de registro***: Consiste en guardar (registrar) los datos medidos y procesados, este puede ser directamente en el equipo transductor como en un Computador.

Existen diferentes tipos de sensores de vibraciones típicos, dentro de los cuales los de uso más común son

1. Desplazamiento relativo sin contacto

2. Desplazamiento relativo con contacto

3. Sensor de velocidad o velocímetro

4. Sensor de aceleración o acelerómetro.

Para efectos de medición, se utilizará un sensor de aceleración del tipo piezoeléctrico sin sistema de amplificación integrada (Figura 3.1), el cual es el tipo de sensor usado mayoritariamente en el análisis de vibraciones. El principio de funcionamiento son los materiales piezoeléctricos (como el cuarzo) que tienen la propiedad de que al aplicarles una fuerza externa en dirección de su polarización se genera una carga eléctrica entre sus superficies, la cual es proporcional a la fuerza aplicada y por ende, a su aceleración.

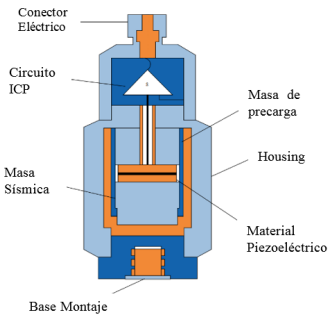


Figura 3.1.: Esquema de un acelerómetro y sus partes principales

3.1.2. Transformada discreta de Fourier

La transformada de Fourier tiene un trasfondo puramente matemático, y es aplicable solo a funciones continuas, Es por esto que para señales discretas se introduce el concepto de Transformada Discreta de Fourier, computada mediante el algoritmo FFT (ingles *Fast Fourier Transform*).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \tag{3.1}$$

Uno de los grandes limitantes es la gran cantidad de operaciones que deben hacerse para su cálculo, específicamente $O(n^2)$. Mediante manipulación matemática, en el año 1965, James Cooley y John Tukey publicaron de manera general un algoritmo capaz de reducir el número de operaciones a $O(nlog(n)$ (Figura 3.2), existen númerosos algoritmos computacionales para el cálculo de la FFT, uno de los más famosos y gratuitos es el FTTW (Fastest Fourier Transform of the West). Este algoritmo es el que se implementa en la librería Scipy de Python la cual se utilizó para efectos de esta memoria.

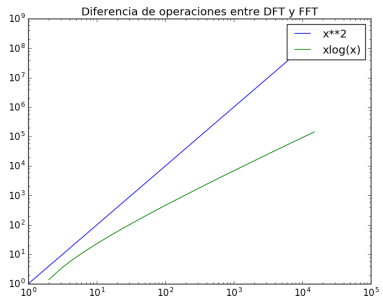


Figura 3.2.: Diferencia en operaciones entre FFT y DFT

3.1.3. Densidad Espectral

La densidad espectral de una señal nos da cuenta de cómo está distribuida la **potencia** o la **energía** de dicha señal en cada línea de frecuencia de la cual está formada. Para procesos transientes en el tiempo (aquellos que empiezan y terminan en cero en amplitud) es posible usar densidad espectral con relación a su energía (ejemplo, prueba de impacto). En el caso de señales continuas y estacionarias donde la cantidad de energía medida es proporcional al tiempo de observación, deben ser medidas en unidades de potencia, es decir, de energía por unidad de tiempo.
Básicamente la PSD (**Power** Spectrum Density) se calcula como el valor esperado de la transformada de Fourier con la señal al cuadrado (potencia) (ecuación 3.2)

$$S_{xx}(\omega) = \lim_{T\to\infty} (\mathbf{E}|\hat{x}_T(\omega)|^2) \tag{3.2}$$

donde $S_{xx}(\omega)$ es el valor de la PSD. Uno de los métodos para aproximar la PSD es el algoritmo propuesto por P.D Welch (Welch, 1967), el cual propone calcular la PSD a través de la Transformada de Fourier en segmentos de la señal original (periodogramas) para luego promediar cada uno de ellos. Cada segmento de la señal original es multiplicada por una función ventana. Los parámetros para el cálculo de la PSD mediante el método de Welch son:

- **x**: Arreglo con los datos de la serie de tiempo
- f_s: frecuencia de muestreo de la serie de tiempo
- **window**: Ventana a aplicar sobre x
- **nperseg**: Número de puntos de la serie de tiempo por segmento
- **noverlap**: Número de puntos a superponer entre segmentos

Los cuales devuelven dos series de datos:

- **f**: arreglo con las frecuencias de muestreo.
- P_{xx}: PSD del arreglo x.

3.1.4. Detección de fallas en rodamientos

El rodamiento es un elemento mecánico utilizado en casi la mayoría de los equipos rotatorios, es por esta razón que es de vital importancia el análisis o monitoreo de estos componentes en el mantenimiento predictivo.

Dentro del ciclo de operación de un rodamiento, aunque este sea montado de manera correcta, con una correcta lubricación, manteniéndolo libre de elementos contaminantes (agentes externos) y calculándolo para una correcta operación se puede decir que el rodamiento estará libre de fallas exceptuando una: la falla por fatiga, la cual no puede ser evitada debido a su tiempo de operación o vida útil. Es por esto que la evolución de la falla de un rodamiento a través del tiempo se puede clasificar en cuatro etapas y es esta clasificación por la cual, la experiencia dice que este tipo de falla ocurre en aproximadamente el 80 % de las veces

- Etapa 1: El primer indicio de falla en un rodamiento es una grieta a nivel microscópico y sub-superficial, generalmente localizado en el punto de mayor carga del rodamiento (punto de contacto entre el elemento rodante y la pista externa), en esta etapa la detección de la grieta (a nivel microscópico) es imposible de detectar mediante el uso de un acelerómetro y espectros frecuentes, por lo que se deben emplear técnicas más complejas siendo una de ellas llamada IDF (Incipient Detection Failure) la cual aprovecha la frecuencia natural del acelerómetro para amplificar esta señal de baja amplitud

- Etapa 2: Una vez que se generó la grieta sub-superficial, ésta comenzará a propagarse hacia la superficie produciéndose una pequeña fisura o picadura en el elemento. Esta falla es apenas visible para el ojo humano. Al existir esta picadura, en el momento en el que una bola pasa por esta, se produce un efecto mazo-campana que hace que la bola excite las frecuencias naturales de la pista siendo estas frecuencias de alta frecuencia pero de baja amplitud

- Etapa 3: El paso de las bolas sobre la picadura hace que la picadura aumente en tamaño, haciendo que las componentes de frecuencias en el espectro de velocidad en los elementos del rodamiento (frecuencias las cuales son propias de cada elemento del rodamiento -pista externa, interna, jaula o bolas- dependiendo de donde se localiza la picadura [tabla 3.1])

- Etapa 4: La falla catastrófica es inminente debido a que la falla ya es de gran magnitud dentro del rodamiento, es de esperar también que el daño ya sea múltiple en los elementos lo que hace que aparezcan más componentes de falla de los elementos del rodamiento en el espectro y el daño en pistas puede estar distribuida a su largo y no solo concentrado en un punto.

Como se mencionó dentro de las etapas de falla de un rodamiento, los impactos generados a partir de un defecto en alguno de los elementos del rodamiento producen una excitación (vibración) cada vez que un elemento rodante hace contacto con la superficie

dañada. Esta excitación de los elementos suele ser periódica con relación directa con la velocidad de los elementos rodantes y la geometría del rodamiento.

Tabla 3.1.: nomenclatura de las frecuencias características de rodamiento

Frecuencia característica	Acrónimo	Fórmula
Frecuencia de paso de los elementos rodantes sobre la pista externa. (Ball pass frequency of outer race)	BPFO	$\frac{RPM \cdot n}{2} \cdot \left(1 - \frac{d \cdot \cos\theta}{d_m}\right)$
Frecuencia de paso de los elementos rodantes sobre la pista interna. (Ball pass frequency of inner race)	BPFI	$\frac{RPM \cdot n}{2} \cdot \left(1 + \frac{d \cdot \cos\theta}{d_m}\right)$
Frecuencia de rotación de la jaula contenedora de las bolas (Fundamental train frequency)	FTF	$\frac{RPM}{2} \cdot \left(1 + \frac{d \cdot \cos\theta}{d_m}\right)$
Frecuencia de giro de los elementos rodantes	BSF	$\frac{RPM \cdot d_m}{2d}\left[1 - \left(\frac{d}{d_m}\right)^2 \cos^2(\theta)\right]$

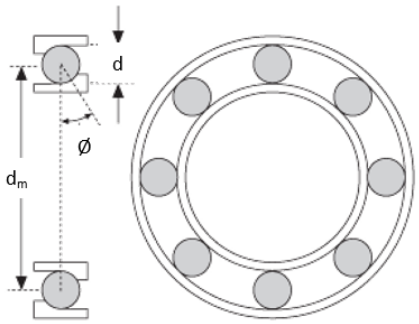


Figura 3.3.: parámetros usados en tabla 3.1

Donde:

- n: número de elementos rodantes
- d: diámetro de los elementos rodantes
- d_m: diámetro entre los centros de los elementos rodantes
- RPM: revoluciones por minuto de giro del rodamiento

La señal que se obtiene al medir un rodamiento poseen un comportamiento especial dependiendo del elemento que presente la falla, en especial aquellos rodantes (pista interna -En la mayoría de las aplicaciones en la cual gira- y elementos rodantes), pues estos están constantemente pasando y saliendo por la zona de alta carga, originándose una señal modulada en amplitud, pues el elemento al chocar en la zona de alta carga tendrá una respuesta mayor en amplitud que cuando esta misma pase por la zona de mínima carga.

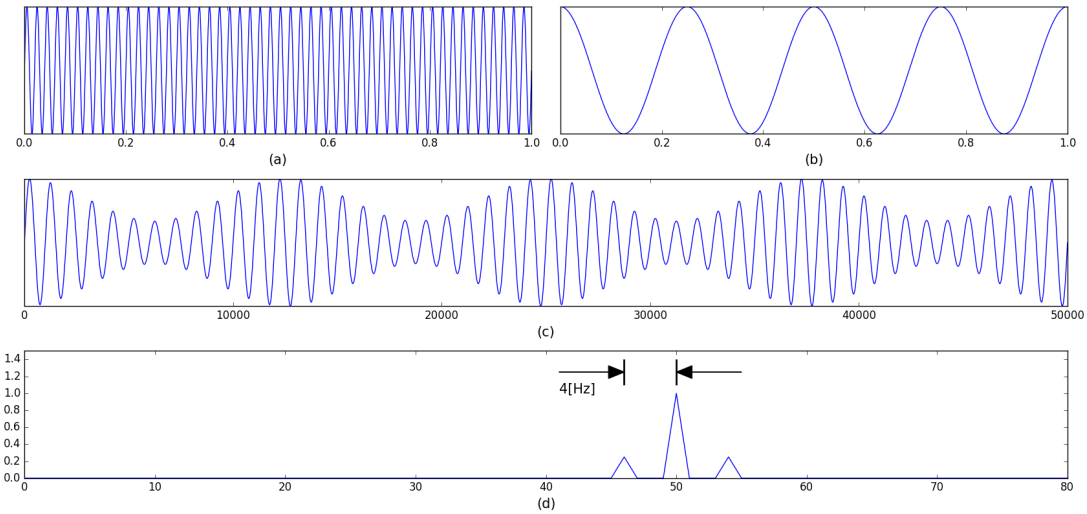


Figura 3.4.: Ejemplo de señal modulada en amplitud

3.1.4.1. Señales moduladas en amplitud

La modulación en amplitud consiste en una interacción particular entre dos señales diferentes, donde la amplitud de una señal varía en relación a la señal transmitida o la señal modulada, es decir, donde por lo general la frecuencia de la onda portadora es mayor a la onda modulada, matemáticamente se tiene la siguiente relación para la modulación en amplitud:

Una señal portadora de forma trigonométrica:

$$p(t) = A \cdot \sin(2\pi f_p t) \tag{3.3}$$

Una señal la cual será modulada por la señal portadora:

$$m(t) = M \cdot \sin(2\pi f_m t) \tag{3.4}$$

Finalmente, la modulación con la señal portadora se expresa como:

$$y(t) = [m(t) + 1] \cdot p(t) \tag{3.5}$$

donde:

- $p(t)$: Onda portadora
- $m(t)$: Onda a montar
- A y M: Amplitud de cada onda
- f_p y f_m: Frecuencia de cada onda
- $y(t)$: señal modulada en amplitud

Un ejemplo de modulación en amplitud se puede apreciar en la imagen 3.4 donde se tienen dos señales, (a) con una frecuencia de $50[Hz]$ y (b) con una frecuencia correspondiente de $4[Hz]$, en (d) se puede ver la forma característica de la modulación en amplitud que consiste en una frecuencia central, correspondiente a la señal portadora y dos frecuencias a ambos lados correspondientes a la onda montada, la distancia entre estas frecuencias es equivalente a la de la onda montada. En la práctica las modulaciones en amplitud suelen contar con mayor número de líneas laterales debido a los armónicos de la señal.

Estas señales moduladas para fallas en rodamientos, la señal moduladora contiene la información acerca de las fallas características. Existen técnicas (procesamiento de la señal) para extraer las frecuencias de interés Una de estas herramientas es hacer uso de la señal analítica (señal que se caracteriza por no contener frecuencias negativas) para así calcular la envolvente de la señal usando la transformada de Hilbert, la cual se define, para una señal arbitraria $f(t)$ como (Boashash, 1992):

$$H\{f(t)\} = p.v \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(t-\tau)}{\pi\tau} d\tau \tag{3.6}$$

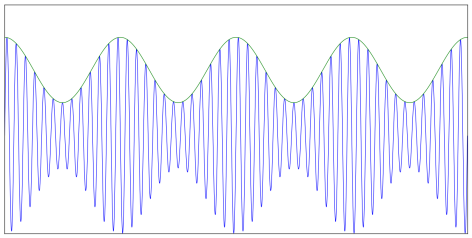
donde $p.v$ corresponde al valor inicial de Cauchy. Una señal con valores reales, como las medidas en vibraciones puede ser representada de forma analítica de la siguiente manera:

$$s_a = s(t) + j \cdot H[s(t)] \tag{3.7}$$

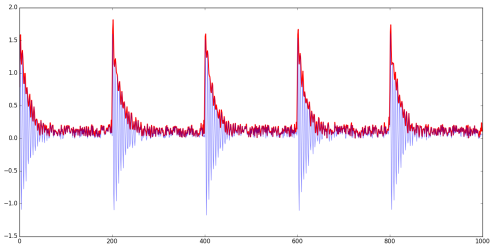
de esta manera, analíticamente, la señal está representada de manera compleja, por lo que puede expresarse de manera compleja de la forma:

$$s_a(t) = s_m(t) \cdot e^{j\phi(t)} \tag{3.8}$$

Donde $|s_a|$ corresponde a la amplitud instantánea y $\arg(|s_a(t)|) = \phi(t)$ a la fase. Dos ejemplos de envolventes mediante la transformada de Hilbert pueden verse en la imagen 3.5a y 3.5b



(a) Envolvente de señal pura



(b) Envolvente de una señal impulsiva con ruido gaussiano

Figura 3.5.: Ejemplos de envolvente mediante transformación de Hilbert

El procedimiento para aislar la señal de interés consiste en los siguientes pasos:

1. Calcular FFT de la señal a analizar
2. Seleccionar filtro pasa banda procurando dejar la zona donde se ve comportamiento de modulación en amplitud
3. En el caso de querer estudiar severidad, debe amplificarse la señal filtrada
4. Calcular la señal analítica de la señal mediante la transformada de Hilbert para calcular envolvente
5. Calcular FFT de la señal envolvente
6. Corroborar si aparecen tonos de rodamientos (BPFO,BPFI...)

3.2. Análisis de vibración en equipos a baja velocidad

3.2.1. Desafío a bajas revoluciones

Predecir la presencia de fallas en equipos que operan a bajas revoluciones utilizando las técnicas clásicas como lo es el análisis del espectro de frecuencia aplicado directo a la señal mediante la transformada de Fourier. Por lo que el análisis de vibraciones resulta ser una tarea difícil de llevar a cabo, principalmente debido a que el giro de estos equipos no es lo suficientemente rápidos capaz de generar fuerzas dinámicas significantes como para manifestarse en la forma de onda del fenómeno que se está midiendo y ser captadas por el sensor por lo que esta señal, en caso de no ser nula, resulta ser de baja amplitud pasando éstas desapercibidas por el nivel de ruido y contaminación vibratoria del entorno. Las máquinas consideradas de bajas revoluciones son aquellas que giran entre 6 y 300 ciclos por minuto (Robinson, 1995)

3.2.2. Estado actual de técnicas a bajas revoluciones

Debido a que en este tipo de máquinas las fuerzas dinámicas suelen ser bajas o nulas es que las manifestaciones clásicas de fallas (Ver Anexo A.2.3 para ejemplos) suelen no aparecer exceptuando fallas localizadas como lo son por ejemplo fallas en rodamientos que generan señales con características no estacionarias y transientes (señales que empiezan y terminan en cero en un tiempo finito (DLI, 2009)). A continuación se resumen tres técnicas usadas en el análisis a baja velocidad que tienen como objetivo el análisis de fallas en rodamientos:

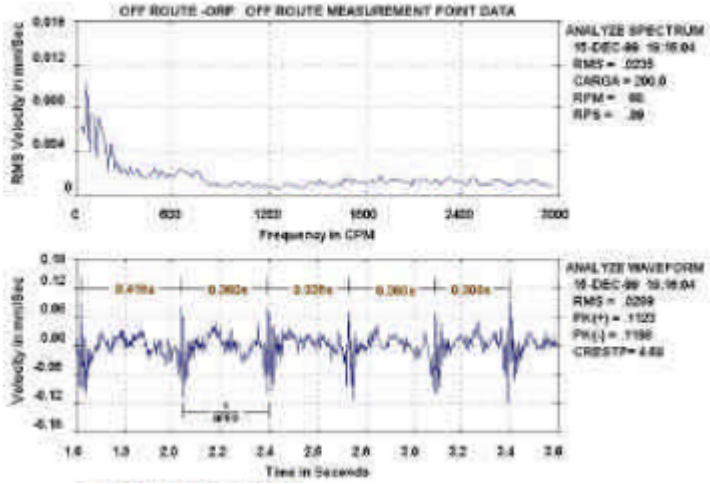


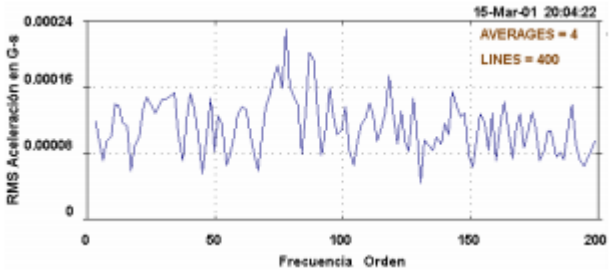
Figura 3.6.: Espectro y forma de onda de rodamiento con pista externa defectuosa y velocidad variable

3.2.2.1. Análisis de forma de Onda

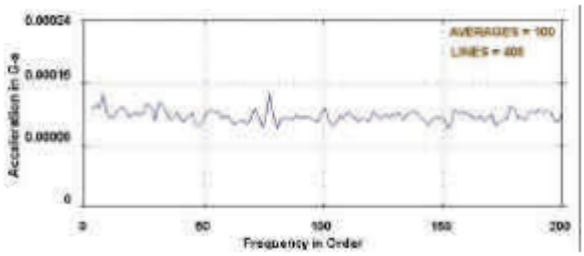
Como el efecto o falla de rodamiento es de tipo localizado, cada vez que un elemento rodante pasa por la falla, se produce un impacto o señal impulsiva que produce una vibración no estacionaria. El análisis de la forma de onda de aceleración permite identificar los impactos producidos por el paso de los elementos rodantes. Un ejemplo de este análisis esta propuesto en *análisis de vibraciones aplicados a las maquinas rotatorias de baja velocidad* (Saavedra, 2005) En la figura 3.6 se muestra tanto la forma de onda como el espectro de frecuencia medido en un agitador que presenta fallas en la pista externa del rodamiento, la velocidad nominal del equipo son 60 rpm. Si se analiza el espectro tomado, no se puede observar la componente de frecuencia correspondiente al rodamiento. Sin embargo, si se analiza la serie de tiempo, se pueden notar impactos a un tiempo aproximadamente el inverso del tono de rodamiento BPFO confirmando una existencia de falla en rodamiento

3.2.2.2. Análisis Espectral promediando en frecuencia

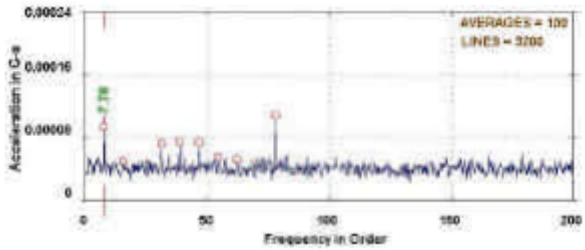
Esta técnica se basa en promediar diferentes mediciones realizadas de igual manera con el fin de promediar los espectros, obviando así la diferencia de fase que se pueda presentar entre mediciones. Esto hace que tanto el ruido electrónico como señales del entorno (aleatorias) disminuyan manteniendo en alto aquellas que no varían de manera aleatoria (señal de interés) esto mejora la relación señal/ruido de las mediciones. Un factor importante es que para esta técnica también se necesita una alta resolución en frecuencia (número de líneas). Esto se logra aumentando el tiempo de adquisición de la señal a analizar. En la figura 3.7 puede verse como mejora el espectro al aumentar el número de promedios y el número de lineas (Fuente: (Saavedra, 2005)).



(a) Espectro con 4 promedios y 400 líneas de resolución



(b) Espectro con 100 promedios y 400 lineas de resolución



(c) Espectro con 100 promedios y 3200 lineas de resolución

Figura 3.7.: Ejemplo de espectros para diferente configuración de promedios y resolución

3.2.2.3. Kurtosis correlacionada y kurtogramas

Este último método es una herramienta estadística para analizar ondas no estacionarias (como rodamientos) debido a que es capaz de indicar la presencia de series transientes y las frecuencias locales en el dominio de frecuencias. La idea general es la de modelar la señal como una suma lineal entre una señal transiente (débil) y ruido, es decir:

$$Y(t) = X(t) + N(t) \tag{3.9}$$

en el cual X(t) es la señal transiente y N(t) es ruido.

Una manera de analizar este tipo de señal es considerando indicadores estadísticos sensibles a la señal con series de picos (abrupta). Un indicador útil es la kurtosis la cual adopta valores altos cuando la señal es del tipo X(t) (figura 3.8) e idealmente cero cuando se tiene sonido de fondo N(t). La kurtosis espectral (SK) presentada por

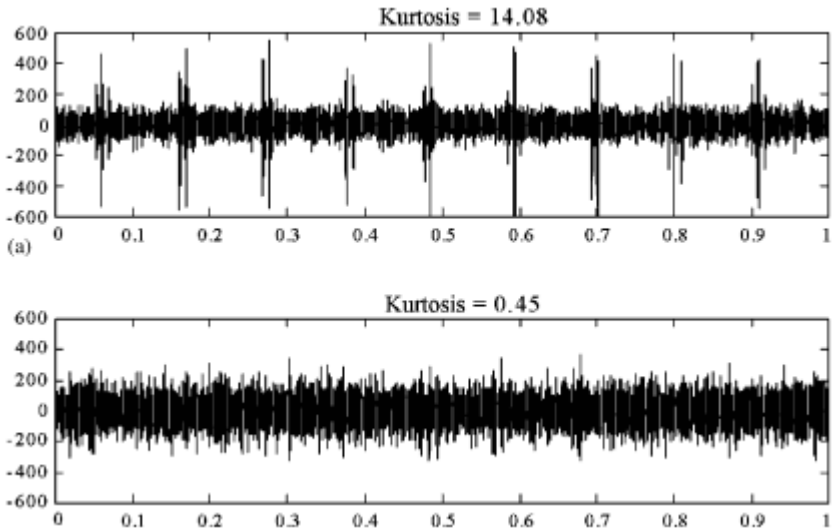


Figura 3.8.: kurtosis para dos tipos de señales

(Antoni, 2006) propone la aplicación de la kurtosis localmente para diferentes bandas de frecuencias, ayudando así a evitar que las vibraciones de señales fuertes, repartidas en un rango largo de frecuencias, intervengan con la señal de interés (Antoni, 2006), este proceso de filtrado se le conoce como kurtosis espectral la cual se calcula mediante:

$$K_x(f) = \frac{\langle |H(n,f)|^4 \rangle}{\langle |H(n,f)|^2 \rangle^2} - 2 \tag{3.10}$$

donde:

$$\langle f(n) \rangle = \lim_{N \to \infty} \frac{1}{N} \sum_{N} f(n) \tag{3.11}$$

y $|H(t,f)|$ representa la envolvente compleja de la señal x(t) a la frecuencia f.

Las propiedades principales de la SK son:

1. la SK de un proceso estacionario es una constante en función de la frecuencia
2. la SK de un proceso Gaussiano Estacionario es 0
3. en la presencia de ruido ($N(t)$), la SK del proceso no estacionario x(n) es:

$$K_y(f) = \frac{K_x(f)}{[1+\rho(f)]^2} \tag{3.12}$$

donde:

- $K_x(f)$: SK de señal X(t)
- $K_y(f)$: SK de señal Y(t)

- $\rho(f)$: relación ruido-señal

Esta fórmula indica que si la relación señal-ruido es alta, $K_x(f)$ tiende a ser igual a $K_y(f)$ y K_y tiende a 0 cuando la relación es baja. las propiedades (1) y (2) muestran la habilidad de la SK para detectar, caracterizar y localizar en frecuencia la presencia de señales no estacionarias escondidas en los datos.

La SK se ve afectada por el largo de la ventana elegida. Es por eso que se propone el uso de la transformada de Fourier corta en tiempo para calcular SK con diferentes tamaños de ventana y poder seleccionar el ancho de banda en frecuencia donde la kurtosis es mayor (Antoni, 2006). Esta técnica introduce el concepto de kurtogramas, el cual es una representación gráfica de SK para diferentes anchos de banda y centradas a diferentes frecuencias, herramienta que debido a su rápido calculo está siendo aplicado en el análisis de falla en rodamiento actualmente.

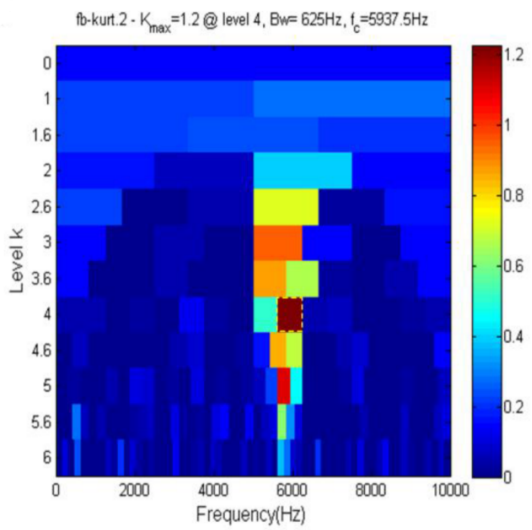


Figura 3.9.: Ejemplo kurtograma

En la figura 3.9 se observa un ejemplo de kurtograma para una señal, se puede observar que el mayor valor de kurtosis se encuentra en torno a los $6000[Hz]$ con un ancho de frecuencia de $\Delta f = 1250[Hz]$, el cual se encuentra en el nivel $k = 4$. Estos datos permiten la elección de un filtro para demodular el tipo de señal buscada, centrando el filtro en f_c con un ancho de filtro de Δf. Hoy en día existen varios trabajos relacionados con encontrar fallas en rodamientos empleando la técnica de los kurtogramas, a continuación se presenta uno de ellos en el cual se detectan fallas en rodamientos en un motor lubricante dentro de un barco (Konstantinos Kamaras, 2016).

El proceso de análisis de la señal se muestra en la figura 3.10

El autor del trabajo analiza la señal a una tasa de muestreo de $44{,}1[kHz]$ sobre un rodamiento modelo 6222 SKF el cual presenta fallas en su pista externa, por lo que es de esperar componentes en el espectro correspondientes al tono de rodamiento BPFO (4.07X) La serie de tiempo junto con el espectro se muestra en la figura 3.11 Un pre-

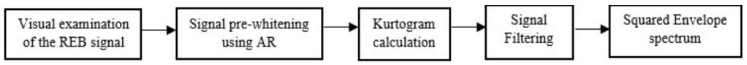


Figura 3.10.: Pasos para demodulación de señal

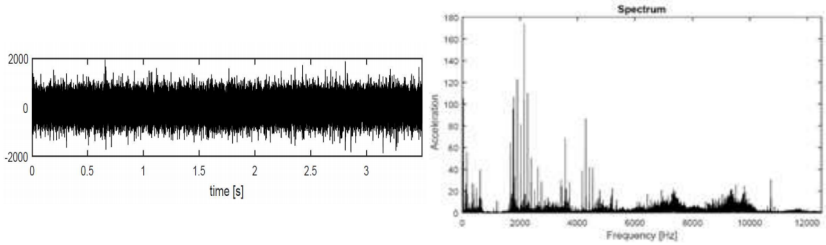


Figura 3.11.: Serie de tiempo (izquierda) y su espectro (derecha

blanqueado de la señal y una posterior demodulación de la señal muestran resultados claros de una falla en la pista externa teniendo como resultado lo expuesto en la figura 3.12

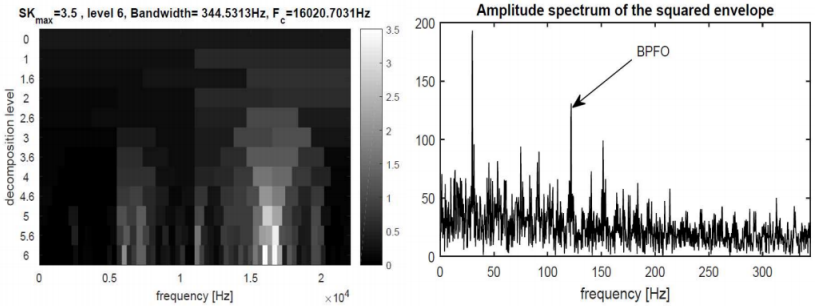


Figura 3.12.: Aplicación kurtograma (izquierda) y su demodulación (derecha)

Del kurtograma se ve que la frecuencia central de 16020 [Hz], con un ancho de frecuencias de 344.53 [Hz] posee el mayor valor de kurtosis.

4. Análisis de vibraciones RTM en Paranal

4.1. Proceso de medición

4.1.1. equipos de medición

El equipo con el cual se toman mediciones corresponde al usado por el departamento de *System & Optics* a cargo del ingeniero Sebastien Poupar, quien facilitó el equipo para llevar a cabo las mediciones. Este está compuesto de:

Amplificador Brüel & Kjær

- Modelo: NEXUS tipo 2692-OS4.
- 4 canales.
- Rango Frecuencia($-10\,\%$): aceleración: 0.1 Hz hasta 100 kHz
- Filtro paso bajo: 0.1,1,3,10,22.4,30,100 $[kHz]$
- Filtro paso alto: 0.1,1.0 o 10 $[Hz]$
- Ganancia de amplificación: $[0{,}01-10]\frac{mV}{pC}$
- factor de amplificación usado: 1 $\left[\frac{V}{ms^{-2}}\right]$.
- Link a ficha técnica: Product Data Nexus Type 2692

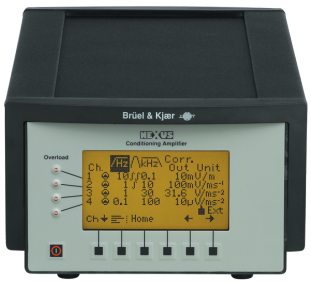


Figura 4.1.: Amplificador Nexus 2692-OS4

Acelerómetro Brüel & Kjær

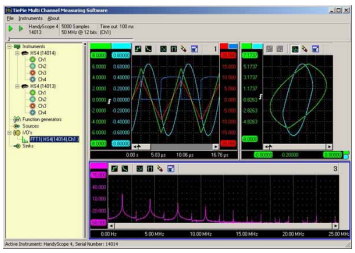
- Modelo 4370.
  - Alta sensibilidad ($98 \pm 2\%[\frac{pC}{g}]$ a 159,2$[Hz]$).
  - Apto para vibraciones a baja frecuencia.
  - Frecuencia inferior: 0,1$[Hz]$
  - Frecuencia superior: 4,8$[kHz]$
  - Frecuencia resonante: 16$[kHz]$
  - Temperatura de operación: $[-74 - 250]^oC$
  - Impacto no destructivo máximo: 2000g
  - Link a ficha técnica: Product Data Type 4370
- Cable modelo AO 0038, marca Brüel & Kjær.

Figura 4.2.: Acelerometro TYPE 4370

Osciloscopio TiePie

- Modelo HandyScope HS4.
- Tasa de muestreo máximo de 5 $\left[\frac{Ms}{s}\right]$
- Resolución 12 bits para frecuencia de muestreo de 5 $\left[\frac{Ms}{s}\right]$.
- Temperatura de operación: $[0 - 55]^oC$
- Ratio Señal/Ruido: 72 dB
- conexión a computador mediante USB
- Programa dedicado llamado *MultiChannel Measurement TiePie*
- Link a ficha técnica: Product Data TiePie HandyScope HS4

(a) Osciloscopio HS4



(b) Programa Dedicado al osciloscopio

Figura 4.3.: Osciloscopio y programa

4.1.2. Modo de medición

4.1.2.1. Configuración de la medición

Uno de los problemas de medir RTM es debido a la situación a la que operan que corresponde exclusivamente a las noches de observación. Implicando que en el día estos permanecen sin operar. Esto lleva a que en todas las mediciones se deba solicitar un telescopio impidiendo los labores diarios de inspección de los componentes del enclosure como también impidiendo hacer calibraciones en los instrumentos del telescopio. Para iniciar el movimiento del enclosure, se debe habilitar el sistema de RTM para su giro, por lo que es importante tener un plan de medición con la finalidad de tener mediciones comparables entre RTM y tener la mayor cantidad de información posible al hacer girar el domo.

Velocidad de rotación del enclosure:

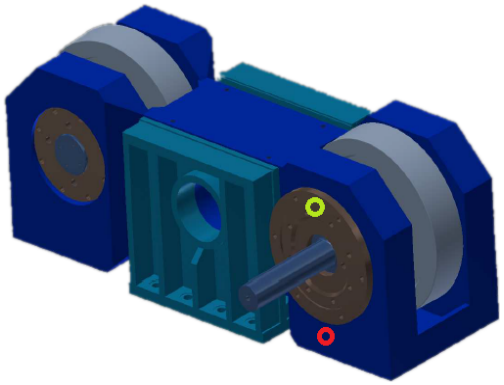
El rango de velocidades en el que puede operar el enclosure es de $[0-2][\frac{\circ}{seg}]$, dentro de este rango se toma $1[\frac{\circ}{seg}]$ por medidas de seguridad ya que es una masa de $280{,}000[kg]$ con la que se trabaja. Este valor de medición significa que un giro completo del enclosure demora seis minutos.

Frecuencia de muestreo:

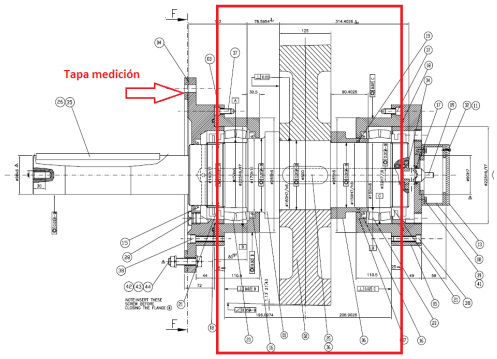
La frecuencia de muestreo debe satisfacer dos condiciones:

1. La respuesta en frecuencia (valor medición/ valor real) debe ser bajo
2. Las muestras totales de un giro de enclosure no deben llenar el buffer interno del osciloscopio

Tomando como prioridad el tamaño del buffer del osciloscopio el cual es de 2 millones de puntos (se calcula una tasa de muestreo de $5{,}5[kHz]$



(a) Lugares de medición sobre RTM, colores corresponden a color del gráfico de frecuencias



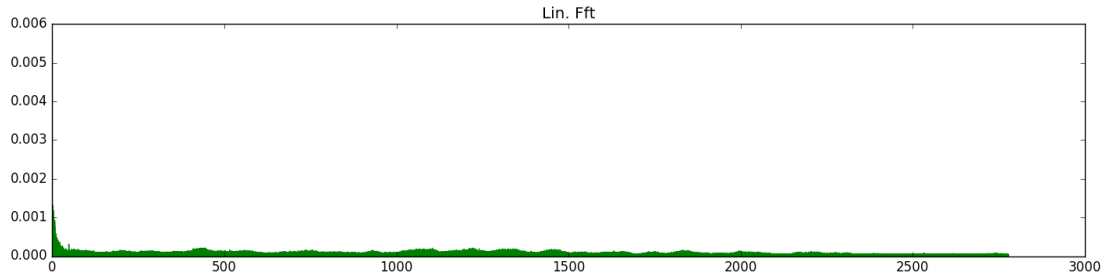
(b) Plano Conjunto Drive Wheel

Figura 4.4.: Selección de lugares para realizar medición

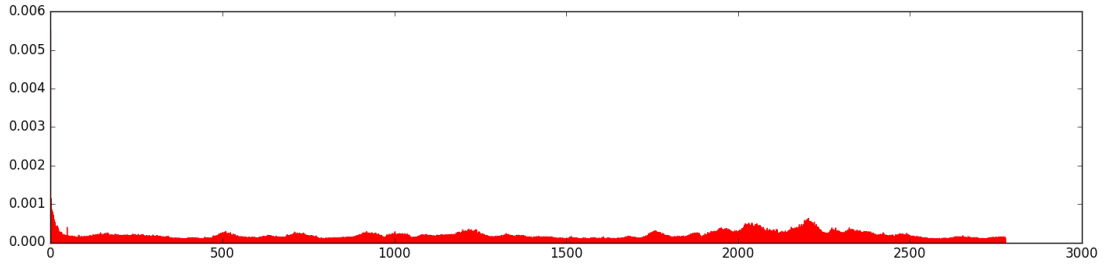
4.1.2.2. Puntos de medición

Uno de los puntos importantes al momento de realizar una buena medición es el de seleccionar lugares cercanos y rígidos donde montar los sensores, tomando como referencia a los planos 4.4b de diseño del RTM se identifica la tapa como punto de contacto directo para realizar las mediciones (Cuadrado rojo indica lugar del balancín). Haciendo una primera prueba midiendo en los puntos mostrados en la Figura 4.4a, se toman mediciones en la tapa y en el cuerpo de acero de RTM07 en UT4 [1]. Se obtienen los espectros de frecuencia mostrados en la Figura 4.5.

[1] Se hace medición sobre este RTM aprovechando el desmontaje de su motor/reductor



(a) Medición sobre tapa (Hz)



(b) Medición sobre balancín (Hz)

Figura 4.5.: Espectros obtenidos en prueba de tapa en UT4@RTM07, se observa que la tapa actúa como filtro natural eliminando las altas frecuencias

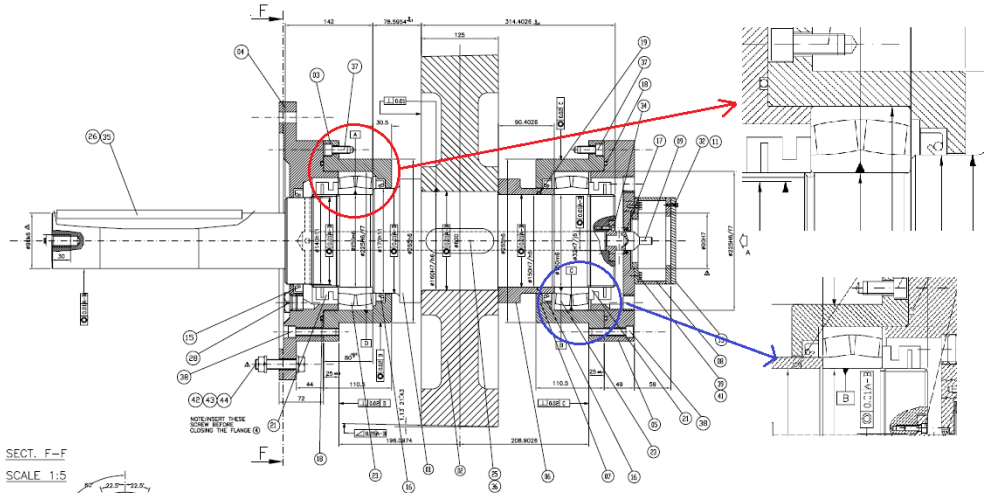


Figura 4.6.: Configuración de zona de rodamientos, rojo: rodamiento zona frontal y azul: zona posterior. Se observa que en azul no soporta cargas axiales

Una de las limitaciones al momento de medir es el espacio físico donde están emplazados los RTM: en la periferia del domo por lo que acceder a la parte posterior del

equipo resulta dificultoso. No obstante, por configuración de diseño el rodamiento alojado en el lado interior (al cual no se puede acceder) queda con holgura permitiéndole un desplazamiento axial por lo que este rodamiento no recibe cargas en esa dirección (figura 4.6). Eso hace que los rodamientos del lado interior sean menos crítico que los rodamientos dispuestos en la parte frontal, los cuales si tienen impedimento de desplazamiento. Con esto en cuenta se toma el registro de las mediciones como se muestra en la Figura 4.7.

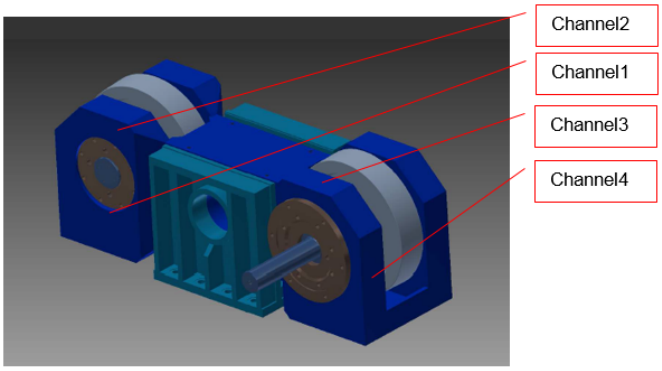


Figura 4.7.: Lugar final donde se realizan mediciones en todos los RTM

Resumiendo:

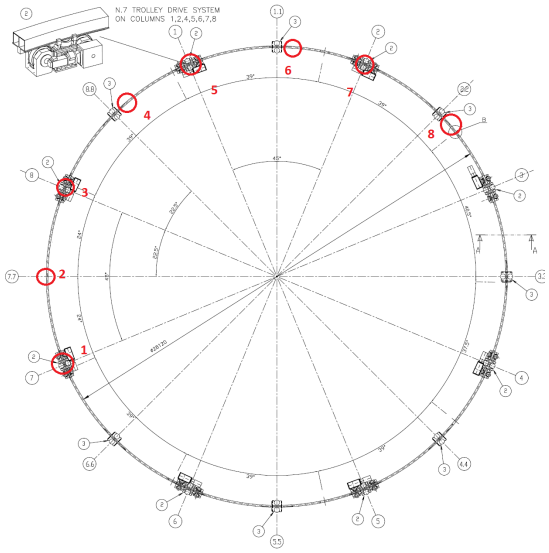
Tabla 4.1.: Tabla resumen para mediciones

Item	Detalle
Frecuencia de Muestreo	5555[Hz]
Velocidad de Giro	$1\left[\frac{\circ}{seg}\right]$
Vueltas de enclosure	1 (360 [s])
Velocidad de Ruedas	8,2$[Rpm]$ (empírico)

4.2. Transmisión de las vibraciones a través del riel

Para analizar cuál es la influencia que tienen las vibraciones procedentes de otros lugares ajenos al equipo, se miden vibraciones que se propagan a través del riel del enclosure (elemento común entre todos los Rotation Transmission Mechanism) se instalaron sensores de acuerdo al procedimiento normal de toma de datos (Figura 4.7) y mediante un martillo se golpeó de manera suave sobre la parte superior al riel (Figura 4.8a) desde una distancia fija tratando de impactar de manera similar en todas las zonas. Los puntos que se impactan se muestran en la figura 4.8b

(a) Zona en la cual se impacta la estructura del riel para ver si existe propagación de vibraciones notorias



(b) Puntos que se impactan alrededor de Enclosure

Figura 4.8.: Kurtogramas y demodulaciones para todos los RTM

Los resultados (Serie de tiempo) mostrados en la figura 4.9 corresponden al sensor Channel 1 el que está dispuesto de manera vertical a los impactos. Se observa que todos los golpes realizados, independiente de la distancia al sensor, se reflejan en la serie de tiempo en forma de impactos. Se infiere por lo tanto que el domo logra transmitir vibraciones de fuentes externas al equipo que se mide (pues el enclosure es un elemento común para los ocho RTM) . Esto crea la necesidad de requerir algoritmos para tratar la señal a favor de mitigar estas fenómeno no deseado.

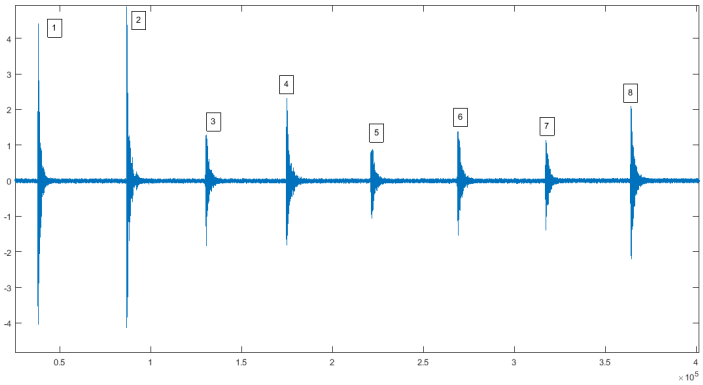


Figura 4.9.: Serie de tiempo (medida en segundos) de medición de impactos alrededor del riel

4.3. Influencia del estado del riel sobre las mediciones

La siguiente prueba tiene la finalidad de ver como la configuración y estado del riel afectan las mediciones. Al igual que el efecto explicado con anterioridad (respuesta impulsiva y tansiente en el tiempo) producido en rodamientos es el que se espera en una configuración rueda-riel con imperfecciones. Debido a la alta carga con la que se trabaja, cualquier picadura o imperfección en la pista o rueda, generará una señal de impacto en la señal. Es por esto que se toma una medición de prueba para ver cómo responde el sistema al tener un giro del domo.

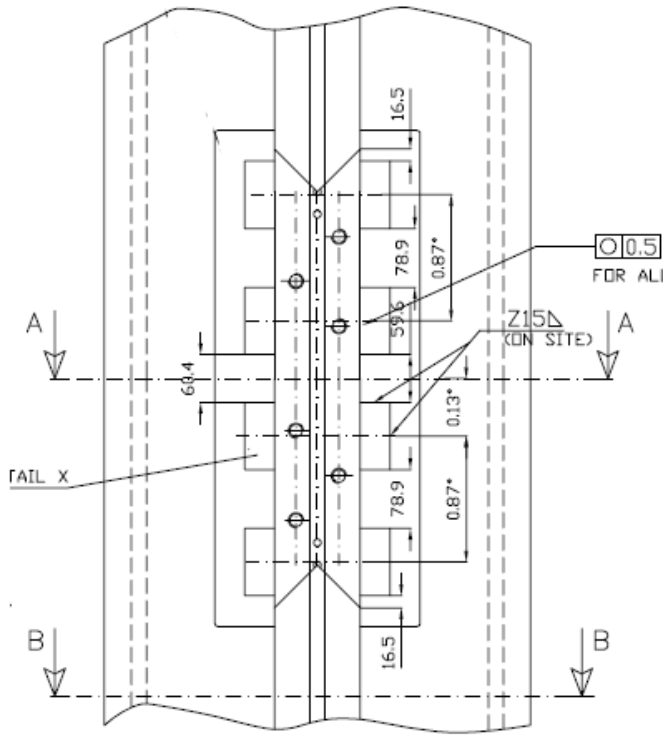


Figura 4.10.: Detalle de una unión de riel

La estructura del domo, como se ve en la figura 2.2, posee un riel curvado de $28{,}12[m]$ de diámetro, el cual posee nueve uniones de segmentos, las que van apernadas a una viga ubicada en la estructura del enclosure como se muestra en la figura 4.10. Estas uniones van entre secciones largas de riel curvado y poseen dos uniones en forma de V

Esta prueba se realizó en RTM08 de UT2 debido a la posibilidad de un mejor monitoreo de sus condiciones ya que al momento de la medición se encontraba con el motor/reductor desacoplado. Se toman los datos para una vuelta y se guardan los datos en formato .csv (comma separated value) para posterior análisis.

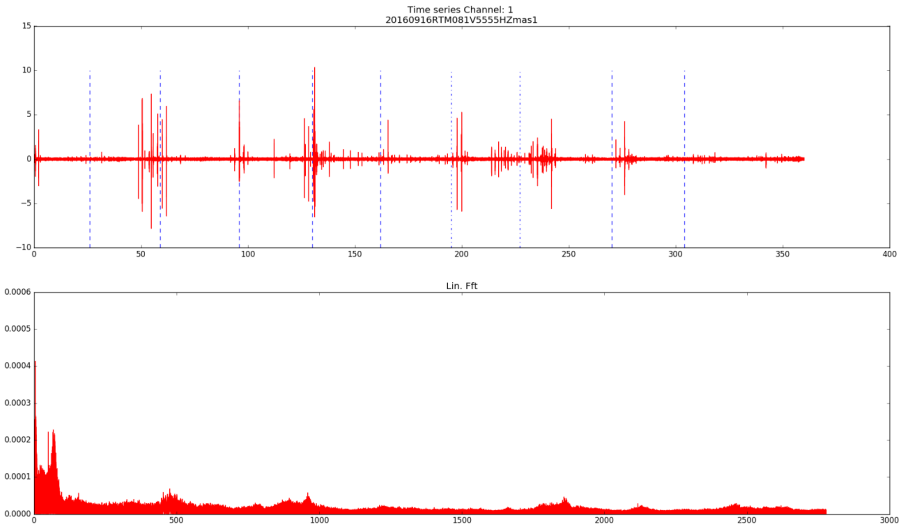


Figura 4.11.: Serie de Tiempo y FFT, análisis de impactos del riel

En la figura 4.11 se grafican los resultados. Las líneas verticales y segmentadas indican el tiempo en el cual las uniones del riel chocan con una de las ruedas del RTM. Se ve una dependencia clara con algunas zonas de altos impactos por lo que se procede a solicitar un apriete de pernos de unión para ver cómo se comporta el sistema despues de aplicar el apriete especificado por recomendación de diseño. Los resultados se muestran en la figura 4.12.

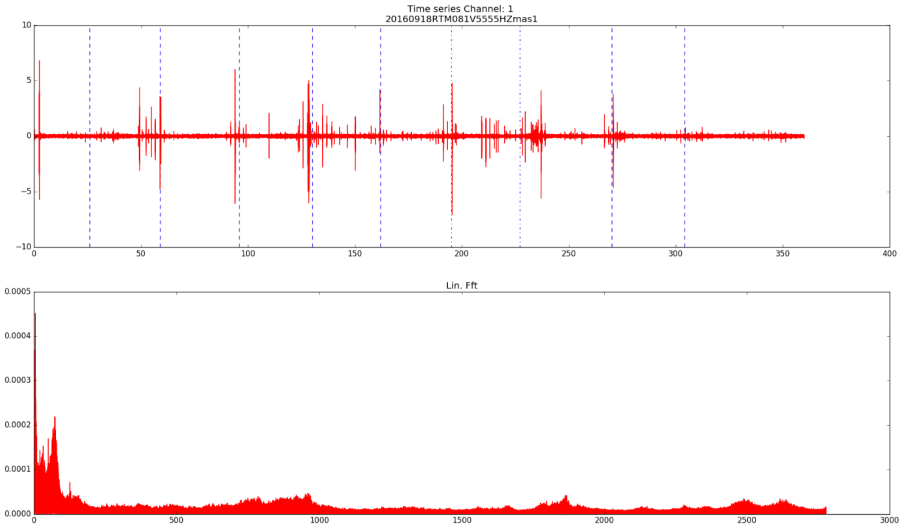


Figura 4.12.: Serie de Tiempo y FFT posterior al apriete de pernos

Se observan comportamientos similares en los saltos, sin embargo se logró disminuir la amplitud de los impactos. Para demostrar esto se obtiene la cantidad de valores de impactos superiores a los $|2{,}5|\frac{m}{s^2}$ teniendo un total de 480 post apriete y 644 antes. Este trabajo de apriete lo realizó el técnico mecánico Eduardo Atton, quien confirmó haber encontrado uniones completamente sueltas, las cuales coincidían con las uniones que presentaban mayor amplitud de aceleración (140 segundos). Se observa también que el espectro de frecuencia no cambió su forma.

Aunque la magnitud de estos impactos disminuyó, se puede ver una relación entre las imperfecciones de la pista con los impactos generados por lo que se requiere de un método el cual sea capaz de detectar estos impactos para que estos no sean considerados en el análisis en frecuencia.

5. Procesamiento y análisis de resultados

5.1. Análisis usando promedios en frecuencia

El algoritmo para el anális de la señal se usa en favor de las mediciones realizadas. Por cada medición se registra una gran cantidad de puntos (2 000 000) por lo que se puede dividir cada medición en subconjuntos logrando dos ventajas considerables: eliminar los impactos generados en una vuelta de enclosure y disminuir el ruido de la señal obtenida.

Para el análisis de resultados mediante esta técnica, se usa progración en Python junto a las bibliotecas Numpy para trabajar con series de datos, Pandas para estructurar los datos de los 4 canales de medición (tipo DataFrame) y Scipy para realizar transformada de Fourier y algoritmo Welch para el calculo de la PSD (Power Spectrum Density). La manera en la que se entregan los datos es genérico mediante Jupyter Notebooks, plataforma que permite crear informes con mezclando lineas de texto con códigos escritos en Python. (Anexo B)

5.1.1. Algoritmo

La finalidad del algoritmo es:

1. Eliminar los impactos que se generan en una vuelta del enclosure para el cálculo de la PSD
2. Hacer promedios en espectro de frecuencia para reducir el ruido y señales aleatorias, obteniendo peaks mas definidos en la PSD

Esto se logra al seguir los siguientes pasos:

- Capturar datos, salvar en un .csv
- Abrir archivo a analizar y estructurar datos en pandas.
- Hacer un recorrido dato por dato, verificando que el dato no supere un valor definido (mayor a $1{,}5[\frac{m}{s^2}]$).
- Si el valor es mayor, se termina el largo de un arreglo y luego se suma un Δt de tiempo del largo del impacto (calculado por medición).
- Se continúa buscando arreglos hasta que se terminan puntos medidos.

Tabla 5.1.: Valores de la señal simulada

Ruido tipo Gaussiano	$\mu = 0$	$\sigma = 30$	-	-
Frecuencia de muestreo	5555	-	-	-
Tiempo de adquisición	30 [s]	-	-	-
Frecuencias Puras	100 [Hz]	500[Hz]	1000 [Hz]	1500 [Hz]

- De los N arreglos, seleccionar aquellos que sean mayor a 40000 muestras para tener una buena resolución en frecuencias. En caso de poder dividirse en 2 o más arreglos, se separan dejando solo arreglos de cuarenta mil datos (a mayor tiempo de adquisición, mejor la resolución en frecuencia).
- Aplicar PSD en todos los arreglos y se promediar
- Gráficar el resultado final
- Generar documento estándar para toda medición con Jupyter Notebook (Documento con código visible).

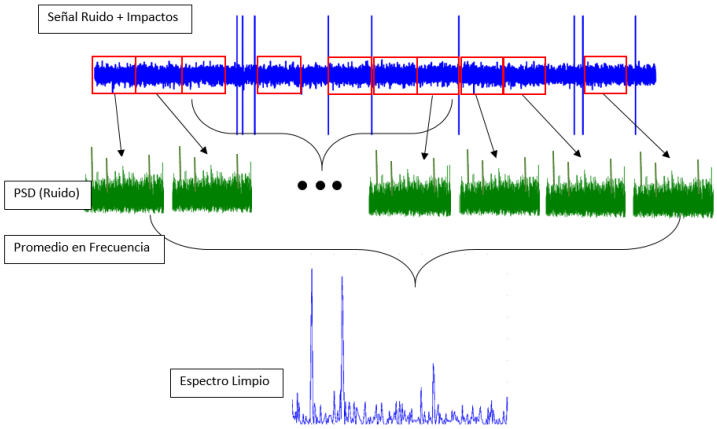


Figura 5.1.: Esquema de algoritmo

En la figura 5.1 se representa de manera gráfica lo realizado por el algoritmo. El cuadro rojo representa la ventana con un Δ de puntos de 40.000 muestras.

5.1.2. Validación del modelo

Para validar el algoritmo se simula una señal periódica a la cual se le suma ruido gaussiano y finalmente, de manera aleatoria, valores de gran magnitud simulando los impactos generados en la pista del riel. Los parámetros seleccionados para la señal generada se detallan en la tabla 5.1

Nuevamente se utiliza python, numpy y matplotlib para simular la señal, los resultados se observan en la figura 5.2:

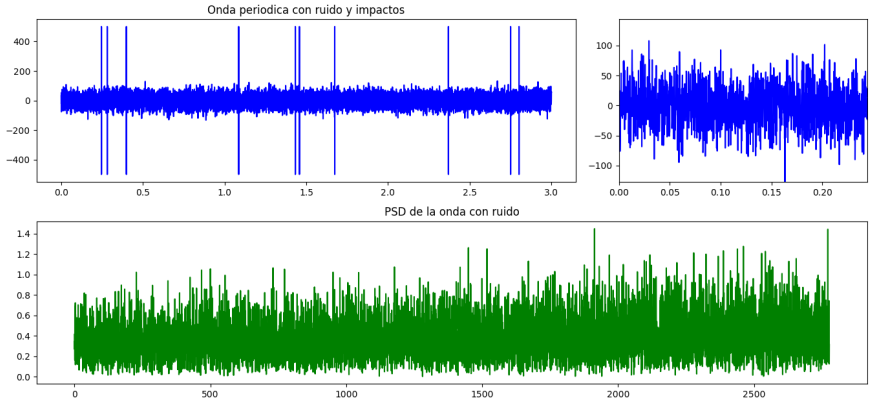


Figura 5.2.: Señal generada (Azul) y Fft de la señal (Verde)

Como se observa en la gráfica verde (FFT), no existen componentes notorias para las frecuencias especificadas en 5.1, una vez aplicado el algoritmo se gráfica la transformada real de Fourier, obteniendo como resultado la Figura 5.3:

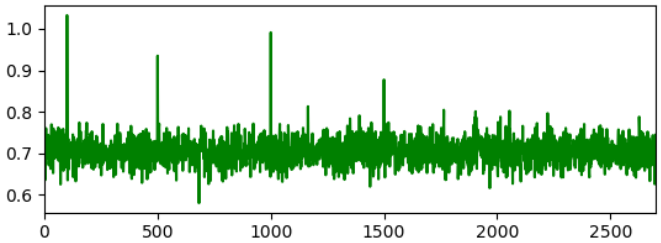
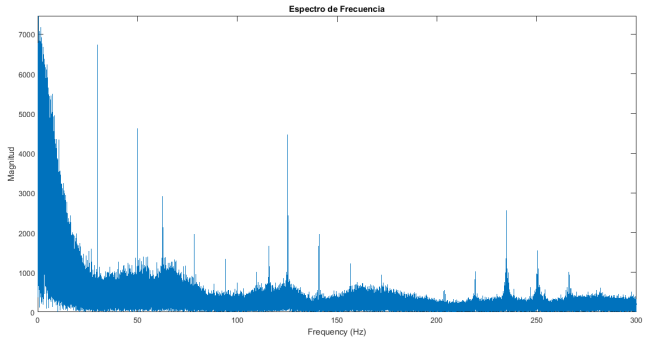


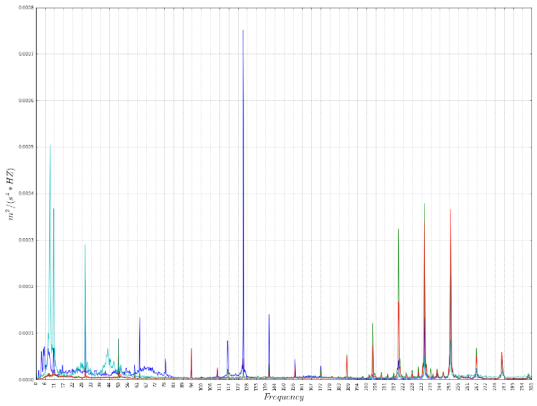
Figura 5.3.: FFT luego de aplicar algoritmo

Se aplican 10 señales y por lo tanto diez promedios. Se observa de manera clara una disminución entre el ruido y la onda periódica, manteniéndose los peaks en las frecuencias correspondientes, notando claramente de que ondas se compone la señal (además del ruido). Por lo tanto, se verifica que el algoritmo disminuye el ruido (señales aleatorias) haciendo más claros las ondas periódicas.

Al aplicar el algoritmo sobre las mediciones de vibración tomadas en el telescopio, se logra de manera efectiva disminuir el ruido de la señal logrando diferenciar las componentes de manera más clara, inclusive se logran observar peaks que de manera directa no logran captarse. Como se puede ver en la figura 5.4 en la señal ya filtrada por el algoritmo se logran identificar componentes ocultas en la señal bruta. Por ejemplo en el rango de $200-300[Hz]$ se pueden apreciar a partir de la figura 5.4b componentes de frecuencia de muy baja amplitud haciendo al proceso de promedio en frecuencia una buena herramienta de análisis de señal para las mediciones sobre los RTM.



(a) Fourier directo de señal tomada en RTM08. rango $(0 - 300)[Hz]$



(b) Fourier de señal tras pasar por algoritmo, mismo rango que a)

Figura 5.4.: Comparación para señal registrada en RTM08

5.1.3. Análisis de Resultados

Los resultados se entregan de manera semi automática a través de un reporte en base Jupyter notebook el cual genera un archivo .pdf con las gráficas de cada medición, estas se adjuntan en CD. A continuación se muestran los espectros de mayor interés.

RTM04@UT1

Esta medición es importante debido a que en el último coating (aluminizado del espejo principal, Agosto 2016), este RTM fue remplazado en su totalidad en base a mediciones de desplazamiento del eje de rueda su rueda motriz siendo este el que contaba con mayor desplazamiento absoluto. Esto permite la posibilidad de medir antes y después del cambio el mismo equipo (posición en el UT). La medición del RTM nuevo puede ser usado como referencia de un mecanismo en condición de nuevo y puede ser comparable con los demás RTM. Además, debido a la condición de nuevo en el cual se encontró el equipo que se sacó, este también sirve como referencia de un equipo en buena condición. Cabe mencionar que el equipo que se retiró en base al desplazamiento absoluto no presentó fallas en sus componentes de ningún tipo.

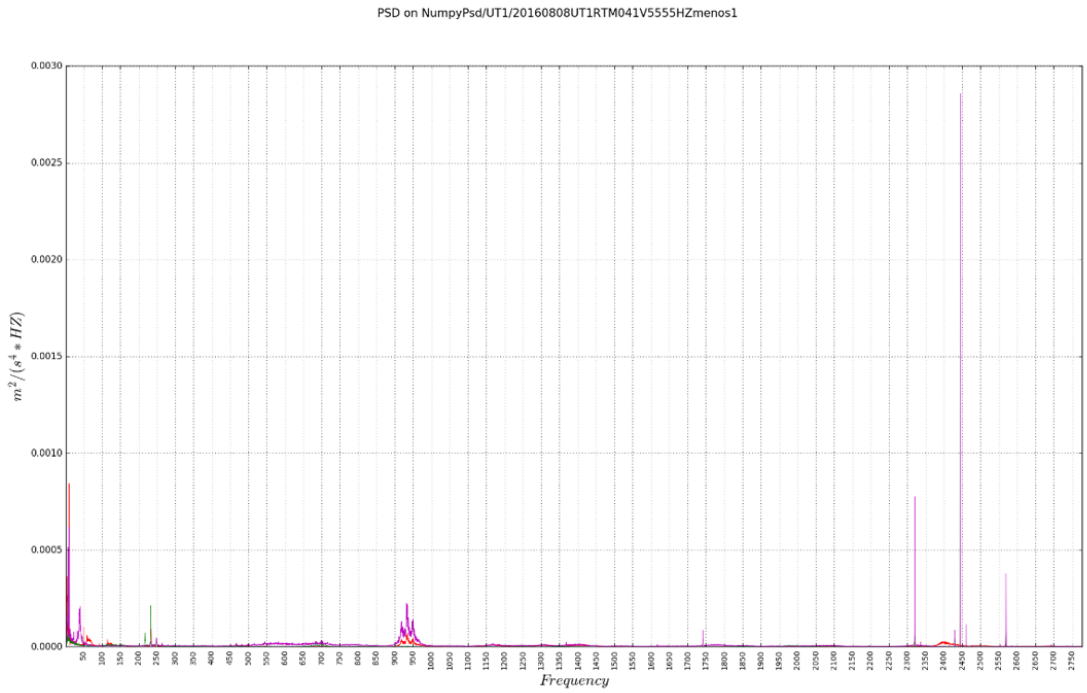


Figura 5.5.: PSD on old RTM04@UT1

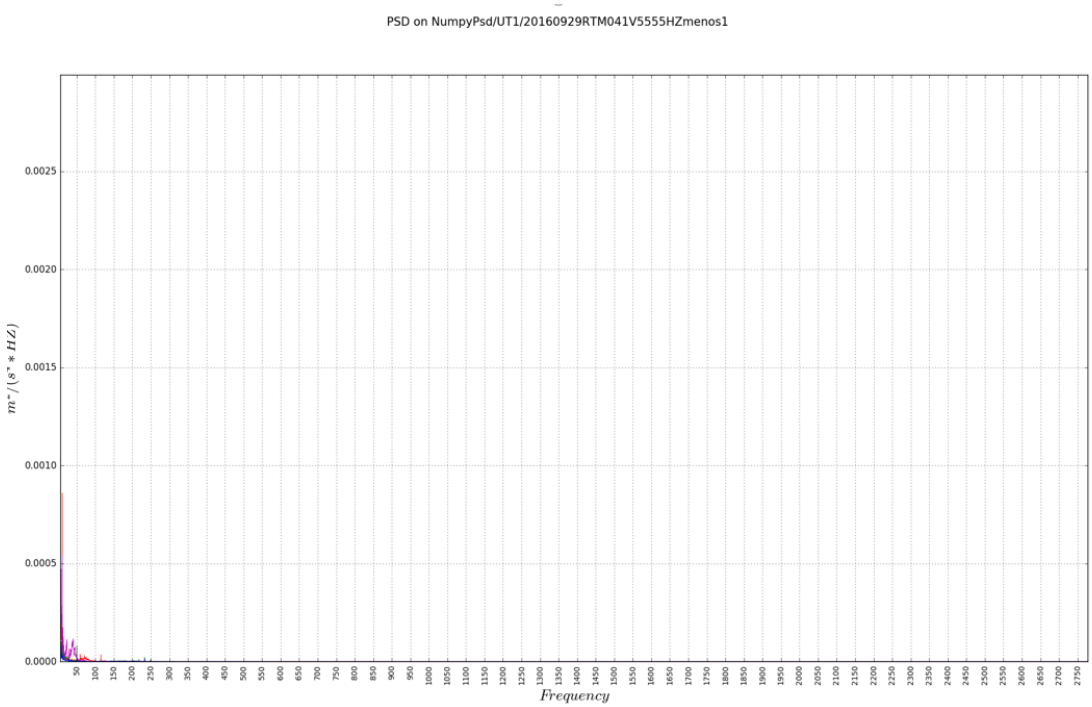


Figura 5.6.: PSD on new RTM04@UT1

Una consideración al momento de la medición es la presencia del motor/reductor acoplado al mecanismo, en la figura izquierda 5.5 son visibles picos bien definidos en el rango de la media-alta frecuencia, una vez que el motor/reductor son retirados, estos picos desaparecen como se muestra en la figura derecha 5.7

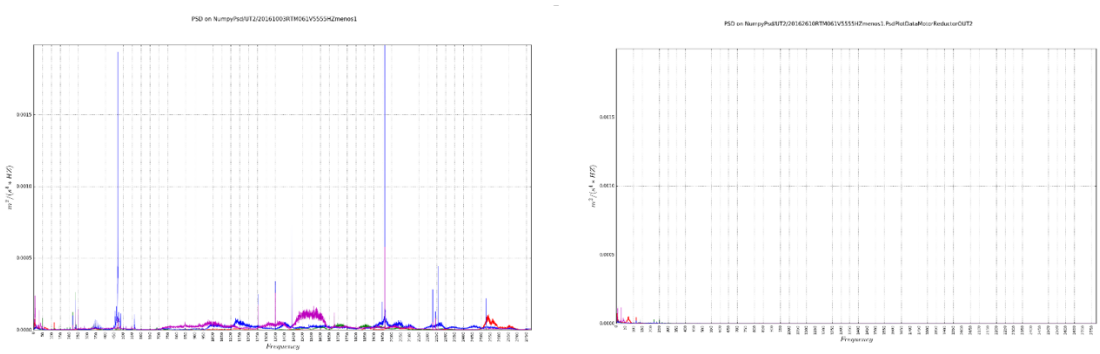


Figura 5.7.: PSD on RTM02@UT2: (*Izq.* Con Motor/Reductor y *Dcha.* Sin Motor/Reductor (Misma escala)

RTM06@UT2

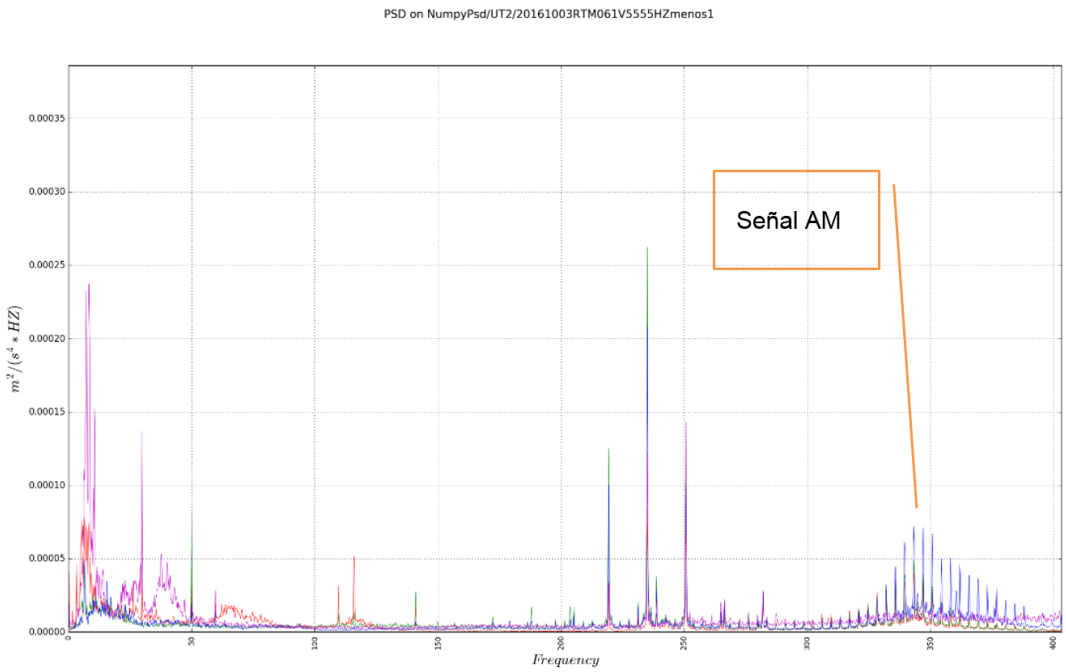


Figura 5.8.: Baja Frecuencia en RTM06@UT2, aparece señal modulada

Este mecanismo, muestra un comportamiento claro de señal modulada (figura 5.8) centrada entre $[343-347][Hz]$, con un ancho de banda de $3{,}6[Hz]$. Este ancho de banda hace suponer que se encontraba ante una posible falla en el rodamiento, pues el Δ de frecuencia corresponde a un $2xBPFO$, sin embargo esta modulación puede corresponder a una vibración transmitida por el reductor. No obstante, no se conoce la especificación del reductor por lo que no se puede calcular su factor de engranaje imposibilitando poder definir con certeza si esta señal corresponde al reductor o al rodamiento. Para discernir entre ambas, se solicita retirar el componente motor/reductor y se vuelve a medir sobre RTM06 en UT2, los resultados se muestran en la figura 5.9

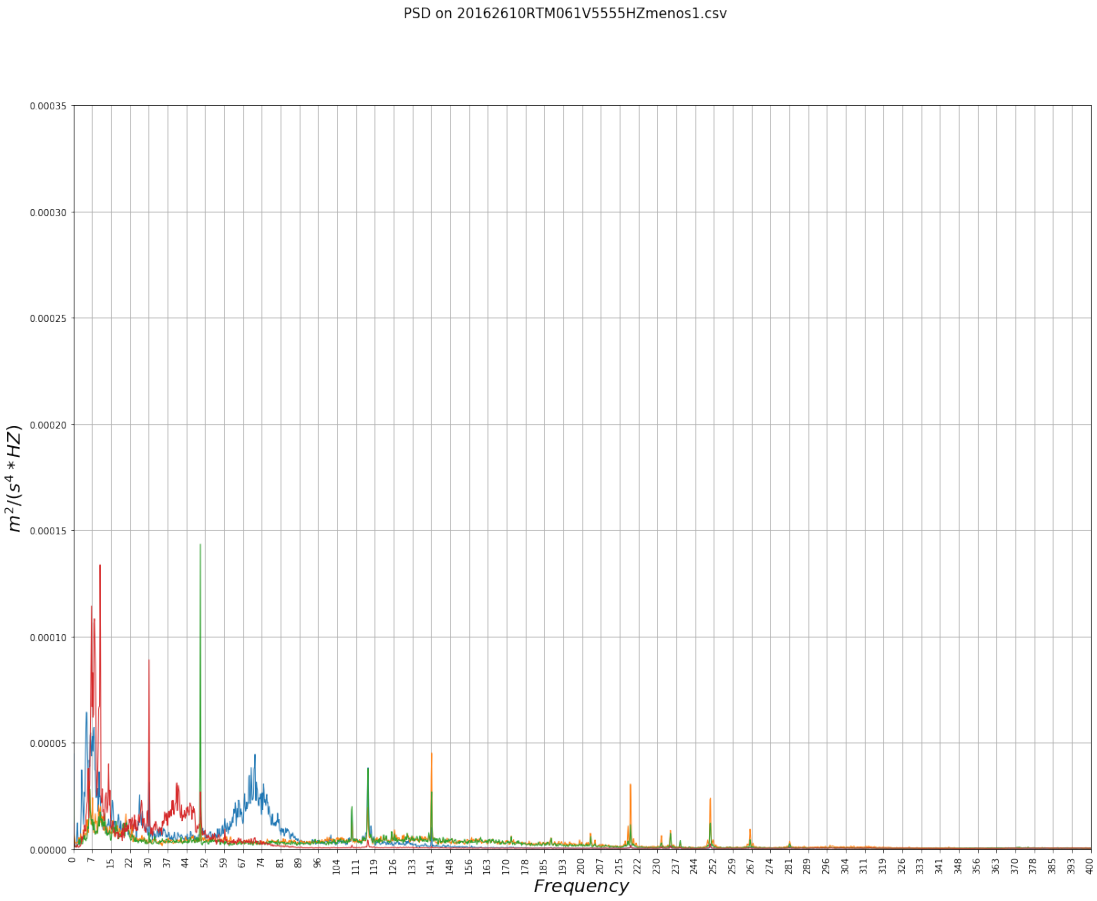


Figura 5.9.: Medición RTM06@UT2 sin Reductor

Se observa que en el espectro nuevo, no aparece la señal modulada por lo que se infiere que la falla corresponde a un problema en la caja reductora del equipo. Si este fuese el caso, por el tipo de modulación presente, se consideran los siguientes tipos de falla:

1. Excentricidad en una rueda de engranaje
2. Rueda de engranaje con eje flectado

De ser este el caso, la frecuencia de engranaje y el número de dientes del par eje y rueda dentada son:

- $f_e = 349{,}5[Hz]$
- $n^o dedientes : 97$

RTM02@UT4

Este RTM Muestra un comportamiento inestable en la serie de tiempo en la vuelta de Enclosure, presenta una gran cantidad de impactos presentándose estos de manera aleatoria (Figura 5.10 y Figura 5.11). Además a partir de datos obtenidos por el algoritmo se tiene el total de impactos encontrados por medición para cada RTM, resultados expuestos en tabla 5.2 donde se observa una gran diferencia en la cantidad de impactos encontrados en este RTM.

Tabla 5.2.: Número de impactos detectados por algoritmo en cada RTM

RTM	Impactos
1	47
2	373
3	11
4	90
5	13
6	28
7	31
8	13

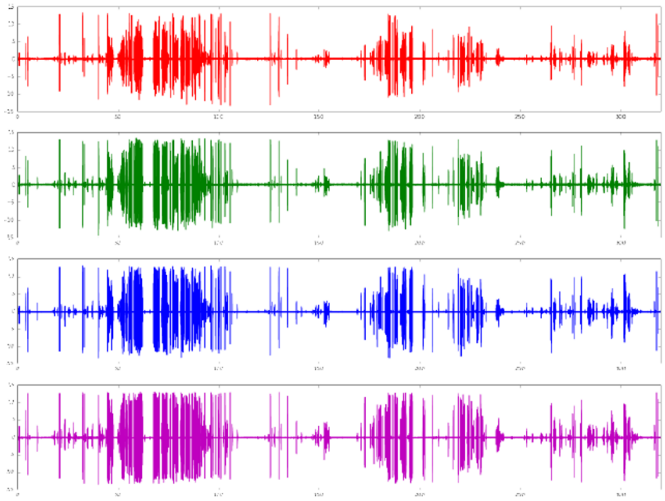


Figura 5.10.: Serie tiempo RTM02@UT2. 360 segunos de muestreo

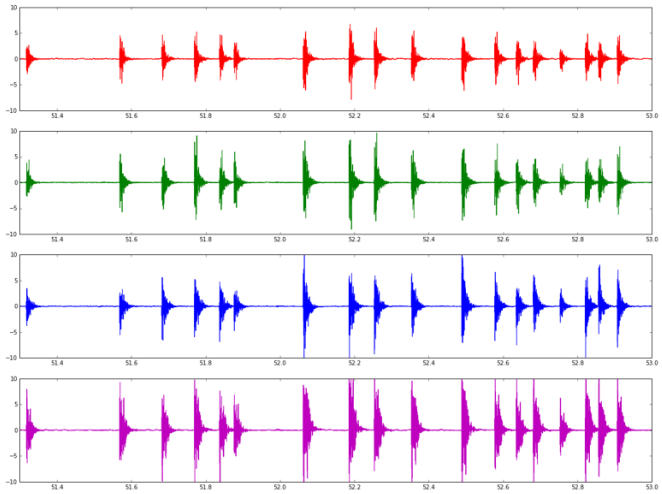


Figura 5.11.: Serie tiempo RTM02@UT2, 1 segundo de muestreo

Este tipo de grafico indica que posiblemente este comportamiento se deba a una soltura en los pernos de la base de la estructura, los cuales permiten al sistema, en caso de encontrarse con irregularidades en la pista, responder de manera impulsiva al impacto que se produce por la imperfección. Se solicita al personal de mt-mecatronica (empresa contratista) que inspeccione los pernos base del RTM02 que mantienen fijo el equipo a la estructura base. Una vez inspeccionado el equipo se corrobora la presencia de pernos completamente sueltos, una vez corregido el problema se vuelve a medir.

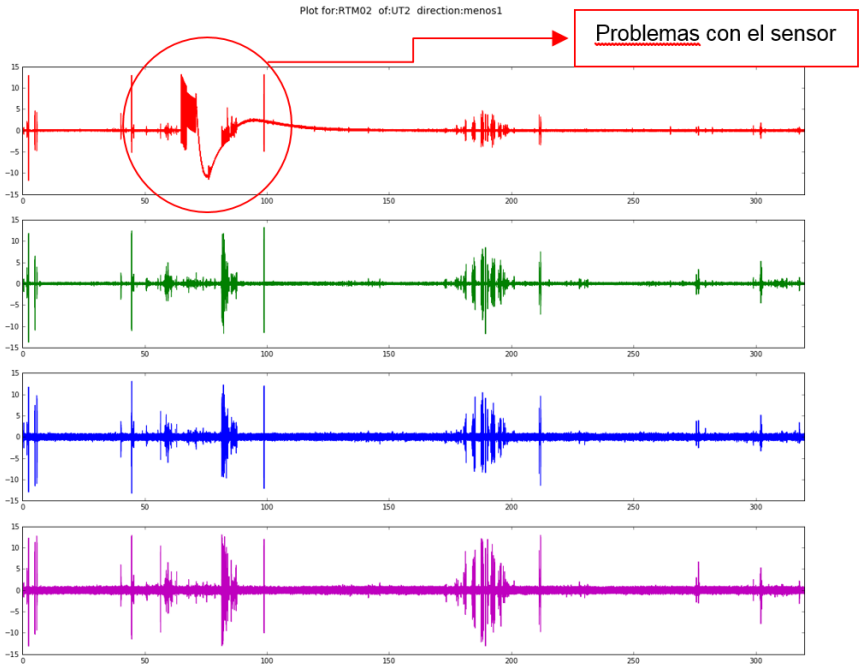


Figura 5.12.: Serie de tiempo RTM@UT2, post apriete pernos base

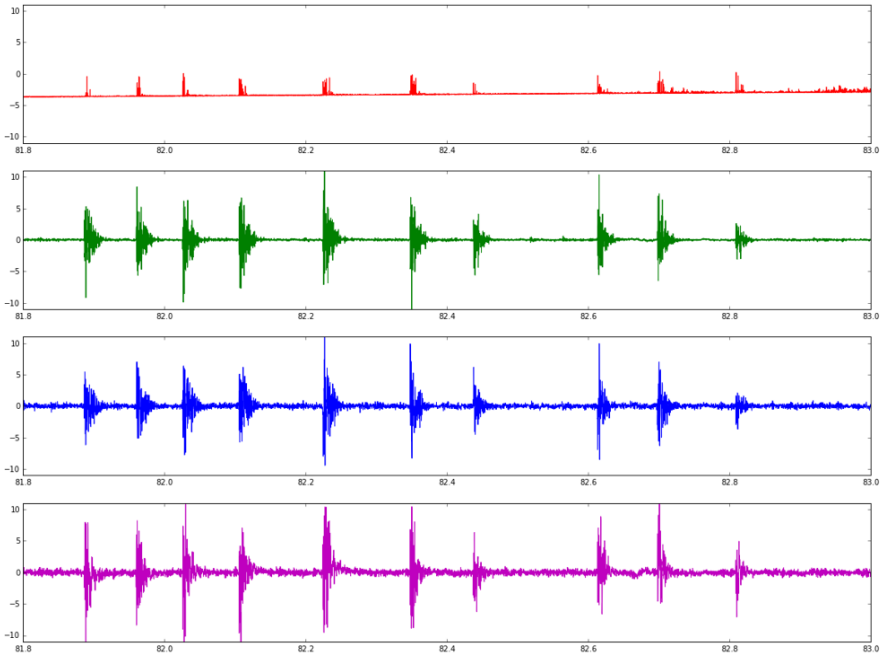


Figura 5.13.: Serie de tiempo RTM@UT2, post apriete pernos base, 1 segundo de medición

Pese a que el apriete de los pernos muestra una mejora en una vuelta del Enclosure (Figura 5.12), RTM02 sigue con un comportamiento irregular, teniendo grandes periodos de impactos (Figura 5.13). Sin embargo, al pasar la señal por el algoritmo (eliminando los impactos) la PSD no muestra un comportamiento extraño (figura 5.14, comparándolo con RTM04@UT1 (condición de nuevo).

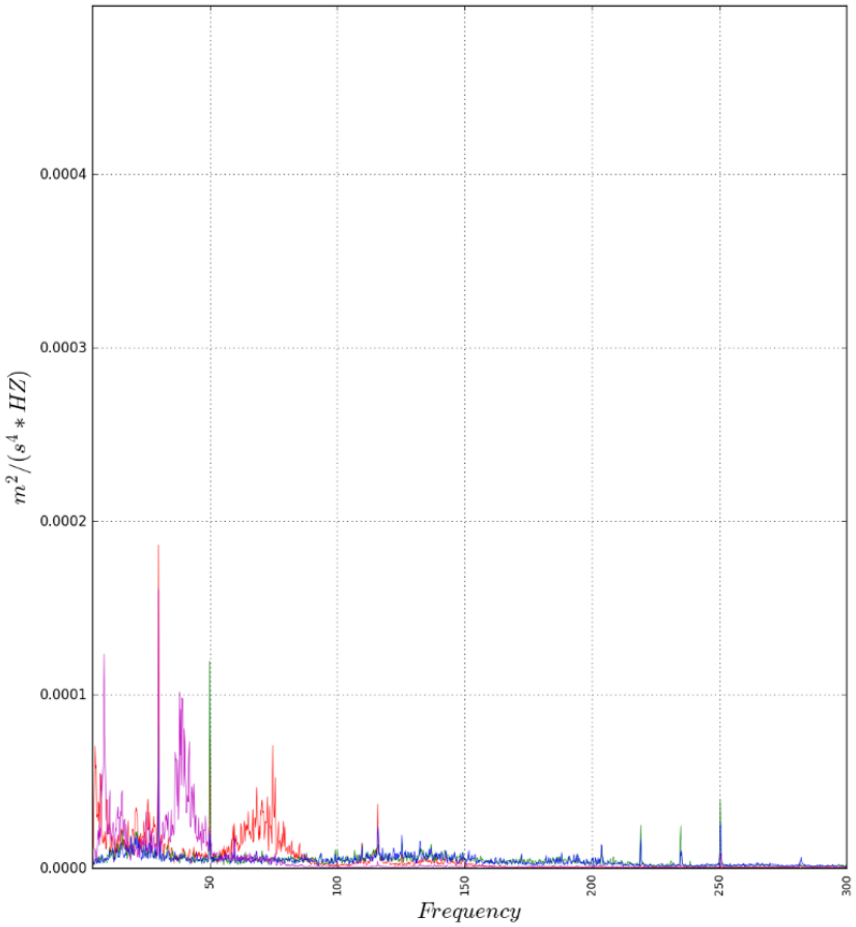


Figura 5.14.: PSD para RTM02UT2 post apriete de pernos base.

RTM08@UT2

El último RTM que presenta un comportamiento notablemente diferente al resto (Figura 5.15), donde se puede apreciar el mismo patrón de modulación en amplitud que en RTM06, teniendo indicios de falla en la caja reductora. Por la dificultad de acceso no fue posible extraer el reductor del equipo. Junto con esta modulación aparece también una frecuencia centrada de 125[Hz] con bandas laterales de 15.5[Hz], considerando el factor de reducción de 113.2 del reductor, la velocidad de giro a la entrada de este corresponde a 15.5 [Hz] lo que indicaría que esta frecuencia también corresponde a una falla o mal comportamiento en la caja reductora de este sistema.

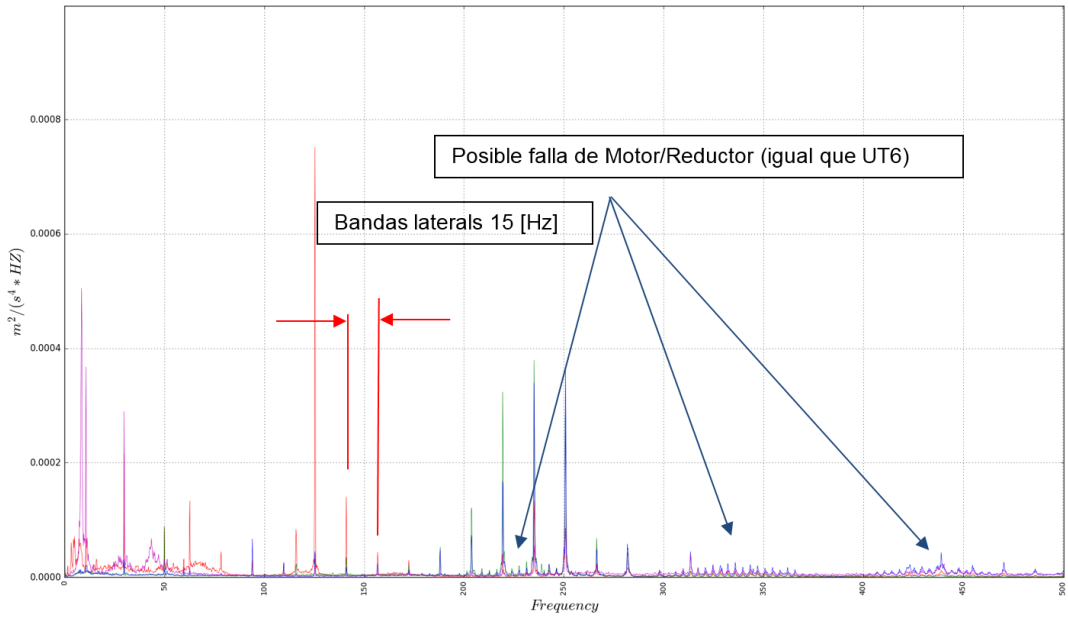


Figura 5.15.: RTM08@UT2 PSD

Basado en el análisis realizado, RTM02; RTM06 y RTM08 son candidatos para el cambio de Rotation Transmission Mechanism para el coating a efectuarse en Diciembre. Cada uno presenta diferentes comportamientos los cuales es interesante retroalimentar analizando en qué estado se encuentran sus partes. Entre los tres, es el RTM08 el que presenta mayor número de componentes a estudiar en base a su PSD, no obstante es particular también el comportamiento de RTM02 debido a su gran cantidad de impactos aleatorios en la señal. Es importante, a futuro, conocer la configuración de la caja reductora para discernir con mayor objetividad comportamientos inusuales en la caja reductora.

5.2. Análisis usando Kurtogramas

Para el análisis de las señales medidas, se usa el algoritmo presentado por J. Antoni (Antoni, 2006) junto con el código de MATLAB® (Link a Mathworks).

5.2.1. Validación del modelo

Para validar el modelo se simulan dos tipos de señales del tipo transiente diferentes para comprobar si el modelo es válido para diferentes tipos de mediciones. La primera de ellas mediante una señal característica de impacto y la segunda modulando una onda sinusoide en ruido normalizado.

Modelo y validación de señal de impacto:

Para modelar la señal, se usa como base la ecuación propuesta en *"Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines"* (Ericsson y cols., 2005), la cual se modifica para trabajar con señales discretas. La ecuación para esta señal simula una falla de rodamiento del tipo tansiente y periódicas como se explicó anteriormente. La ecuación se define como:

$$y(k) = \sum_r A_r * sin\left(2\pi f * \frac{\left(k - r * s\frac{F}{f_m}\right)}{F}\right) * e^{-\beta * \frac{\left(k - r \times \frac{F}{f_m}\right)}{F}} \tag{5.1}$$

donde:

- A_r: Amplitud de los impulsos (=1.5)
- f: frecuencia resonante (=2000 [Hz])
- f_m: frecuencia de falla característica
- β: Factor de decaimiento (=500)
- F: Frecuencia de muestreo (=10 [kHz])

El total de puntos que se modelan son 20,000 lo cual, a partir de la frecuencia de muestreo (F) corresponden a dos segundos. Luego de obtener la señal se le añade ruido blanco del tipo Gaussiano con una media de 0 y una varianza de 1.5, ruido que esconde o tapa la señal impulsiva haciendo que con las técnicas tradicionales esta señal no sea captada. En la figura 5.16 se muestra la señal impulsiva, la señal de ruido y la suma de estas dos.

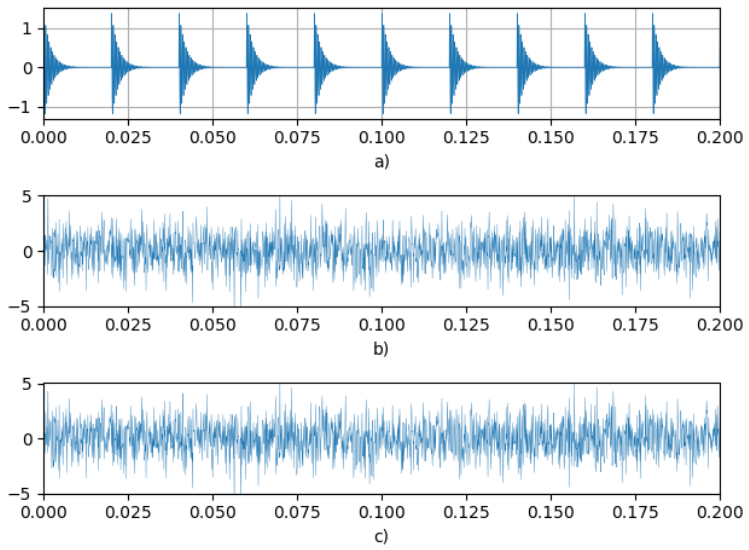


Figura 5.16.: a)Señal obtenida a partir de ecuación 5.1 b) Ruido gaussiano c) Suma de a) y b) (solo se muestra 0.2[s])

Como se ve en la figura, la señal queda completamente cubierta por el ruido, al menos para el ojo humano. Al aplicar el algoritmo de Kurtogramas con un nivel de descomposición de 7 se obtiene el mapa de colores de la figura 5.17

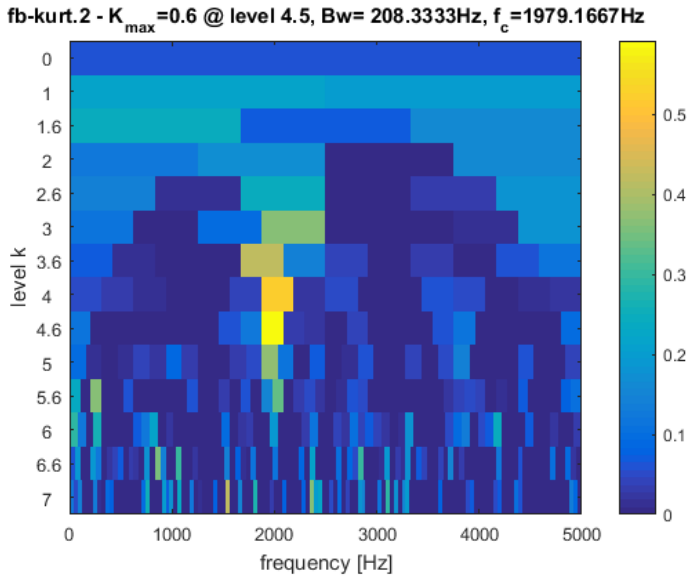


Figura 5.17.: Kurtograma de señal impulsiva con ruido Gaussiano modelada a partir de 5.1

Como se observa, el mayor valor de kurtosis se encuentra en el nivel 4.5, teniendo un δ de frecuencia de 173.6 [Hz] centrados en una frecuencia (f_c) de 1979.17[Hz].

Aplicando una deconvolución centrada en dicha frecuencia (y ese ancho) se obtiene la figura 5.18

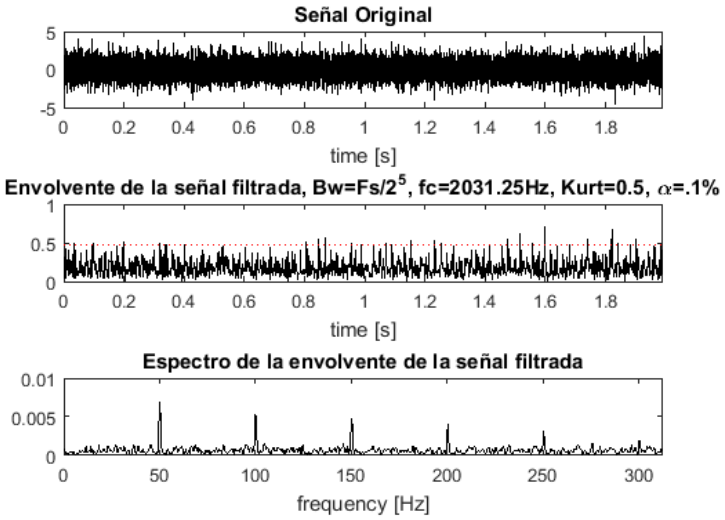


Figura 5.18.: Filtrado de la señal a partir de kurtograma

Se observa que el proceso de filtrado mediante la kurtosis extrae con éxito la frecuencia de falla característica de la señal original junto a sus armónicos. Por lo que se concluye que el método propuesto es capás de extraer la señal generada por falla de rodamiento abrumada por alto ruido.

Modelación de señal transiente a partir de modulación de ruido:

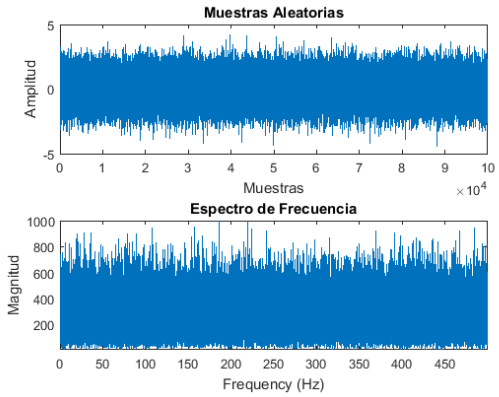
Otra manera de generar una señal transiente para el análisis de kurtogramas es mediante una modulación del ruido. Para este proceso se ocupara un procedimiento (Antoni, Xin, y Hamzaoui, 2017) el cual sigue los siguientes pasos:

1. Se genera una señal aleatoria distribuidos de manera normal ($\mu = 0$ y $\sigma = 1$) (Figura 5.19a)

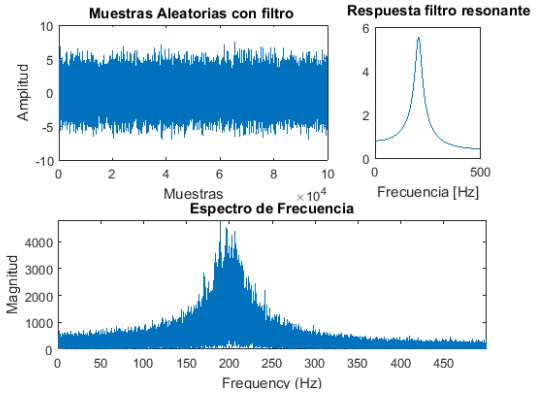
2. se filtra señal generada a partir de 1) tal que el filtro simule resonancia en la señal (Figura 5.19b)

3. La señal generada a partir de 2) se multiplica por una señal senoidal para generar modulación. (Figura 5.19c)

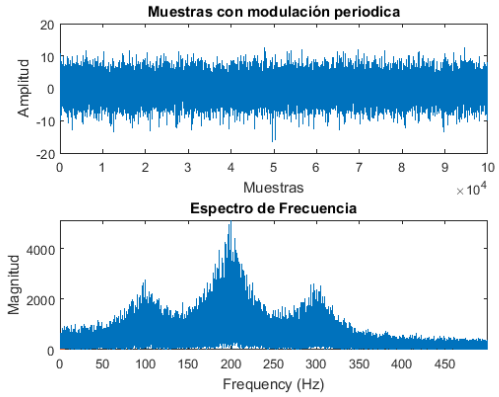
4. Finalmente se cubre esta señal con ruido aleatorio (Figura 5.19d)



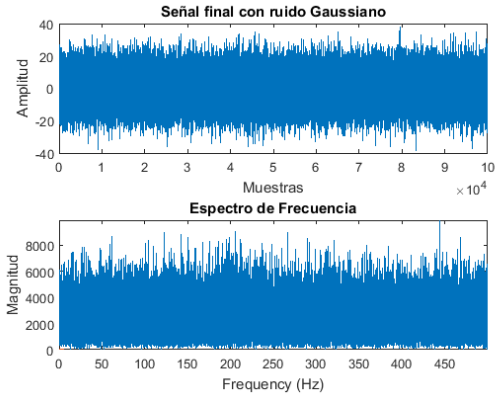
(a) Señal Ruido y su Transformada de Fourier



(b) Señal con Filtro de resonancia, Se muestra también respuesta de filtro



(c) Señal con modulación

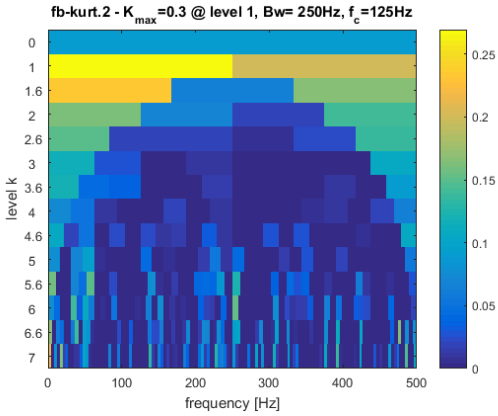


(d) Señal final ocultada en ruido

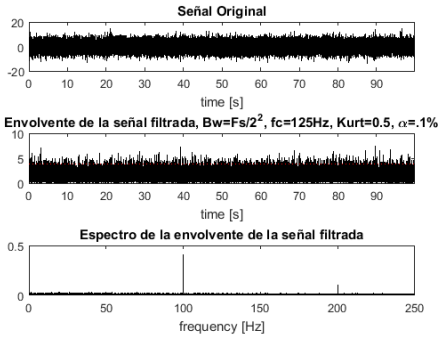
Figura 5.19.: Proceso para obtención de señal a analizar mediante kurtogramas

Una vez que se obtiene la señal cubierta por ruido se aplica el logaritmo de kurtogramas para extraer las frecuencias de interés con las cuales se moduló la señal. Los resultados se muestran en la figura 5.20. Como se observa, también se logran obtener las frecuencias de 100 [Hz] y 200[Hz] de la señal original. Se concluye que el método de kurtogramas es capáz de extraer las señales transientes (de alta kurtosis) ofuscadas por ruido generadas mediante algoritmos de programación. Se procede a utilizar el método en todos los Rotation Transmission Mechanism medidos en UT2.

5.2.2. Análisis de resultados



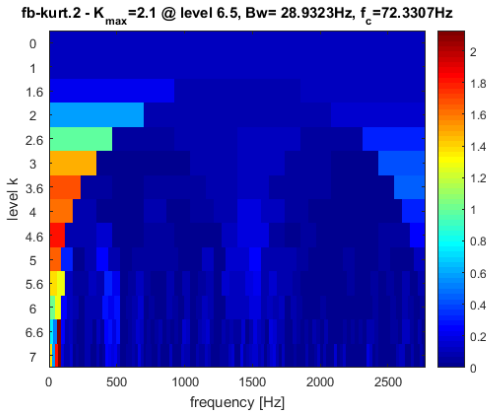
(a) Kurtograma de señal simulada 5.19d



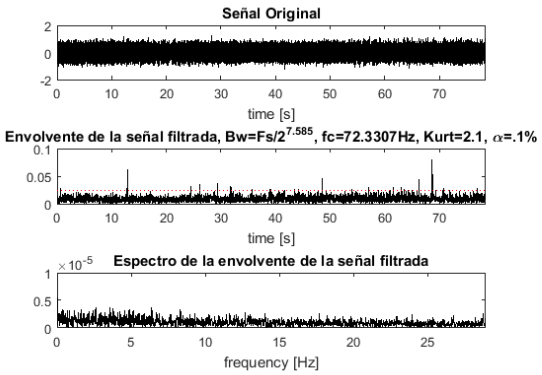
(b) Fft mediante filtro y análisis de envolvente, se aprecian las frecuencias de interés

Figura 5.20.: Análisis de Kurtogramas de señal generada

Considerando que el menor valor de frecuencia característica de falla en el rodamiento 23030 equivale al BPFI con un valor de 0.137. Para conseguir una resolución que permita observar esta frecuencia se toma como intervalo mínimo a estudiar mediante esta técnica de 40547 muestras (F_s/N).

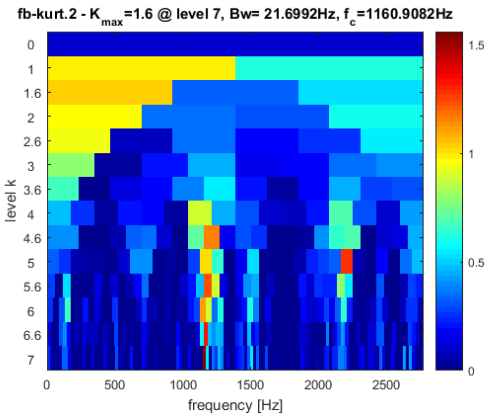


(a) Kurtograma correspondiente a RTM01

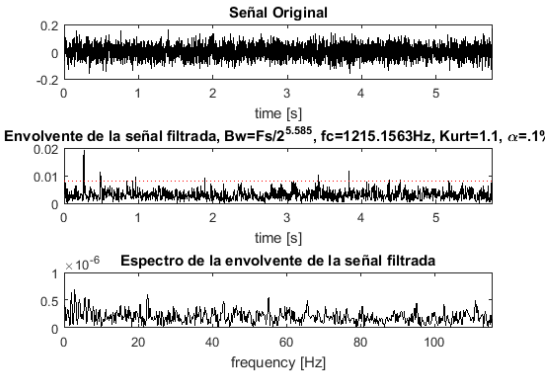


(b) Señal demodulada por kurtosis de RTM01

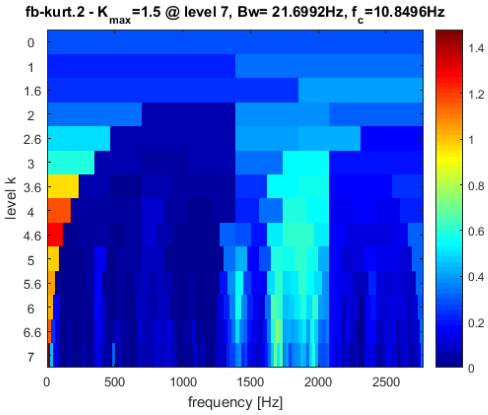
Figura 5.21.: Kurtogramas y demodulaciones para todos los RTM



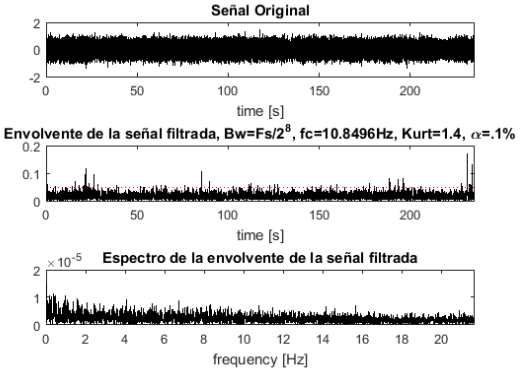
(c) Kurtograma correspondiente a RTM02



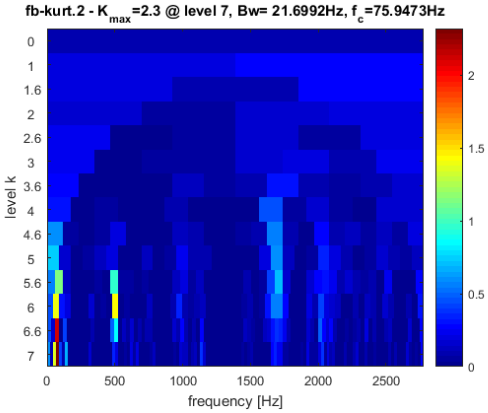
(d) Señal demodulada por kurtosis de RTM02



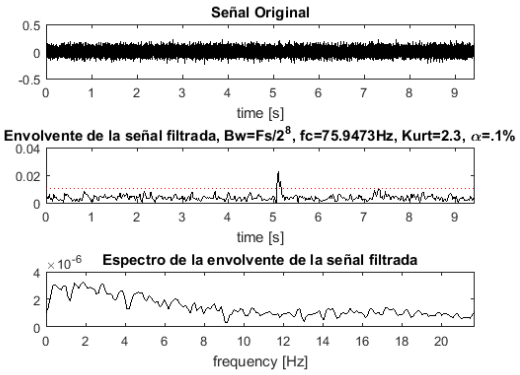
(e) Kurtograma correspondiente a RTM03



(f) Señal demodulada por kurtosis de RTM03

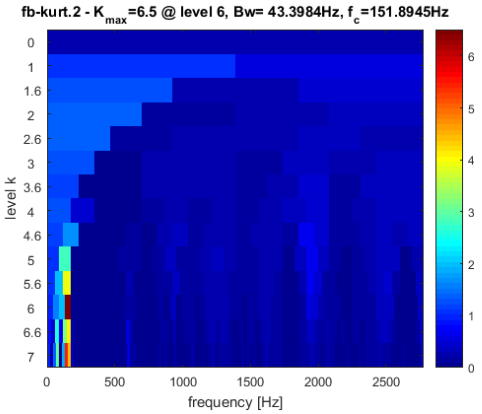


(g) Kurtograma correspondiente a RTM04

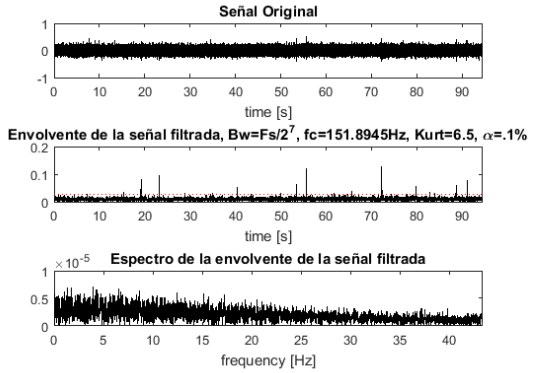


(h) Señal demodulada por kurtosis de RTM04

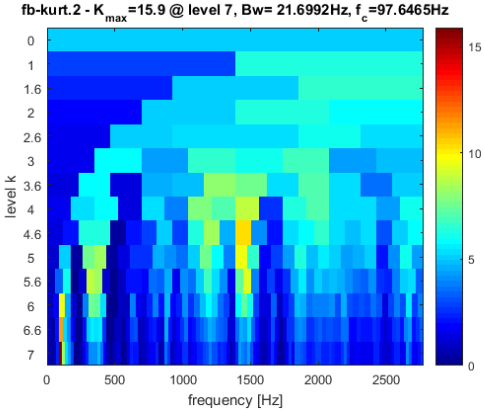
Figura 5.21.: Kurtogramas y demodulaciones para todos los RTM



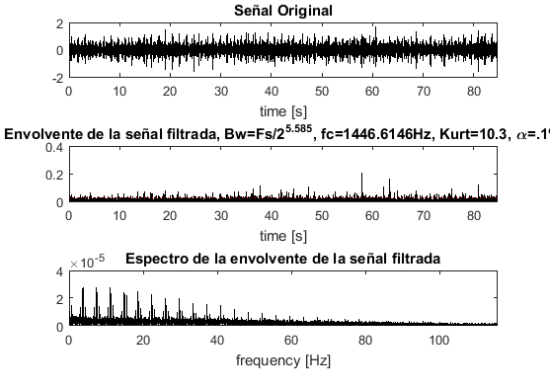
(i) Kurtograma correspondiente a RTM05



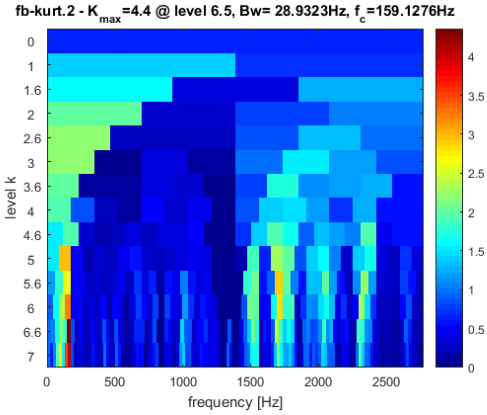
(j) Señal demodulada por kurtosis de RTM05



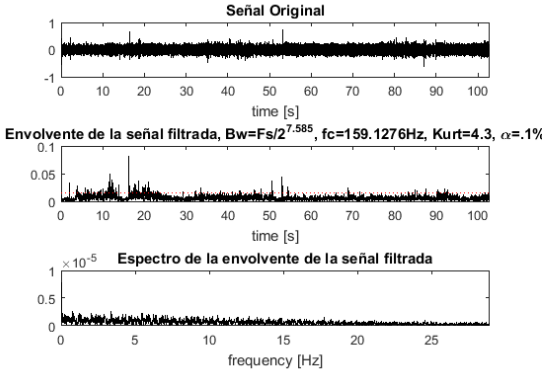
(k) Kurtograma correspondiente a RTM06



(l) Señal demodulada por kurtosis de RTM06

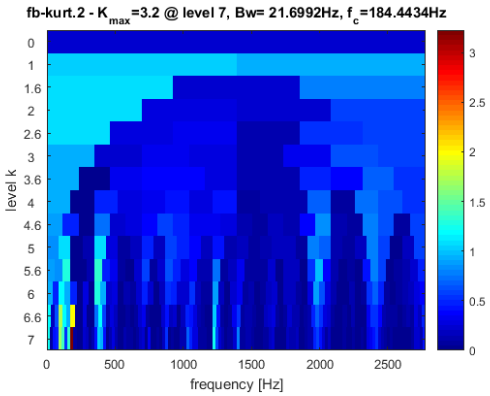


(m) Kurtograma correspondiente a RTM07

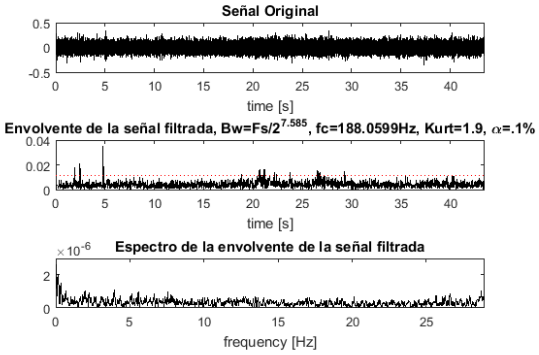


(n) Señal demodulada por kurtosis de RTM07

Figura 5.21.: Kurtogramas y filtrado para todos los RTM *(cont...)*



(ñ) Kurtograma correspondiente a RTM08



(o) Señal demodulada por kurtosis de RTM08

Figura 5.21.: Kurtogramas y filtrado para todos los RTM *(cont...)*

A partir de los filtrados finales en base a la kurtosis expuestos en las figuras 5.21, no hay espectro en frecuencia que muestre estados anormales en la condición de los rodamientos. En caso de falla era de esperar que al hacer el filtrado con el ancho de banda y frecuencia central optimizada por kurtosis aparecieran las frecuencias características de falla de rodamiento (BPFI, BPFO, FTF, etc...) y sus múltiplos. Además de esto, ninguna señal final muestra picos de frecuencia notorios, salvo RTM06 que al elegir una f_c de 1450 en el nivel 4.6 ($\Delta f = 115$), la cual no corresponde a la kurtosis máxima encontrada por el algoritmo sino que una zona donde se aprecian niveles altos de kurtosis (por lo que se realizaron dos filtrados de señal para dicho RTM: una para la máxima kurtosis y otra para la que se menciona, y que corresponde a la que se presenta). Como se observa en la figura 5.22, se observa que el resultado concuerda con lo expuesto en los resultados de la sección 5.1.3, donde vuelven a aparecer picos con una frecuencia fundamental de 3,7$[Hz]$ y sus múltiplos, de la cual ya se discutió en la sección 5.1.3.

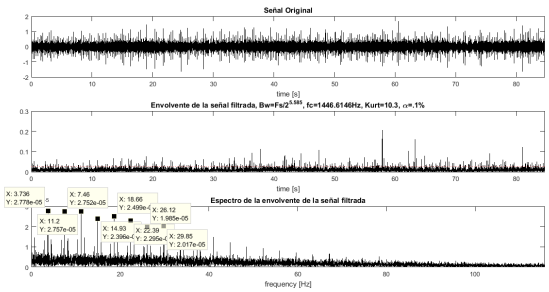


Figura 5.22.: Señal filtrada por kurtosis de RTM06

5.3. Análisis y recomendaciones en base a análisis propuesto

A partir de los dos métodos propuestos para el análisis de vibraciones se puede afirmar que no existen fallas en los rodamientos al menos etapa 2 ó etapa 3 según la descripción realizada en la sección (3.1.4). En caso de continuar con el análisis de vibraciones sobre los RTM se recomienda que al momento de remplazar un equipo, se realicen con mediciones previas al cambio para así retribuir la condición física del RTM con su respectivo espectro y kurtograma. También es recomendable hacer una medición periódica sobre RTM04@UT1 el cual el año 2016 se cambió por un equipo nuevo, que sirve de guía o patrón de un Rotation Transmission Mechanism en estado nuevo y debido a su estado permite evaluar la evolución de las vibraciones respecto al tiempo. Sobre la toma de datos dentro de los telescopios estas implican una alta inversión en tiempo debido al modo en el que opera el sistema de giro del domo. Todas las mediciones deben realizarse en el día pues no se permite la toma de mediciones mientras operan debido a que el ingreso a los telescopios se restringe. Esto implica que para medir sobre un equipo se requiere poner en funcionamiento todos los sistemas de enclosure para luego hacer girar el domo una vez por cada equipo a medir. Considerando que Paranal cuenta con cuatro telescopios y cada uno se compone de 8 RTM se hace laborioso la rutina de medición. Debido a lo mencionado es que a continuación se hacen recomendaciones de técnicas complementarias al análisis de vibraciones:

5.3.1. Análisis de Lubricantes

En un sistema donde la lubricación está contenida, cualquier sólido (metal) desprendido producto del desgaste o deterioro del material queda suspendido en el aceite del líquido lubricante. Mantener un control de este permite estimar el estado de los componentes como también prevenir que el mismo aceite con material particulado dañe los mecanismos que tiene como objetivo lubricar (aceite acarrea partículas las cuales interactúan con los equipos). Dentro de los elementos que se pueden encontrar en un análisis de lubricante son: Aluminio, Antimonio, Boro, Cromo, Cobre, Hierro, Plomo, Silicio, Plata y Estaño. Desgaste de material de los rodamientos suelen ser hierro (aleación de acero) estaño producto del material del cual se diseña la jaula contenedora de los elementos rodantes y aluminio. La figura 5.23 muestra el desarrollo de falla para un rodamiento y su correspondiente concentración de contaminantes.

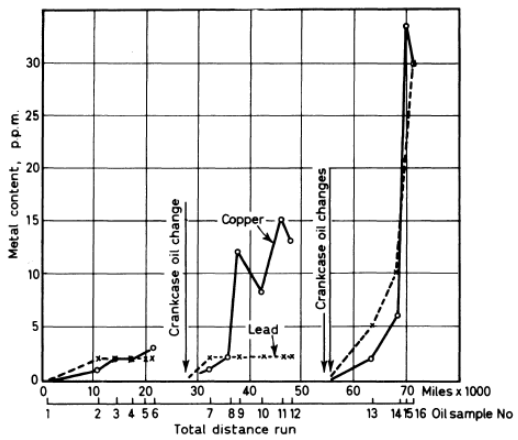


Figura 5.23.: Evolución de particulado de hierro y cobre en una falla de rodamiento. (Collacott, 2012)

Es prácticamente imposible asegurar que un aceite lubricante esté completamente libre de impurezas, donde cualquier impureza puede incluso provenir de su proceso de elaboración y envasado. Es por esto que para controlar el nivel de contaminantes en los aceites lubricantes es que se han establecido normas internacionales llamada código de limpieza el cual establece los rangos admisibles para diferentes tamaños de partículas, siendo la más usada la ISO4406:1999 la cual establece rangos para tamaño de partícula de $4[\mu m]$, $6[\mu m]$ y $14[\mu m]$, rangos que se muestran en la tabla 5.3. Así, por ejemplo, un aceite con un código de limpieza 16/15/12 acepta [320-640] partículas por cm^3 de tamaño por sobre los $4[\mu m]$, [160-320] para tamaño sobre los $6[\mu m]$ y [20-40] sobre los $14[\mu m]$.

Tabla 5.3.: Escala ISO para clasificar nivel de contaminación con partículas de un aceite

Número de partículas por $[cm]$		Numero de Escala
Más de	Inclusive de	
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9
1.3	2.5	8
0.64	1.3	7
0.32	0.64	6
0.16	0.32	5
0.08	0.16	4
0.04	0.08	3
0.02	0.04	2
0.01	0.02	1
0.005	0.01	0
0.0025	0.05	0.9

Para determinar el nivel de partículas de un aceite existen diferentes técnicas o pruebas, las cuales se hacen a partir de una muestra del aceite a evaluar, siendo las más utilizadas la de contador óptico de partículas automático y de recuento microscópico.

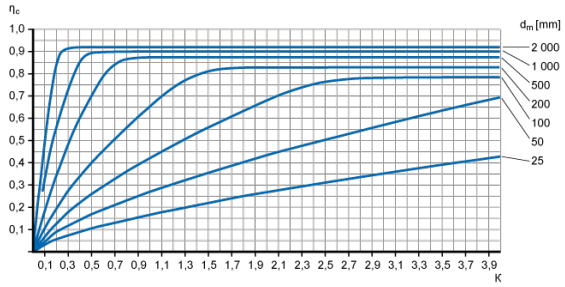


Figura 5.24.: Valores de η_c para niveles de contaminación de -/15/12

Una vez conocido el nivel de partículas, se recomienda calcular el factor η_c para el cálculo de la vida útil del rodamiento, el cual considera la influencia del contaminante del lubricante en la vida del rodamiento, valor que se determina a partir de la norma ISO 281:2007. Para determinar este factor se debe tener conocimiento de tres variables: diámetro medio del rodamiento ($d_m = 0{,}5(D+d)[mm]$)(188[mm] para SKF 23030), el código de contaminación del aceite y la viscosidad (k) de este. Conocidos estos parámetros se calcula mediante diagramas el valor de η_c. Un ejemplo de estos diagramas se muestra en la figura 5.24 para un nivel de contaminación de -/15/12. Finalmente se comparan estos valores según datos de la tabla 5.4.

Tabla 5.4.: Valores de referencia del factor η_c para diferentes niveles de contaminación

Condiciones	Factor η_c. Para rodamientos con diámetro	
	d_m¡100	$d_m > 100$
Limpieza extrema: Tamaño de las partículas del orden del espesor de la película lubricante. Condiciones de laboratorio	1	1
Gran Limpieza: Aceite lubricante con filtración muy fina. Condiciones típicas: Rodamientos sellados lubricados de por vida.	0.8 ... 0.6	0.9 ... 0.8
Limpieza Normal: Aceite lubricante con filtración fina Condiciones típicas: rodamientos con placas de protección lubricados de por vida.	0.6 ... 0.5	0.8 ... 0.6
Contaminación Ligera: Condiciones típicas: rodamientos sin sello integral, filtrado grueso, partículas de desgaste y leve ingreso de contaminantes	0.5 ... 0.3	0.6 ... 0.4
Contaminación típica: Condiciones típicas: rodamiento sin sello integral filtrado grueso, partículas de desgaste e ingreso de partículas desde el exterior	0.3 ... 0.1	0.4 ... 0.2
Contaminación severa: Condiciones típicas: altos niveles de contaminación debido a desgaste excesivo o sellos inefectivos. Disposición de los rodamientos con sellos inefectivos o dañados	0.1 ... 0	0.1 ... 0
Contaminación muy severa: Condiciones típicas: niveles de contaminación tan severas que los valores de η_c están fuera de escala, lo que reduce significativamente la vida útil del rodamiento	0	0

Es importante mencionar que el estado en el cual se encontraba en fluido lubricante en los RTM era en algunos de contaminación máxima, teniendo equipos en los cuales nunca se habia realizado un cambio en el aceite desde sus inicios de operación. En la figura 5.25 se puede apreciar el nivel de contaminación en la cual se encontró aceite en algunos RTM.

(a) Tapón magnético con contaminantes ferrosos

(b) Aceite en mal Estado

Figura 5.25.: Estado de aceite en RTM

5.3.2. Emisiones Acústicas (EA)

El fenómeno de emisiones acústicas es producido por los materiales los cuales al deformarse liberan energía elástica almacenada en su interior. Esto sucede cuando los materiales están sometidos a cierto nivel de esfuerzos, estos esfuerzos que generan cambios en la estructura interna del material produciendo cambios como grietas internas, deformaciones plásticas, corrosiones o cambios de fase. Esta energía logra propagarse por los materiales en forma de onda las que pueden ser captadas por sensores (micrófonos) para su análisis. La gran mayoría de estas ondas son del tipo ultrasónicas por lo que se encuentran en el rango entre $100[kHz] - 1[MHz]$ (muy por sobre el rango audible). Sin embargo también existen ondas del tipo EA dentro del rango audible como por ejemplo el sonido al partir en dos una hoja de papel. En definitiva y lo esencial de esta técnica es que estas ondas se generan por la deformación y en consecuencia por la liberación de energía de los materiales.

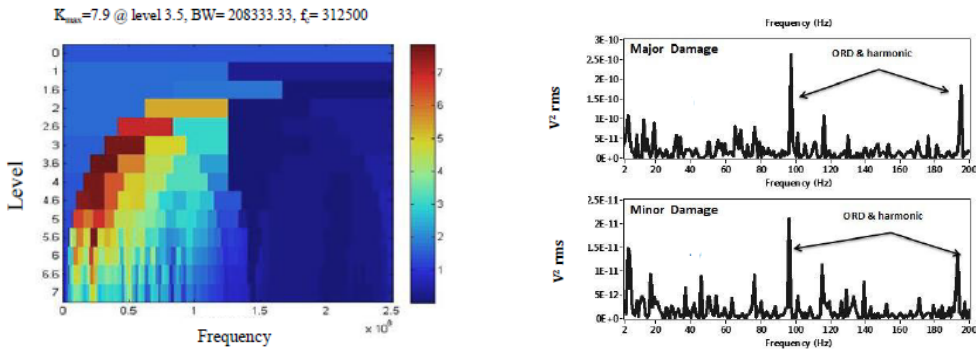
Emisiones acústicas en el mantenimiento de máquinas rotativas:

Esta técnica se originó con la finalidad de realizar ensayos no destructivos de estructuras estáticas. Sin embargo en la actualidad su aplicación se ha extendido al monitoreo de condición en equipos rotativos, donde la EA se definen como ondas elásticas y transientes producidas por el contacto entre dos o más superficies en movimiento relativo, incluyendo así impactos, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, entre otros.

El estudio y falla más común de rodamiento surge por formación de grietas la cual va avanzando y aumentando en tamaño a medida que pasa el tiempo. Las EA son capaces de detectar estas formaciones y pueden hacer un seguimiento de como la falla va aumentando y propagando. Como las fallas de elementos cercanos a los rodamientos suele estar bajo los 50[kHz] la falla en el espectro vibratorio de los rodamientos suele estar oculto debido a estas fuentes. Como las EA trabajan en otro rango de valor mucho más alto que los 50[kHz] es que la falla en el rodamiento no se ve perturbada por las fallas o interferencias vecinas. Existen pruebas de laboratorio que muestran la

efectividad de estos ensayos (Sandoval, Ramírez, y Quiroga, 2013) donde se propone el seguimiento de valores estadísticos para detectar fallas y severidades en rodamientos cónicos (Kurtosis, valor RMS y valor pico).

Existen estudios donde se afirma que el análisis de EA es un método efectivo para el monitoreo de rodamientos a bajas revoluciones (McFadden y Smith, 1984), debido a que en bajas revoluciones desaparecen las emisiones acústicas base que enmascaran la señal del rodamiento de interés, teniendo a bajas revoluciones señales mucho más limpias.



(a) Kurtograma de la señal obtenida con falla en la pista externa con daño severo

(b) Espectro de frecuencia con la señal filtrada por kurtosis para daño severo (superior) y daño medio

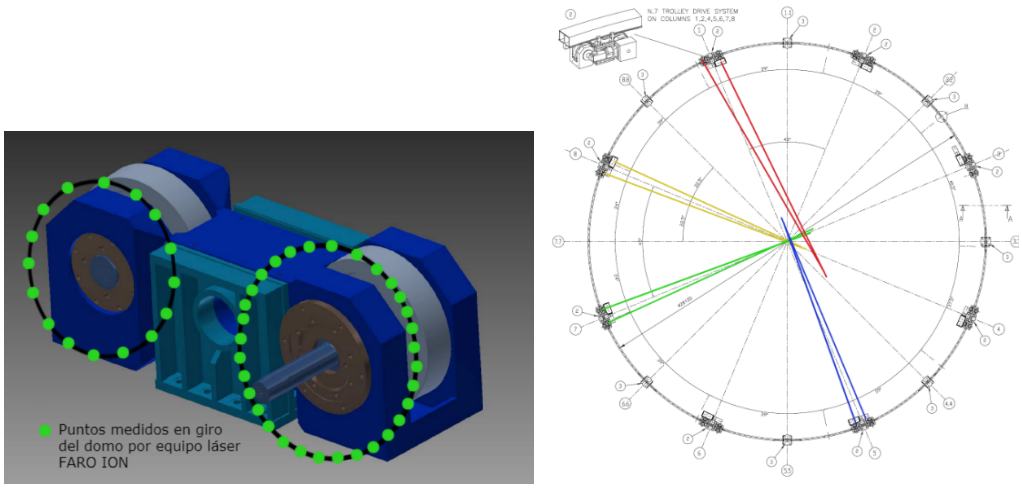
Figura 5.26.: Kurtograma y espectros de frecuencia reductor epicíclico

La aplicación de EA en el mantenimiento predictivo de máquinas rotativas es un área relativamente nueva y aún está siendo estudiada. Una primera aplicación práctica de EA tiene su uso en los rodamientos de una caja reductora epicíclica de la transmisión de helicópteros (Elasha, Greaves, Mba, y Addali, 2015) en la cual se usa la herramienta de kurtosis espectral para extraer las señales moduladas en amplitud generadas por los elementos rodantes cuando pasan por la deformación de la pista. Como se ve en la figura 5.26a y 5.26b, una vez que se filtra la señal obtenida por el sensor mediante kurtosis se observa la frecuencia de falla de la pista exterior (ORD) y su múltiplo.

5.3.3. Análisis de cargas en RTM

Es importante para el análisis del sistema de RTM el considerar la influencia que tienes las cargas sobre estos equipos y comprobar si estos reciben cargas igualmente distribuidas. Un primer trabajo consiste en verificar el montaje de cada RTM mediante el uso del instrumento disponible dentro de Paranal destinado a la medición espacial de seguimiento por láser marca FARO modelo ION, el cual permite una resolución de medición de $0{,}170[mm]$. La finalidad de esta medición tiene como objetivo corroborar que el centro de los ejes de cada RTM (motriz y conducido) una vez proyectados,

apunten o converjan en centro del telescopio. Esta medición se realizó de manera exitosa en uno de los Telescopios (UT1) por el ingeniero Max Kraus (Garchin, Alemania). La medición consistió en medir mediante el giro del enclosure puntos dentro de la circunferencia que se genera por el giro de los ejes de cada RTM (Figura 5.27). Posteriormente con estos puntos se ajustan los puntos a una circunferencia cuyo centro se proyecta perpendicular al plano que contiene a esta figura geométrica (mediante el uso de software: Spatial Analyzer) y se verifica que estos ejes coincidan con el centro del telescopio como verificación de condiciones de montaje (posición física) (Figura 5.27b).



(a) Puntos medidos en giro del enclosure

(b) Proyección del centro de cada circunferencia proyectado, se verifica que el montaje apunte al centro, como ejemplo, rojo no cumple condición

Figura 5.27.: Ejemplificación de la medición con equipo FARO ION

Otra prueba efectuada en Paranal durante el periodo de Febrero - Marzo, se realizó en el telescopio UT1 mediciones de fuerzas en cada una de las ruedas de los RTM mediante el uso de láminas medidoras de presión marca Fujifilm. Estos resultados dejaron como referencia las cargas a las cuales se somete cada rueda de RTM (Rayo, 2017). Estos valores se muestran en la tabla 5.5 y corresponden a la posición 0° de enclosure.

Tabla 5.5.: Resultados de medición de cargas mediante uso de láminas de presión fujifilm para ruedas de RTM en UT1

RTM	$F[N]$	$F[Ton]$
1M	2960351	30,2
1C	299735	30,6
2M	266431	27,2
2C	266431	27,2
3M	134046	13,7
3C	143486	14,6
4M	158590	16,2
4C	169918	17,3
5M	65248	6,7
5C	67967	6,9
6M	233807	23,9
6C	247400	25,2
7M	137822	14,1
7C	128382	13,1
8M	260994	26,6
8C	239244	24,4

A partir de la medición realizada se observa que la distribución de cargas no es homogénea teniendo la mayor carga sobre los RTM01 y RTM02. Esto puede deberse a que estos RTM, en la posición de reposo, soportan la estructura de la puerta de observación, sin embargo no es concluyente y se recomienda hacer el ensayo en partes equidistantes a lo largo de un giro completo de enclosure para ver si existen tendencias o cambios en los valores obtenidos. Los resultados de esta medición pueden relacionarse con la posición en la cual ha estado trabajando el telescopio a lo largo del tiempo, y ver si existe relación entre los equipos que han fallado con estos valores. Los registros de la posición del encoder del enclosure no se encontraron para ningún telescopio. Sin embargo, se registra la posición de Azimut la cual tiene relación directa con el giro del domo en las noches de observación. Se extraen del servidor los Logs o registros de un año (172990 puntos en total) correspondientes al año 2016 y se grafica el histograma para los ángulos (Figura 5.28).

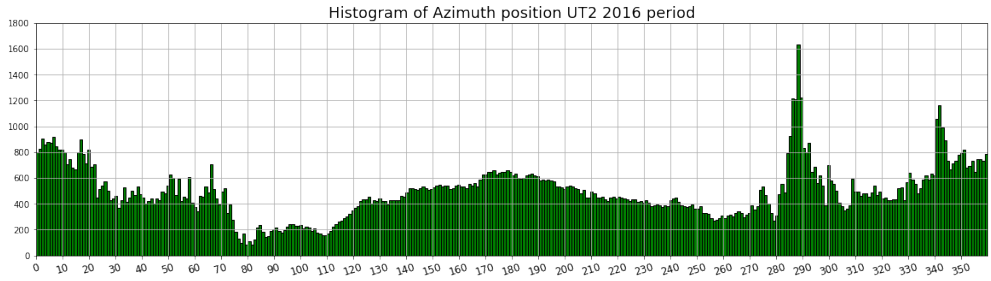


Figura 5.28.: Histograma de un año de observación (2016) de la posición de Azimut, eje vertical representa el numero total de veces de azimuth en determinada posición.

Del gráfico se observa que existen posiciones que más se repiten dentro de las observaciones, siendo la más frecuente la de 290° y 345°.

6. Conclusión

Ante los requerimientos del observatorio Paranal, se llevó a cabo un análisis de vibraciones para los equipos encargados de la rotación del domo (RTM), debido a sus condiciones operacionales de baja velocidad y alta carga, no se puede tratar como un problema clásico de vibraciones mecánicas por lo que luego de considerar los métodos actualmente existentes se eligen dos técnicas para el análisis: Kurtogramas y promedio en frecuencia.

Una vez logrado reducir el ruido de las señales se procede analizar los resultados obtenidos para ambos modelos empleado, con las que no se detectan fallas para ningún equipo RTM. Por otro lado, ambos algoritmos fueron capaces de detectar comportamientos fuera de operación normal del conjunto motor reductor de RTM06 y RTM08 por lo que se recomienda un análisis de los componentes de estos equipos.

Debido a la dificultad de tomar mediciones de vibraciones en los RTM es recomendable complementar esta técnica con análisis de lubricante, asegurando una buena operación como también un buen control evolutivo de un síntoma (Calidad del lubricante). En caso de continuar con las mediciones de aceleración con las configuraciones y algoritmos mencionados en esta memoria, se recomienda medir con especial atención a los equipos que se reemplacen a futuro para así tener un cruce de información entre lo que se obtiene físicamente al cambio de un equipo con el espectro obtenido mediante la medición. También se recomienda una medición periódica de los equipos nuevos (como RTM04 de UT1) para analizar la evolución de las vibraciones para la condición de equipo nuevo en el tiempo.

Referencias

Abella, M. B. M. (2011). *Mantenimiento industrial* (U. C. I. de Madrid, Ed.). Universidad Carlos III de Madrid. Descargado de http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/lecturas/MantenimientoIndustrial.pdf/view

Antoni, J. (2006). The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *20*(2), 282–307.

Antoni, J., Xin, G., y Hamzaoui, N. (2017). Fast computation of the spectral correlation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *92*, 248–277.

Boashash, B. (1992). Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. i. fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, *80*(4), 520–538.

Collacott, R. (2012). *Mechanical fault diagnosis and condition monitoring*. Springer Science & Business Media.

DLI. (2009). *Non-stationary signals.* http://www.azimadli.com/vibman/nonstationarysignals.htm. Descargado June 10th., de #http://www.azimadli.com/vibman/nonstationarysignals.htm#

Elasha, F., Greaves, M., Mba, D., y Addali, A. (2015). Application of acoustic emission in diagnostic of bearing faults within a helicopter gearbox. *Procedia CIRP*, *38*, 30–36.

Ericsson, S., Grip, N., Johansson, E., Persson, L.-E., Sjöberg, R., y Strömberg, J.-O. (2005). Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines. *Mechanical systems and signal processing*, *19*(3), 509–535.

ESO. (2017, marzo). *Eso & chile — a scientific and cultural bridge.* http://www.eso.org/public/chile/about-eso/eso-and-chile/. Descargado de http://www.eso.org/public/chile/about-eso/eso-and-chile/

Konstantinos Kamaras, I. D. (2016). Vibration analysis of rolling element bearings using spectral kurtosis and envelope analysis. *FNT*.

McFadden, P., y Smith, J. (1984). Acoustic emission transducers for the vibration monitoring of bearings at low speeds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *198*(2), 127–130.

Morin, D. (2009, noviembre). *Fourier analysis.* Descargado de http://www.people.fas.harvard.edu/~djmorin/waves/Fourier.pdf

Neale, M. J. (2013). *Bearings: a tribology handbook*. Elsevier.

Rao, S. S., y Yap, F. F. (2011). *Mechanical vibrations* (4.ª ed.). Prentice Hall Upper Saddle River.

Rayo, S. (2017, march). *Sabina rayo, analysis of the rotation mechanism of the vlt enclosures, work report summer studentship at silla paranal observatory, may 2017.*

Robinson, J. C. (1995). *Vibration measurements on slow speed machinery* (P. technology, Ed.). Predictive maintenance Technology National Conference.

Saavedra, P. (2005). *Análisis de vibraciones mecánicas* (U. de Concepción, Ed.). Departamento Ingeniería Civil Mecánica.

Sandoval, H. U., Ramírez, C. P., y Quiroga, J. (2013). Acoustic emission-based early fault detection in tapered roller bearings. *Ingeniería e Investigación*, *33*(3), 5–10.

Welch, P. (1967). The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, *15*(2), 70–73.

White, G. (2010). Introduction to vibration analysis. *Azima-DLI. Woburm, MA*.

A. Aspectos de Mantención y de medición de vibraciones

A.1. Mantenimiento

A.1.1. Generalidades del mantenimiento

El mantenimiento en la industria es simplemente la acción de mantener a una máquina ejerciendo de manera correcta la función para la cual fue construida. El origen de la mantención viene ligada con el origen de las herramientas, el simple hecho de afilar un cuchillo puede considerarse mantenimiento. Sin embargo, con la llegada de la revolución industrial y los procesos productivos (ej. Ford y la producción en serie con la llegada de máquinas cada vez más complejas y especificas en su función), es que se el mantenimiento se ha hecho una técnica fundamental en cualquier operación, pues el paro de una fábrica a causa de una falla en algún equipo implica una pausa en la producción llevando a la Empresa a una pérdida económica a veces mucho mayor al costo de ejecutar un buen programa de mantención.

En resumen, en la evolución de la mantención, pueden distinguirse cuatro generaciones:

- 1^a **generación:**

  Mantenimiento correctivo total, se espera a la avería o falla para reparar

- 2^a **generación:**

  Se empiezan a realizar tareas de mantenimiento para prevenir averías. Trabajos cíclicos y repetitivos con una frecuencia determinada.

- 3^a **generación:**

  Se implanta el mantenimiento "a condición" es decir se realizan monitoreos de parámetros en función de los cuales se efectuarán los trabajos propios de sustitución o re-acondicionamiento de los elementos.

- 4^a **generación:**

  Se implantan sistemas de mejora continua de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, de la organización y de la ejecución del mantenimiento, se establecen grupos de mejora y seguimiento de las acciones.

A.1.2. Tipos de mantenimiento

Existen cuatro modelos de Mantenimiento, unos más complejos que otros, sin embargo todos validos dependiendo de la aplicación o servicio que da el equipo en el proceso productivo (Abella, 2011)

1. Mantenimiento correctivo
2. Mantenimiento preventivo
3. Mantenimiento predictivo
4. Mantenimiento de re acondicionamiento

Mantenimiento Correctivo

Estrategia más simple de mantenimiento la cual consiste en intervenir y cambiar un componente especifico del equipo cuando este componente falla, es decir, esperar a que el equipo falle para realizar los cambios pertinentes. Este tipo de Mantenimiento se realiza en equipos que no son críticos y que no conllevan a fallas catastróficas como también en componentes electrónicos.

Mantenimiento preventivo

Técnica que busca, mediante la planificación, evitar que las fallas se manifiesten. Este tipo de estrategia requiere saber mediante previa estadística los tiempos de entre falla y los tiempos de reparación como también la configuración de los equipos para una correcta ejecución. Aunque esta técnica beneficia a la producción, tiene la desventaja de que el cambio del equipo puede realizarse aun cuando el equipo esté operando de manera normal, implicando un alto costo en repuestos. También tiene el inconveniente de intervenir la maquina (montaje/desmontaje) aumentando la posibilidad de errores en montaje.

Mantenimiento predictivo

Estrategia de mantenimiento que evalúa la **condición** mecánica de la máquina y como esta condición evoluciona con el tiempo, en base a esto al detectar un cambio en la condición, se realiza la mantención correspondiente logrando así detener el equipo y realizar la mantención/cambio de componentes de manera planificada y en el momento en que realmente se necesite esto lleva consigo una optimización del tiempo de funcionamiento de una máquina, llegando en algunos casos a reducir los costos en repuestos de los equipos. No obstante esta técnica de mantención puede significar un costo mayor al considerar que la mano de obra para realizar estos monitoreo de condición (medición y análisis) necesita ser calificada, también se requieren equipos específicos para la toma de datos. Ejemplos de mantenimiento predictivo son:

1. Análisis de vibraciones
2. Ultrasonido
3. Análisis de Aceites
4. Corrientes eléctricas
5. Termografía

En este tipo de técnica es importante también saber que síntoma es el que mejor se manifiesta en relación al trabajo, entorno y operación en el cual está inmerso el equipo.

Overhaul Mantenimiento de Reacondicionamiento

Este tipo de mantención está directamente relacionada con la edad y deterioro del o los equipos y consiste en el desarme total del equipo hasta el último componente, los cuales una vez desmontados son reemplazados en su totalidad, a excepción de la parte estructural del equipo, ya sea chasis o carcasa. El sentido de esta mantención es volver el equipo a su condición original, o sea volver a su condición cero. Este tipo de mantenimiento pretende dar una alta probabilidad de un buen tiempo de funcionamiento fijado de antemano.

A.2. Vibraciones Mecánicas

Se define como vibración a cualquier tipo de movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo. Como ejemplo básico se encuentra el movimiento de un péndulo, o una masa conectada a un resorte dispuesto de manera vertical. El estudio de las vibraciones mecánicas consiste en el análisis o estudio de los movimientos oscilatorios en cuerpos sólidos y las fuerzas asociadas que se generan (Rao y Yap, 2011).]. Este concepto de movimiento oscilatorio es fundamental en el estudio de cualquier equipo rotatorio, pues junto con el giro de sus componentes, aparecen fuerzas dinámicas que hacen que la maquina vibre. Por lo que en términos simples, la vibración en equipos es simplemente el análisis del movimiento en torno a un punto de equilibrio (figura A.1).

El movimiento del punto superior de la caja se puede representar mediante tres magnitudes, posición, velocidad y aceleración; y al ser armónica esta señal puede caracterizarse mediante dos paramentos, **amplitud** y **frecuencia**.

En la Imagen A.1 se ejemplifica lo anterior, la caja de rodamientos de una maquina la cual está vibrando verticalmente. Si la superficie de la caja del cojinete se mueve (o vibra) significa que su unión a la base es elástica, por lo que el sistema se puede modelar mediante un sistema masa-resorte. Para la forma de onda de la imagen se puede apreciar una amplitud de valor pico de 5 y una frecuencia de 2 [Hz] (dos oscilaciones

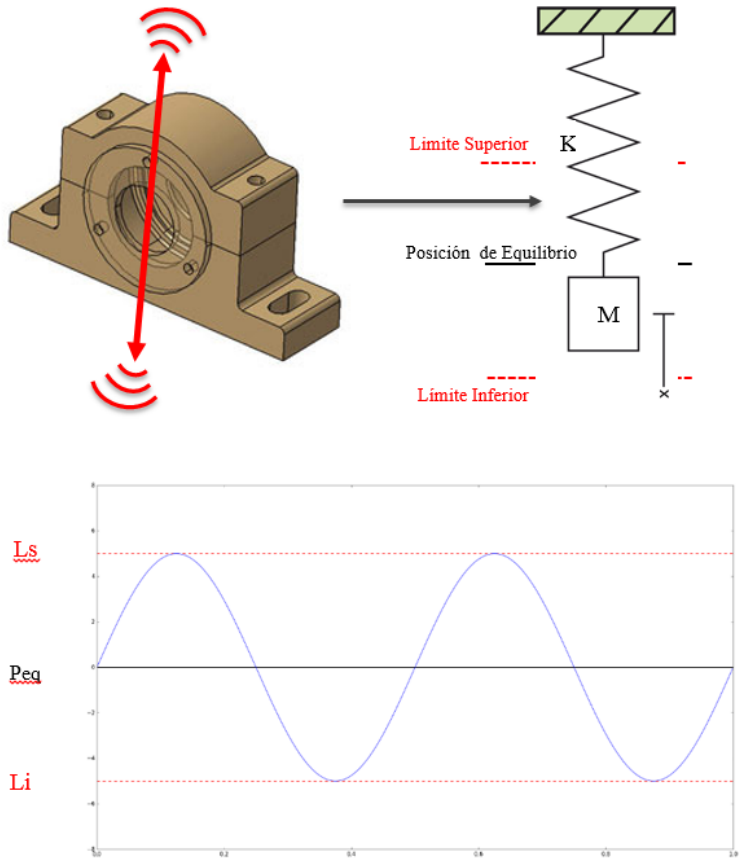


Figura A.1.: Desplazamiento vibratorio vertical de la caja del rodamiento

en el intervalo de un segundo). La amplitud suele expresarse de tres maneras diferentes dependiendo del fenómeno que se esté estudiando.

1. Valor pico: Es el mayor valor que alcanza la vibración, ya sea hacia el positivo o el negativo, en el caso de las vibraciones armónicas, este valor es igual tanto al positivo como al negativo.

2. Valor pico a pico: : es la diferencia entre el mayor valor alcanzado en el eje positivo y el mayor valor alcanzado en negativo.

3. Valor RMS: Se define como la raíz del valor promedio de los valores instantáneos de la vibración elevados al cuadrado.

$$\sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \cdots + x_n^2)} \tag{A.1}$$

A.2.1. Transformada de Fourier

Uno de los conceptos fundamentales en la etapa de procesamiento de la señal captada, es la transformada de Fourier, la cual se usa en el estudio de funciones (o señales) y

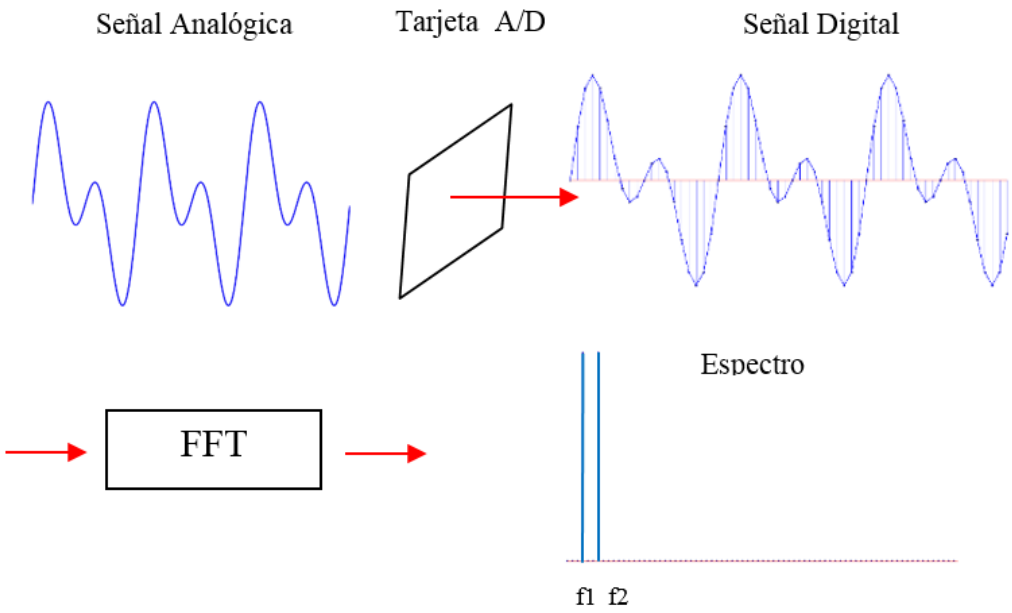


Figura A.2.: Calculo de una FFT desde la medición

como estas pueden descomponerse en funciones trigonométricas o exponenciales con frecuencias específicas. La transformada de Fourier se realiza mediante el uso del algoritmo llamado FFT (Fast Fourier Transform), que permite computar de manera más rápida la transformada discreta de Fourier (A.2) (Morin, 2009).

Para entender esta transformación, se procederá a explicar dos conceptos fundamentales

1. **Serie de Fourier**: Si una función es periódica, puede ser descrita como una *suma discreta* de funciones trigonométricas o exponenciales con frecuencias específicas

2. **Transformada de Fourier**: Generalización de la serie de Fourier, donde la función a describir no tiene que ser específicamente periódica, y se describe como una *integral continua* de funciones trigonométricas o exponenciales con la posibilidad de tener frecuencias continuas.

A.2.1.1. Serie de Fourier

Consideremos una función $f(x)$ periódica en un intervalo $0 \leq x \leq L$ como la de la figura A.3

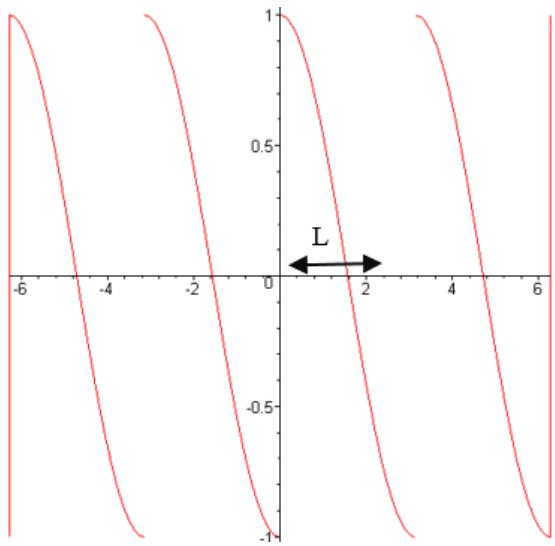


Figura A.3.: Ejemplo función periódica

Asumiendo periodicidad $0 \leq x \leq L$, la serie de Fourier se expresa como:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \right] \tag{A.2}$$

Se debe notar que la sumatoria parte desde n=1 puesto que para $n = 0$ la parte de la sumatoria que tiene la función seno se hace cero y el coseno al ser 0 es 1, teniendo solo un parámetro constante (a_0). Otro aspecto que se puede observar directamente de la fórmula es que para el termino $n = 1$ se tiene un periodo de L, incrementando el valor de n el periodo de cada termino sucesivo es de $\frac{L}{2}$, $\frac{L}{3}$, $\frac{L}{4}$ ..., es decir, la transformada respeta el periodo de la señal original, teniendo como máximo un periodo de 1 para el caso de $n = 1$.

Para el cálculo de los términos a_0,a_n,b_n se basan en la ortogonalidad en funciones, específicamente para las funciones trigonométricas se tienen las siguientes identidades:

$$\int_0^L \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) dx = 0 \tag{A.3}$$

$$\int_0^L \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) dx = \frac{L}{2}\delta_{nm} \tag{A.4}$$

$$\int_0^L \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) dx = \frac{L}{2}\delta_{nm} \tag{A.5}$$

Donde δ_{nm} es un delta de Kronecker, el cual se define como 1 si $n = m$ y 0 en cualquier otro caso. Con esta propiedad, para obtener los factores, se calculan las siguientes integrales:

$$\int_0^L f(x)\ dx = a_0 L\ \rightarrow a_0 = \frac{1}{L}\int_0^L f(x) \tag{A.6}$$

$$\int_0^L f(x)\cos\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) = \frac{L}{2}a_0 \rightarrow a_m = \frac{2}{L}\int_0^L f(x)\cos\left(\frac{2\pi mx}{L}\right)\ dx \tag{A.7}$$

$$\int_0^L f(x)\sin\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) = \frac{L}{2}a_m \rightarrow b_m = \frac{2}{L}\int_0^L f(x)\sin\left(\frac{2\pi mx}{L}\right)\ dx \tag{A.8}$$

Esta manera de expresar la serie de Fourier corresponde a la Serie trigonométrica de Fourier la cual puede ser escrita de manera compleja con la fórmula de Euler, obteniendo la Serie exponencial de Fourier e^{ix}= $cos(x) + isin(x)$ obteniendo:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{\frac{i\ 2\pi\ nx}{L}} \tag{A.9}$$

$$C_n = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{\frac{-i\ 2\pi\ nx}{L}} dx \tag{A.10}$$

Se puede observar de la ecuación A.10 que la sumatoria va desde $-\infty$ a ∞, a diferencia del caso trigonométrico donde los valores negativos de n dan valores redundantes.

A.2.1.2. Transformada de Fourier

El cálculo de la Serie de Fourier se fundamenta solo en funciones periódicas de periodo L. Si la serie no es periódica la Transformada de Fourier de manera directa falla, sin embargo, si se considera el periodo de la función $\frac{-L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}$ con $L \rightarrow \infty$ la función pasa a no tener periodo, o más bien un periodo que tiende al infinito, pasando de una serie discreta a una transformada continua, tomando como punto de partida la serie exponencial de Fourier

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{\frac{i\ 2\pi\ nx}{L}} \qquad donde \qquad C_n = \frac{1}{L}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) e^{\frac{-i\ 2\pi\ nx}{L}} \tag{A.11}$$

Si se define

$$k_n = \frac{2\pi n}{L}$$

y su diferencia

$$dk_n = \frac{2\pi dn}{L}$$

se obtiene

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{ik_n x}\left(\frac{L}{2\pi} dk_n\right) \tag{A.12}$$

Como el diferencial es muy pequeño, la sumatoria se convierte en una integral

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} C(k_n) e^{ik_n x} (dk_n) \tag{A.13}$$

Para obtener $C(k_n)$ se tiene la siguiente igualdad

$$C(k_n) = \frac{L}{2\pi} C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ik_n x} dx \tag{A.14}$$

Finalmente se obtienen las siguientes dos relaciones:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} C(k) e^{ikx} dk_n \tag{A.15}$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} C(k) e^{ikx} dk_n \tag{A.16}$$

Donde de la ecuación A.16 se le conoce como transformada de Fourier la cual nos dice que $f(x)$ indica cuanto de la función $C(k)$ está hecha de e^{-ikx}.

A.2.2. Consideraciones al adquirir datos para computar FFT

A.2.2.1. **Aliasing**

El aliasing es un problema que ocurre al medir frecuencias superiores a la frecuencia de sampling, específicamente y según el teorema de Nyquist la frecuencia de sampleo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima encontrada en la señal medida, es decir:

$$f_{sampleo} \leq 2\dot{f}_{maximo} \tag{A.17}$$

Este problema (aliasing) provoca que la FFT tome un valor de frecuencia diferente (menor) al real, como se muestra en la figura A.4

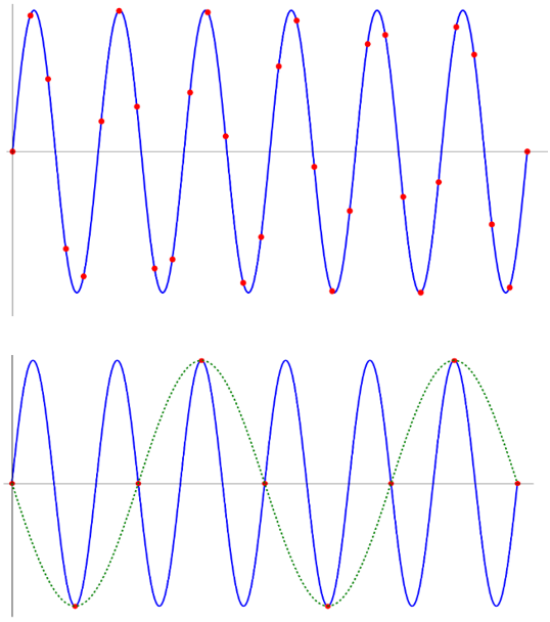


Figura A.4.: Problema Aliasing (Linea verde)

En la primera imagen se aprecia (A.4) (puntos rojos) que el sampling es mayor a la frecuencia de la Onda, al usar FFT, la frecuencia corresponderá a la frecuencia real de la onda, empero el segundo caso, en el cual solo se alcanza a tomar una muestra por periodo, al calcular la FFT, la frecuencia sería la de una onda menor (en este caso de 2[Hz]). Para mitigar este efecto, los transductores deben incluir un filtro pasa bajo previa conversión análoga/digital de la señal para así eliminar toda vibración sobre la frecuencia de corte seleccionada, a este filtro se le llama filtro antialiasing.

A.2.2.2. Fugas Laterales

La transformada de Fourier supone que el rango de tiempo es de registro infinito, en la práctica este criterio se vuelve prácticamente imposible de ejecutar, ya que un recolector de datos solo puede tomar un intervalo finito de tiempo, esto genera que la transformada de Fourier para una onda sinusoidal no sea una sola línea en el espectro sino que pasa a ser un gráfico con forma de lóbulos A.5, centrada en la frecuencia de la onda.

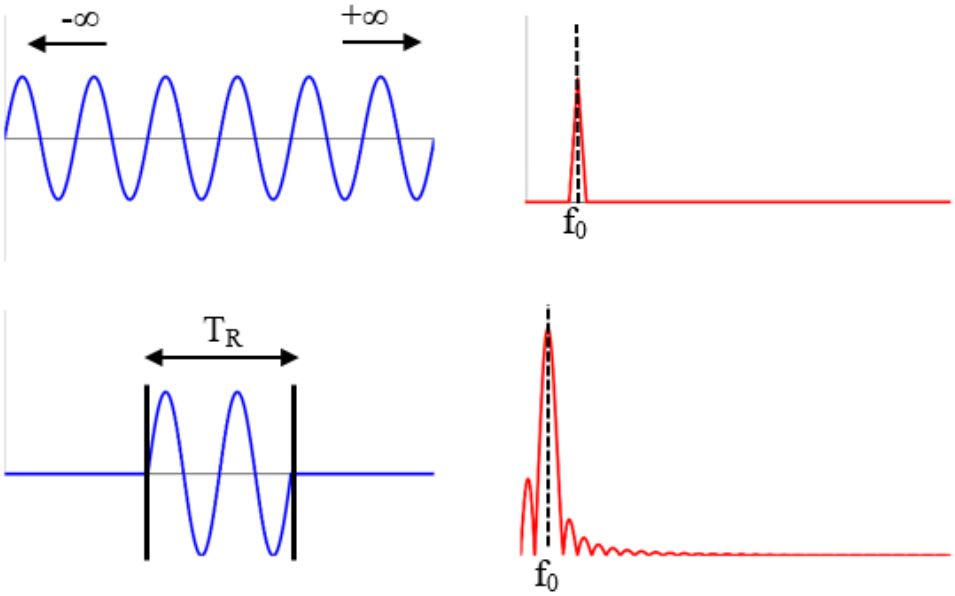


Figura A.5.: Efecto de fugas laterales

Otro efecto presente en la adquisición de datos ocurre cuando los datos no alcanzan a tomar un periodo entero de datos, pues la FFT replica la señal obtenida (ya que esta se basa en una serie infinita), si no se toma un periodo completo de la señal, esta al replicarla queda con saltos bruscos, como se muestra en la figura A.6

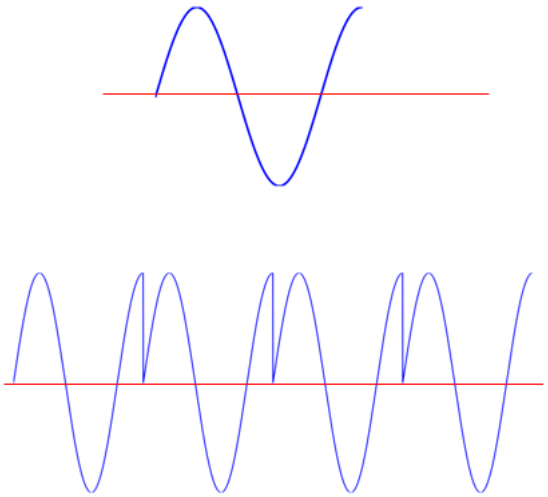
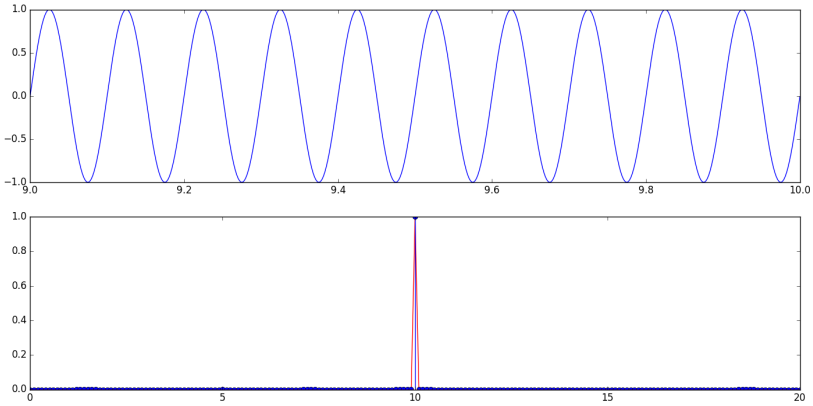
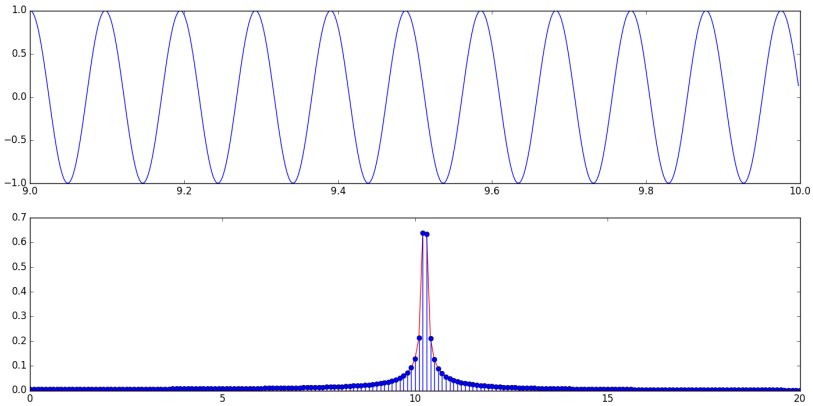


Figura A.6.: Onda replicada de periodo incompleto (se producen cambios bruscos en la forma de onda)



(a) Adquisicion de una onda de periodo completo



(b) Adquisicion de una onda de periodo incompleto

Figura A.7.: Fugas laterales en registro no periódico

Este efecto hace que en el espectro ya no aparezca una componente a la frecuencia correspondiente, sino que aparecen fugas laterales. La imágen A.7a y A.7b muestra un ejemplo de este problema. La primera señal corresponde a una onda de $10[Hz]$ captada por 10 segundos, la segunda a una señal de $10{,}25[Hz]$.

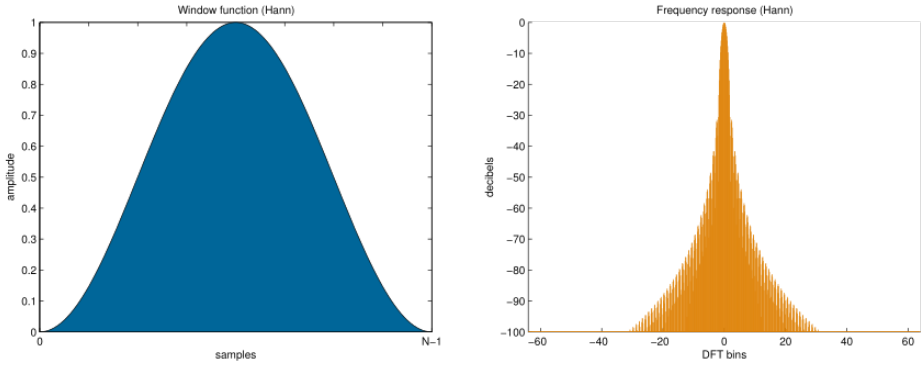


Figura A.8.: Gráfico de ventana Hann (fuente: Wikipedia)

Para mitigar este efecto de las fugas laterales es mediante la introducción de las funciones ventanas, que hacer que la función en ambos extremos converge a 0 haciendo que al juntar el final de la señal periódica con el inicio de ella misma, se haga de manera suave (es decir, no existan cambios o saltos en la función). Existen diferentes tipos de ventanas, siendo el mas usado en el análisis de vibración la ventana Hann (eq: A.18,fig: A.8), una vez definida la ventana, basta con hacer el producto entre la señal y la ventana para obtener la nueva función a la cual se le aplicara la transformada discreta de Fourier. Una limitante de este proceso es que agrega un grado de distorsión a la forma de onda que se esté analizando, bajo la forma de una modulación en amplitud (aparecerán de misma manera bandas laterales). Otro inconveniente que posee este tipo de ventana es que la amplitud de la señal pesada por el ponderado de la ventana Hann es menor que la señal original (White, 2010), en esencia se quita la mitad de la señal por el proceso (pues la señal se lleva a cero), esta perdida de amplitud se corrige multiplicando los niveles del espectro por dos en todo el intervalo de muestreo. Otro factor importante es que este tipo de ponderación debe hacerse en señales continuas y nunca con transientes ya que esta ventana distorsiona la forma de onda.

$$v(n) = a_0 - a_1 \cos(\frac{2\pi n}{N-1}) \tag{A.18}$$

Tomando en cuenta la forma de onda de la figura A.7b se multiplica la señal por la ventana Hann obteniendo así una nueva gráfica (figura A.9) estrechez en las fugas laterales, también es posible ver la disminución en la amplitud de la señal, pues esta no a sido manipulada para mostrar los efectos de esta.

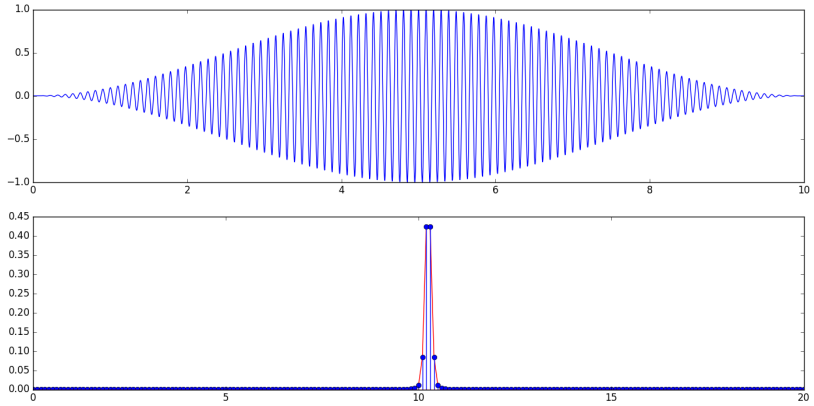


Figura A.9.: Efecto de la ponderación de la señal por la ventana Hann

Existen varias ventanas de ponderación aplicables a señales, dependiendo de lo que se esté analizando se utiliza de mejor manera el tipo de ventana, algunas de estas funciones se llaman: Hann, Hamming, Blackman,Blackman-Harris, Barlett, Flat top, Gauss, Kaiser (link: Wikipedia).

A.2.3. Modelos clásicos de fallas en equipos vibratorios

La siguiente sección tiene por objetivo mostrar los principales modos de falla de equipos rotatorios conocidos, estos equipos deben tener la condición de girar sobre las 200 revoluciones por minuto (RPM) debido a que con esas revoluciones las fuerzas dinámicas son capaces de generar patrones que pueden ser comparables para distintos tipos de máquinas.

A.2.3.1. Síntomas vibratorios del desbalanceo

El desbalanceo de masas es la causa más común de vibraciones. El desbalanceo es principalmente un desfase o corrimiento del centro de masas del rotor con su eje de rotación o geométrico. Algunas causas de desbalanceo son:

- Desgaste no simétrico del material
- Dilataciones no simétricas
- Deformaciones no simétricas cuando fija a su velocidad de operación
- Adherencia de material en el rotor durante su operación
- Pernos de diferente masa dentro del rotor
- Problemas en el diseño del chavetero

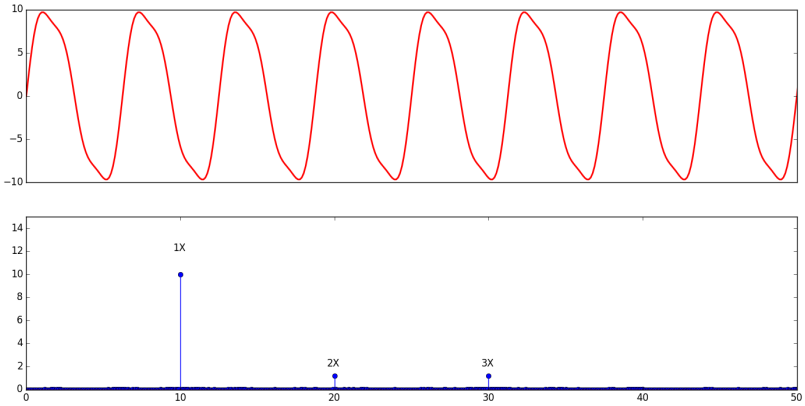


Figura A.10.: Forma de Onda y FFT característicos de desbalanceo

Estas causas generan dos posibles cambios en el rotor

1. **Punto Pesado**: El cual corresponde al punto en el cual la masa desbalanceada se localiza

2. **Cantidad de desbalanceo (U)**: Es la medida cuantitativa de desbalanceo en un rotor, definido por:

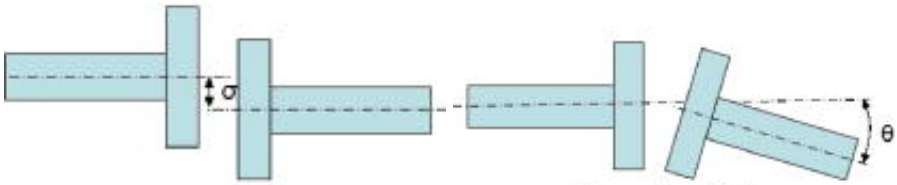
$$U = m \cdot r$$

   donde m es la masa desbalanceada y r es la distancia de la masa desbalanceada al eje de rotación.

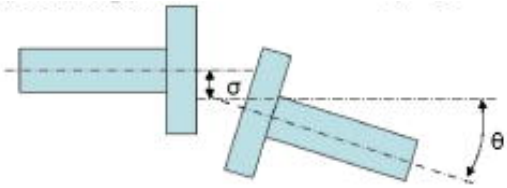
Cuando el valor de U aumenta hace que la manifestación del desbalanceo sea mayor, aumentando considerablemente la magnitud de la componente 1X junto con componentes a la 2X y 3X (Estas en menor amplitud,bajo el 10 % de la 1X) (figura: A.10) en el espectro de frecuencia (donde 1X corresponde a la frecuencia) por lo que en el espectro vibratorio, este síntoma se manifiesta con una componente predominante a 1X, este problema puede observarse de manera fácil comprobando la evolución de la componente 1X a través del tiempo, a medida que esta crece en amplitud, suele relacionarse con un aumento en el desbalanceo. Debe tenerse presente además que a revoluciones altas de giro del rotor (sobre 200[Hz]) siempre aparecerá la componente 1X del sistema, pues este se debe al desbalanceo residual el cual es imposible omitir en su totalidad.

A.2.3.2. Síntomas vibratorios del desalineamiento

El desalineamiento de acoples es una condición de falla donde los componentes de una máquina (conectados) no están conectados de manera co-lineal en su punto de unión en su periodo de funcionamiento. Existen diferentes tipos de desalineamiento en máquinas



(a) Desalineamiento paralelo (b) Desalineamiento angular



(c) Desalineamiento combinado

Figura A.11.: Tipos de desalineamientos

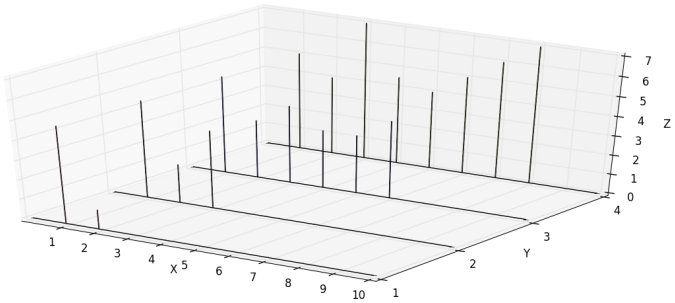


Figura A.12.: evolución de los espectros vibratorio debido al desalineamiento

- Desalineamiento paralelo (figura: A.11a)
- Desalineamiento angular (figura: A.11b)
- Desalineamiento mixto (figura: A.11c)

Este tipo de problema tiene su origen principalmente al momento del montaje, también suele presentarse una evolución del desalineamiento durante su operación debido principalmente a deformaciones debido a los esfuerzos por carga de la máquina.

En el espectro vibratorio, este tipo de falla suele presentarse con componentes predominantes en la 1X 2X 3X, dependiendo del grado de severidad del desalineamiento pueden aparecer aún mas armónicos (4X a 11X) En la imagen A.12 se grafican los espectros característicos de la evolución de la falla que produce un desalineamiento donde:

1. Espectro base (Sin falla, sólo desbalanceo residual)

2. Levemente desalineado
3. Medianamente desalineado
4. Desalineamiento severo

Para Desalineamientos severos, la forma del espectro vibratorio es similar al espectro característico del desbalanceo (Sección A.2.3.3). La diferencia, o la manera de identificar el desalineamiento es mediante la amplitud en la dirección de la vibración. el tipo mas frecuente de desalineamiento que se encuentra en equipos mecánicos es del tipo combinado (fig A.11c) debido a las fuerzas generadas en el mecanismo de acople.

A.2.3.3. Síntomas vibratorios de la soltura mecánica

Se entiende por soltura mecánica a cualquier elemento que se encuentre suelto que influya de manera directa en las vibraciones de la máquina sin distinción sobre si la falla de soltura ocurre en un componente interno o externo del mecanismo. Ejemplos clásicos de soltura en máquinas son:

- Pernos de sujeción de la máquina a la bases sueltas
- Juego radial excesivo en rodamientos
- Grieta en la estructura de la máquina o en el pedestal soporta descansos
- Rotor suelto en el eje, o con interferencia

La falla de soltura mecánica en el espectro de frecuencia aparece como un aumento de armónicos de la componente 1X (figura A.13) de la máquina, llegando a obtener hasta componentes de 14X dependiendo de la severidad de la soltura.

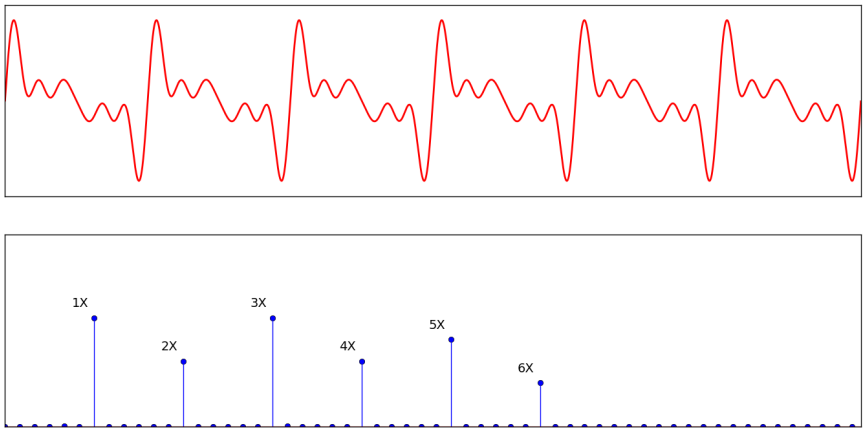


Figura A.13.: Forma de Onda y FFT característicos de desbalanceo

B. Código Python con funciones usadas en algoritmo

```
# coding: utf-8

# In[ ]:

import scipy.signal as sp
import numpy as np
import pandas as pd
import easygui as eg
import matplotlib.pyplot as plt
from math import sqrt

_directorio=[]
RTM=''
file_RTM=''
file_direccion=''

def utvlines():
    """
    Plot ONLY vertical lines based on data measured directly on Enclosure"""
    if file_UT=='UT1':

        rtm_t1=   { 'RTM01+':[34,36,39,41,71,74,75,78,108,111,113,116,144,146,148,151,
                    182,185,187,189,280,282,224,226,256,258,262,263,293,296,0,0,339,341],
                    'RTM01-':[40,43,45,47,77,80,82,74,115,117,119,121,152,154,156,159,
                    190,192,195,197,226,228,230,232,263,265,267,269,299,302,304,307,337,339,
                    341,343],
                    'RTM02+':[42,44,46,48,78,80,82,85,115,117,120,122,152,154,156,159,188,190,
                    192,194,226,228,230,233,263,265,267,270,300,302,305,307,0,0,0,0],
                    'RTM02-':[35,37,40,42,71,74,75,78,109,11,113,116,147,149,152,154,183,185,
                    187,190,220,222,224,226,257,259,261,263,294,296,298,300,339,342,344,364],
                    'RTM03+':[3,5,7,10,38,40,45,47,83,85,90,92,120,123,125,127,157,159,162,
                    164,194,197,199,201,230,232,0,0,267,270,273,275,305,308,310,312],
                    'RTM03-':[27,31,34,36,66,69,71,73,104,107,109,111,140,142,145,147,177,
                    178,182,184,214,216,219,221,251,253,256,258,297,299,302,304,334,336,339,
                    341],
                    'RTM04+':[6,9,11,13,43,46,48,50,80,83,85,87,126,128,131,133,163,165,168,
                    170,200,202,204,207,237,239,241,243,272,275,277,279,311,313,316,318],
                    'RTM04-':[23,26,28,30,62,64,66,69,97,99,102,104,134,137,139,141,172,
                    174,176,178,198,211,213,215,254,256,259,261,291,293,296,298,328,330,
                    333,335],
                    'RTM05+':[13,15,0,0,50,52,0,0,87,89,0,0,124,126,0,0,169,171,0,0,206,
                    209,0,0,243,245,0,0,280,293,0,0,316,318,0,0],
                    'RTM05-':np.zeros(18),
                    'RTM06+':[22,24,0,0,60,62,0,0,96,98,0,0,134,136,0,0,171,173,0,0,216,
                    218,0,0,253,255,0,0,290,292,0,0,327,329,0,0],
                    'RTM06-':[12,14,0,0,49,51,0,0,86,88,0,0,123,125,0,0,168,170,0,0,205,
                    207,0,0,243,245,0,0,280,282,0,0,318,320,0,0],
                    'RTM07+':[24,27,29,31,60,62,64,66,98,101,103,105,136,138,140,142,
                    172,174,177,179,210,212,214,216,254,257,249,261,292,294,296,298,329,331,333,335],
                    'RTM07-':[6,8,11,13,33,36,38,40,80,82,85,88,126,128,130,133,163,165,
                    167,170,200,202,204,207,237,239,242,244,276,278,280,282,311,313,
                    315,318],
```

```
                     'RTM08+':[29,31,34,36,66,68,70,73,102,104,106,109,140,142,145,147,177,
                     179,182,184,214,216,219,221,251,254,256,258,296,299,301,303,334,336,
                     338,340],
                     'RTM08-':np.zeros(18)}
    elif file_UT=='UT2':
        rtm_t1=   {'RTM01+':np.zeros(18),
                    'RTM01-':[3,5,8,10,37,39,41,42,82,84,87,89,119,121,123,125,156,158,161,
                    163,192,194,197,199,230,233,235,237,266,268,270,272,303,305,308,310],
                    'RTM02+':np.zeros(18),
                    'RTM02-':np.zeros(18),
                    'RTM03+':np.zeros(18),
                    'RTM03-':[35,37,39,41,71,73,75,78,108,110,113,115,146,148,151,153,181,
                    184,186,188,218,220,223,225,255,257,259,262,292,294,296,298,337,339,
                    341,343],
                    'RTM04+':np.zeros(18),
                    'RTM04-':[29,31,33,36,65,68,69,72,104,106,108,110,139,141,143,146,176,178,
                    180,182,212,215,217,219,249,252,254,256,294,296,299,301,331,332,336,338],
                    'RTM05+':np.zeros(18),
                    'RTM05-':[23,25,28,30,61,63,66,68,97,99,101,103,132,136,138,140,170,172,174,
                    177,207,209,212,214,252,254,256,259,289,291,293,295,326,328,330,332],
                    'RTM06+':np.zeros(18),
                    'RTM06-':[19,21,24,26,54,56,59,62,91,93,96,98,128,130,133,135,164,166,169,
                    171,210,212,215,217,246,248,251,253,283,285,288,290,320,322,325,327],
                    'RTM07+':np.zeros(18),
                    'RTM07-':[12,14,17,19,48,50,53,55,85,87,90,92,125,127,130,132,167,169,172,174,204,206,
                    209,211,241,243,246,248,277,279,282,284,315,317,320,322],
                    'RTM08+':np.zeros(18),
                    'RTM08-':[6, 8, 11, 13, 43, 105, 48, 111, 79, 81, 84, 86, 125, 127, 130, 132, 161,
                     164, 166, 168, 198, 200, 203, 205, 235, 237, 250, 252, 273, 275, 278, 280, 308,
                     310, 312, 314]}

    if file_name.find('mas')>=0:
        RTM=file_RTM+'+'
    else:
        RTM=file_RTM+'-'
    #print(RTM)
    #fig=plt.figure(i)
    #ax=plt.subplot(111)
    plt.vlines(rtm_t1['%s'%RTM],-15,15,'m',linestyle='--',lw=2,zorder=2,alpha=0.8)

#nextpow2: Used for pwelch method of aproximation.
def nextpow2(i):
    """i: int
    find the next power of i"""
    n = 1
    while n < i: n *= 2
    return n

#pwelch: Psd by Welch method, the default parameters are selected based on MATLAB criteria.
def pwelch(signal,fs):
    """signal: Array
       fs: frequency Sample
    Attempt of using same algorithm in Welch PSD method as MATLAB"""
    window=len(signal/8)
    noverlap=0.5*window
    nfft=nextpow2(window)
    pw=sp.welch(signal,nperseg=window,noverlap=noverlap,nfft=nfft,fs=fs)
    return pw

#   open_csv: Prepare the .csv for working, the selection of the file is by GUI interface,
#a Pandas DataFrame is created
#in order to work,
#   the columns are: [tiempo, Channel 1, Channel 2, Channel 3, Channel 4]
def open_csv():
    """Opens a GUI for the selection of a .csv file and creates an df_base Dataframe
```

```
    with the measurements"""

    global _directorio, df_base, sampling_rate, file_name, file_RTM, file_direction, file_UT
    global df_base
    global sampling_rate
    directorio=eg.fileopenbox(msg='DATA PLOT', title='SELECT .CSV FILE')
    directorio='/'.join(directorio.split('\\'))
    print('file: ', directorio)
    _directorio=directorio.split('/')
    file_name=_directorio[-1]
    print('File Name:',file_name)
    file_direction=_directorio[-2]
    print('File Direction: ',file_direction)
    file_RTM=_directorio[-4]
    print('RTM selected: ',file_RTM)
    file_UT=_directorio[-5]
    print('UT selected: ', file_UT)
    print('')
    sampling_rate=int(directorio[directorio.find("V")+1:directorio.find("HZ")])
    sampling_interval=1/sampling_rate
    columna=['tiempo','Channel 1','Channel 2','Channel 3','Channel 4']
    colors=['r','b','g','m']
    df_base=pd.read_csv(directorio,sep=";", header=3, names=columna,decimal=".")
    sampling_points=len(df_base.index)
    return df_base, file_name, file_direction, file_RTM, file_UT, sampling_points

def exptwo(n,j):
    """n: Base Number
       j: Exponential Shift
       (used for fft zero padding) Used for 2**n fast FFT computation (Zero Padding) """
    i=0
    while 2**i < n:
        i=i+1
    else:
        return(2**(i+j))

#fft_pad: returns a pd Dataframe with linear Fft and freq.
def fft_pad(channel,df):
    """fft_pad """

    _len=exptwo(len(df),3)-1
    df_fft=(abs(pd.DataFrame(data=np.fft.rfft(df['Channel %s'%(channel)],n=_len),
    columns=['Fft']))*sqrt(2))/_len
    df_fft['freq']=np.fft.rfftfreq(_len,d=1/sampling_rate)
    return(df_fft)

#time_fft_plot: plot a figure with time series and the fft. i:Channel, j: color.,
# df: df with data
def time_fft_plot(i,j,df):
    plt.figure(i)
    #ax=plt.subplot(111)
    ax=plt.subplot(211)
    ax.set_title('Time series Channel: %s \n'%(i)+_directorio[-1])
    ax.plot(df['tiempo'],df['Channel %s'%(i)],j)
    ax=plt.subplot(212)
    ax.set_title('Lin. Fft')
    data=fft_pad(i,df)
    plt.plot(data['freq'],data['Fft'],j)
    plt.show()

#time_plot: plot only the time Series. i:Channel, j: color., df: df with data
def time_plot(i,j,df):
    plt.figure(i)
    ax=plt.subplot(111)
    ax.set_title('Time series Channel: %s \n'%(i)+_directorio[-1])
```

```
    ax.plot(df['tiempo'],df['Channel %s'%(i)],j)
    plt.show()

def Time_series_plot(xmin,xmax,ymin,figsize):
    """Inputs:
    xmin: int, xmin in x axis
    xmax: int, xmax in x axis
    ymin: int, ymin and ymax in y axis
    figsize: (a,b) size of the matplotlib notebook inline
    """

    fig=plt.figure(figsize=figsize)
    plt.suptitle('Plot for:%s  of:%s  direction:%s'%(file_RTM,file_UT,file_direction),
    fontsize=14)
    ax1=plt.subplot(411)
    ax1.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax1.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 1'],'r')
    ax2=plt.subplot(412,sharex=ax1,sharey=ax1)
    ax2.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax2.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 2'],'g')
    ax3=plt.subplot(413,sharex=ax1,sharey=ax1)
    ax3.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax3.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 3'],'b')
    ax4=plt.subplot(414,sharex=ax1,sharey=ax1)
    ax4.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax4.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 4'],'m')
    plt.show()

def rms(num):
    return sqrt(sum(n*n for n in num)/len(num))

def array_split(a,n):
    """
    a: array
    n: int
    Split the a array into segments of n elements
    a=np.arange(0,10,1)
    array_split(3)
    [array([0, 1, 2]), array([3, 4, 5]), array([6, 7, 8])]"""

    m=len(a)//n * n
    a=a[0:m]
    return np.split(a,len(a)/n)

def split_topsd(_list):
    """_list: array type: [[[],[],[]],[[],[],[]]] converted to: [[],[],[],[],[],[]]
    necesary for the splitted array (39996 samples per array)"""
    return [item for sublist in _list for item in sublist]

def minute_to_sec(l):
    """l: Array
    returns data from measure in RTM from minutes (ex: 152 [1:52] -> 112)"""
    for i in np.arange(0,len(a)):
        if l[i]//100 != 0:
            l[i]= l[i]//100 * 60 + l[i]%100
    return(a)

def impact_plot(xmin,xmax,ymin,figsize):
    """Inputs:
    xmin: int, xmin in x axis
    xmax: int, xmax in x axis
```

```
    ymin: int, ymin and ymax in y axis
    figsize: (a,b) size of the matplotlib notebook inline
    """

    fig=plt.figure(figsize=figsize)
    plt.suptitle('Plot for:%s  of:%s  direction:%s'%(file_RTM,file_UT,file_direction),
    fontsize=14)
    ax1=plt.subplot(411)
    ax1.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax1.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 1'],'r',zorder=1)
    utvlines()
    ax2=plt.subplot(412,sharex=ax1,sharey=ax1)
    ax2.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax2.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 2'],'g',zorder=1)
    utvlines()
    ax3=plt.subplot(413,sharex=ax1,sharey=ax1)
    ax3.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax3.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 3'],'b',zorder=1)
    utvlines()
    ax4=plt.subplot(414,sharex=ax1,sharey=ax1)
    ax4.set_ylim(ymin=-ymin, ymax=ymin)
    ax4.set_xlim(xmin=xmin, xmax=xmax)
    plt.plot(df_base['tiempo'],df_base['Channel 4'],'m',zorder=1)
    utvlines()
    plt.show()
def to_Psd(df_base):
    df_t=df_base.set_index('tiempo',drop=False)
    ch1=df_t[['Channel 1']]
    icount=[]
    a0=0
    a1=0
    n=2
    T=0.0409
    topsd=[]
    _iter=iter(ch1.reset_index().tiempo)
    global _topsd

    for i in _iter:
        if ch1['Channel 1'][i] < n or ch1['Channel 1'][i] > -n :
            a1= i
        if ch1['Channel 1'][i] > n or ch1['Channel 1'][i] < -n:
            print('Interval Found', end=' ... ')

            #topsd=np.append(topsd,df_t[a0:a1]['Channel 1'])
            topsd.append(np.array(df_t[a0:a1-df_base['tiempo'][1]]['tiempo']))
            #print(df_t[a0:a1]['Channel 1'])
            a0=a1+T
            a1=a0
            while i<a0:
                i=next(_iter)
    print(end='\n''\n')
    print('total ranges found: ',len(topsd),end='\n')
    print('Deleting ranges with less than 39996 samples',end='\n')

    for i in np.arange(0,len(topsd),1):
        if len(topsd[i])<39996:
            icount.append(i)
    topsd=np.delete(topsd,icount)
    print('final ranges: ',len(topsd))

    for i in np.arange(0,len(topsd),1):
        print('len of range n°%s : %s '%(i+1,len(topsd[i])))
```

```
    _topsd=[]
    aa=[]
    for i in topsd:
        aa=array_split(i,39996)
        _topsd.append(aa)
    _topsd=split_topsd(_topsd)
    test=[]
    for i in _topsd:
        test.append([i[0],i[-1]])
    _topsd=test
    print('Final total Samples of len 39996 achived: ',len(_topsd))
    return (_topsd)
def psd(_topsd):
    i=0
    df_base_psd=df_base.set_index('tiempo')
    while i < len(_topsd):
        yield df_base_psd.loc[_topsd[i][0]:_topsd[i][1]]
        i+=1
def topsdplot(_topsd):
    gen1 = psd(_topsd)
    gen2 = psd(_topsd)
    gen3 = psd(_topsd)
    gen4 = psd(_topsd)
    fs=5555
    nperseg=29997
    noverlap= nperseg//2

    psdplot1=[]
    for i in gen1:
        welch=sp.welch(i['Channel 1'],fs=fs,nperseg=nperseg,noverlap=noverlap)
        psdplot1.append(welch[1])
    print('psdplot1 done')

    psdplot2=[]
    for i in gen2:
        welch=sp.welch(i['Channel 2'],fs=fs,nperseg=nperseg,noverlap=noverlap)
        psdplot2.append(welch[1])
    print('psdplot2 done')

    psdplot3=[]
    for i in gen3:
        welch=sp.welch(i['Channel 3'],fs=fs,nperseg=nperseg,noverlap=noverlap)
        psdplot3.append(welch[1])
    print('psdplot3 done')

    psdplot4=[]
    for i in gen4:
        welch=sp.welch(i['Channel 4'],fs=fs,nperseg=nperseg,noverlap=noverlap)
        psdplot4.append(welch[1])
    print('psdplot4 done')
    return psdplot1,psdplot2,psdplot3,psdplot4
def plot_autoo(lista):
    _to_psd=_topsd
    fs=5555
    nperseg=29997
    noverlap= nperseg//2
    psdplot1,psdplot2,psdplot3,psdplot4=lista
    a1=np.mean(psdplot1,axis=0)
    a2=np.mean(psdplot2,axis=0)
    a3=np.mean(psdplot3,axis=0)
    a4=np.mean(psdplot4,axis=0)
    f=sp.welch(df_base.set_index('tiempo').loc[_to_psd[0][0]:_to_psd[0][1]]['Channel 1'],
    fs=fs,nperseg=29997,noverlap=29997//2)
    f=f[0]
    plt.figure(figsize=(15,15))
```

```
    plt.suptitle('PSD on %s'%(file_name),fontsize=15)
    ax1=plt.subplot(111)
    ax1.set_xlabel('$Frequency$',fontsize=20)
    ax1.set_ylabel('$m^2/(s^4*HZ)$',fontsize=20)
    plt.xticks(np.arange(min(f), max(f)+1, 50),fontsize=10,rotation='vertical')
    plt.plot(f,a1,lw=1)
    plt.plot(f,a2,lw=1)
    plt.plot(f,a3,lw=1)
    plt.plot(f,a4,lw=1)
    ax1.set_ylim(0,0.01)
    plt.grid()
    plt.show()
def plot_logg(lista):
    _to_psd=_topsd
    fs=5555
    nperseg=29997
    noverlap= nperseg//2
    psdplot1,psdplot2,psdplot3,psdplot4=lista
    a1=np.mean(psdplot1,axis=0)
    a2=np.mean(psdplot2,axis=0)
    a3=np.mean(psdplot3,axis=0)
    a4=np.mean(psdplot4,axis=0)
    f=sp.welch(df_base.set_index('tiempo').loc[_to_psd[0][0]:_to_psd[0][1]]['Channel 1'],
    fs=fs,nperseg=29997,noverlap=29997//2)
    f=f[0]
    plt.figure(figsize=(15,15))
    plt.suptitle('PSD on %s'%(file_name),fontsize=15)
    ax1=plt.subplot(111)
    ax1.set_xlabel('$Frequency$',fontsize=20)
    ax1.set_ylabel('$m^2/(s^4*HZ)$',fontsize=20)
    plt.xticks(np.arange(min(f), max(f)+1, 50),fontsize=10,rotation='vertical')
    plt.semilogy(f,a1,lw=0.5)
    plt.semilogy(f,a2,lw=0.5)
    plt.semilogy(f,a3,lw=0.5)
    plt.semilogy(f,a4,lw=0.5)
    ax1.set_ylim(0,0.01)
    plt.grid()
    plt.show()
def plot_manual(lista,xmin,xmax,ymin,ymax,figsize):
    _to_psd=_topsd
    fs=5555
    nperseg=29997
    noverlap= nperseg//2
    psdplot1,psdplot2,psdplot3,psdplot4=lista
    a1=np.mean(psdplot1,axis=0)
    a2=np.mean(psdplot2,axis=0)
    a3=np.mean(psdplot3,axis=0)
    a4=np.mean(psdplot4,axis=0)
    f=sp.welch(df_base.set_index('tiempo').loc[_to_psd[0][0]:_to_psd[0][1]]['Channel 1'],
    fs=fs,nperseg=29997,noverlap=29997//2)
    f=f[0]
    plt.figure(figsize=figsize)
    plt.suptitle('PSD on %s'%(file_name),fontsize=15)
    ax1=plt.subplot(111)
    ax1.set_xlabel('$Frequency$',fontsize=20)
    ax1.set_ylabel('$m^2/(s^4*HZ)$',fontsize=20)
    plt.xticks(np.arange(min(f), max(f)+1,(xmax-xmin)/54 ),fontsize=10,rotation='vertical')
    plt.plot(f,a1,lw=1)
    plt.plot(f,a2,lw=1)
    plt.plot(f,a3,lw=1)
    plt.plot(f,a4,lw=1)
    plt.grid()
    ax1.set_xlim(xmin=xmin,xmax=xmax)
    ax1.set_ylim(ymin=ymin, ymax=ymax)
    plt.show()
```

```
def plot_manuallog(lista,xmin,xmax,ymin,ymax,figsize):
    _to_psd=_topsd
    fs=5555
    nperseg=29997
    noverlap= nperseg//2
    psdplot1,psdplot2,psdplot3,psdplot4=lista
    a1=np.mean(psdplot1,axis=0)
    a2=np.mean(psdplot2,axis=0)
    a3=np.mean(psdplot3,axis=0)
    a4=np.mean(psdplot4,axis=0)
    f=sp.welch(df_base.set_index('tiempo').loc[_to_psd[0][0]:_to_psd[0][1]]['Channel 1'],
    fs=fs,nperseg=29997,noverlap=29997//2)
    f=f[0]
    plt.figure(figsize=figsize)
    plt.suptitle('PSD on %s'%(file_name),fontsize=15)
    ax1=plt.subplot(111)
    ax1.set_xlabel('$Frequency$',fontsize=20)
    ax1.set_ylabel('$m^2/(s^4*HZ)$',fontsize=20)
    plt.xticks(np.arange(min(f), max(f)+1,(xmax-xmin)/54 ),fontsize=10,rotation='vertical')
    plt.semilogy(f,a1,lw=0.8)
    plt.semilogy(f,a2,lw=0.8)
    plt.semilogy(f,a3,lw=0.8)
    plt.semilogy(f,a4,lw=0.8)
    plt.grid()
    ax1.set_xlim(xmin=xmin,xmax=xmax)
    ax1.set_ylim(ymin=ymin, ymax=ymax)
    plt.show()
def plot_manualloglog(lista,xmin,xmax,ymin,ymax,figsize):
    _to_psd=_topsd
    fs=5555
    nperseg=29997
    noverlap= nperseg//2
    psdplot1,psdplot2,psdplot3,psdplot4=lista
    a1=np.mean(psdplot1,axis=0)
    a2=np.mean(psdplot2,axis=0)
    a3=np.mean(psdplot3,axis=0)
    a4=np.mean(psdplot4,axis=0)
    f=sp.welch(df_base.set_index('tiempo').loc[_to_psd[0][0]:_to_psd[0][1]]['Channel 1'],
    fs=fs,nperseg=29997,noverlap=29997//2)
    f=f[0]
    plt.figure(figsize=figsize)
    plt.suptitle('PSD on %s'%(file_name),fontsize=15)
    ax1=plt.subplot(111)
    ax1.set_xlabel('$Frequency$',fontsize=20)
    ax1.set_ylabel('$m^2/(s^4*HZ)$',fontsize=20)
    plt.xticks(np.arange(min(f), max(f)+1,(xmax-xmin)/54 ),fontsize=10,rotation='vertical')
    plt.loglog(f,a1,lw=0.8)
    plt.loglog(f,a2,lw=0.8)
    plt.loglog(f,a3,lw=0.8)
    plt.loglog(f,a4,lw=0.8)
    plt.grid()
    ax1.set_xlim(xmin=xmin,xmax=xmax)
    ax1.set_ylim(ymin=ymin, ymax=ymax)
    plt.show()
```

C. Reportes generados para cada RTM de UT2

Por razones prácticas, solo se adjunta un informe generado, el cual equivale a RTM01@UT2, cada linea $In[]$: corresponde a la ejecución de linea de código. A cada función de gráficos se le puede modificar los valores para modificar los rangos en los cuales se grafica. las funciones están contenidas en el archivo .Accfunc.py.el cual se muestra en el Anexo B. Los demás reportes se adjuntan como archivo separado, los cuales se encuentran dentro del CD de la memoria.

UT2 RTM01 01.10.2016

October 18, 2016

1 Data Manipulation Main Code

Made by: Tomás Dreves

2 Import the necesary Libraries:

```
In [1]: from Accfunc import *
```

3 Report of UT2 - RTM 01 Measurements of Vibration

3.1 Equipment:

- Conditioning Amplifier Bruel & Kjaer model NEXUS type: 2692-0S4
- Accelerometers Bruel & Kjaer model 4370 con cable AO 0038
- Osciloscope TiePie model HandyScope HS4

3.2 Date:

- 01.10.2016

3.3 Frequency Sample:

- 5555 [Hz]

3.4 Direction:

- -1

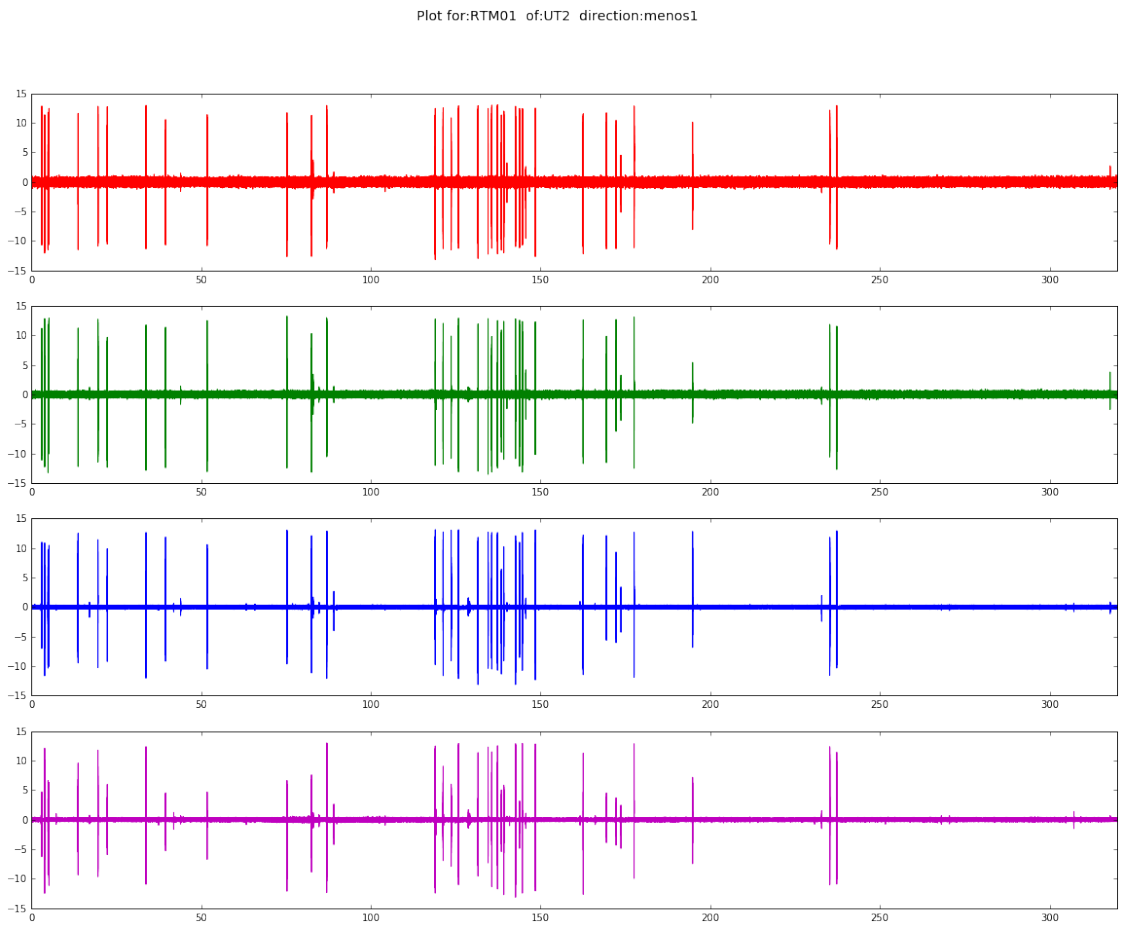
4 Open .csv:

```
In [16]: df_base, file_name, file_direction, file_RTM, file_UT, sampling_points  = open_csv()
```

```
file:  D:/Dropbox/ProyectArduino/mediciones RTM Amplificador/Mediciones/UT2/RTM01/20161003/menos1/20161
File Name: 20161003RTM011V5555HZmenos1.csv
File Direction:  menos1
RTM selected:  RTM01
UT selected:  UT2
```

5 Full Range Plots + indicators:

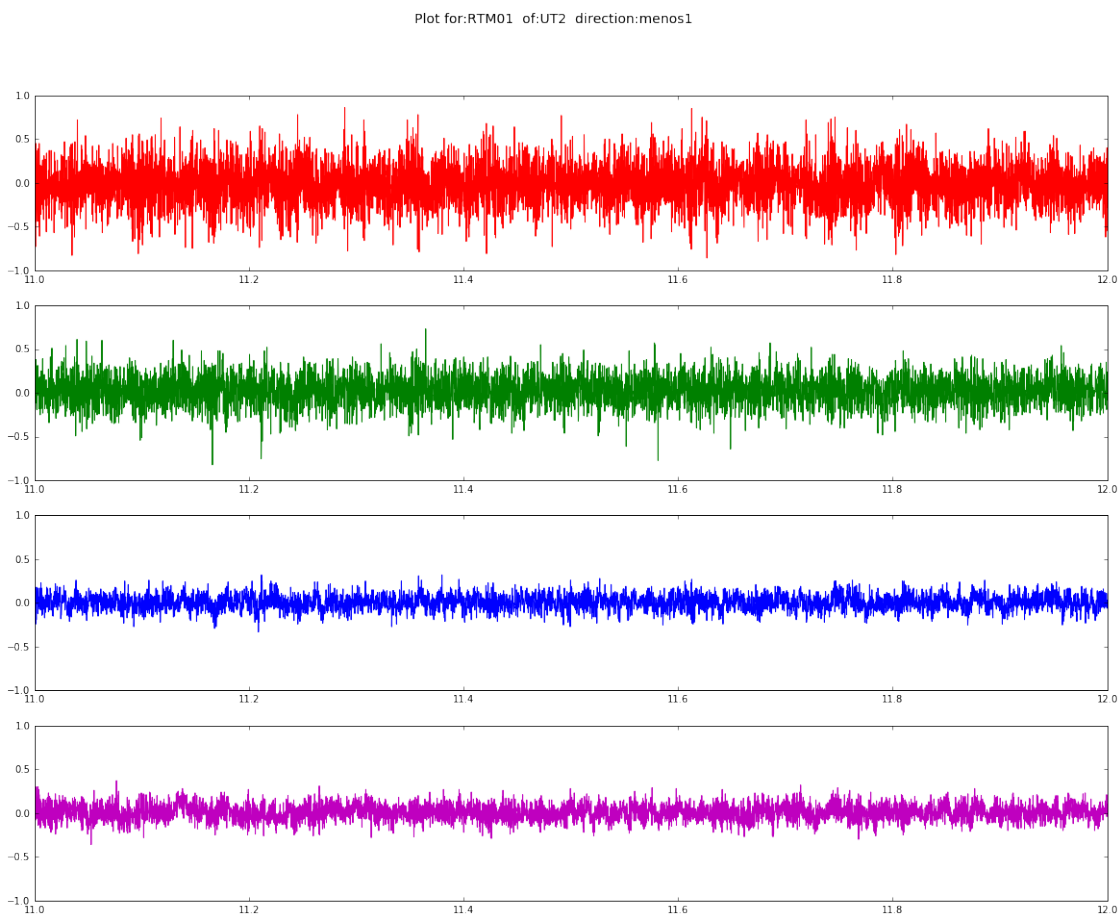
```
In [3]: %matplotlib inline
        Time_series_plot(0,320,15,(20,15))
        for i in np.arange(1,5,1):
            print('Channel %i Standard deviation: %.4f '%(i,df_base['Channel %s'%(i)].std()),
                  'Mean: %.4f'%(df_base[df_base['Channel %s'%(i)]>0].mean()['Channel %s'%(i)]),
                  'RMS: %.4f'%(rms(df_base['Channel %s'%(i)])))
```




```
Channel 1 Standard deviation: 0.3688  Mean: 0.2238 RMS: 0.3688
Channel 2 Standard deviation: 0.3028  Mean: 0.1726 RMS: 0.3042
Channel 3 Standard deviation: 0.2842  Mean: 0.0983 RMS: 0.2844
Channel 4 Standard deviation: 0.2310  Mean: 0.1003 RMS: 0.2312
```

6 Behave of Time Series Between Impacts:

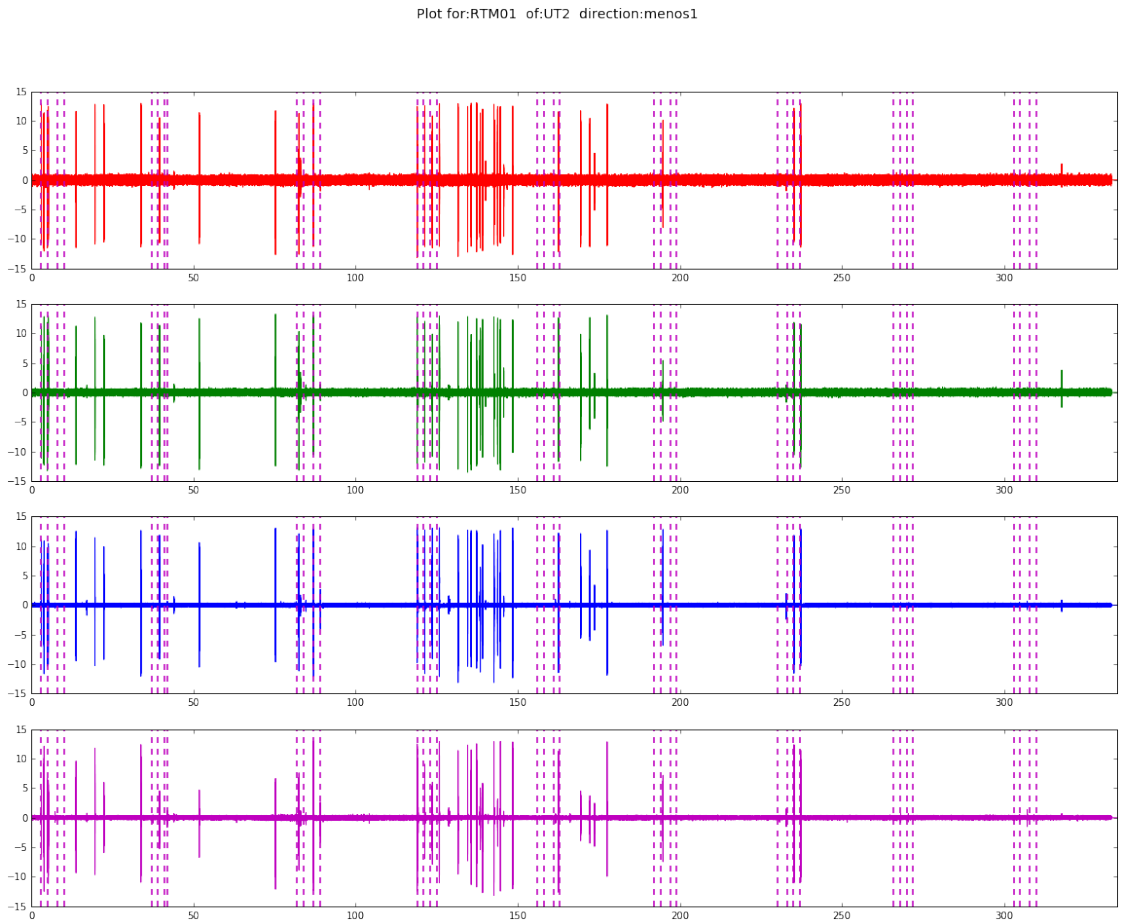
```
In [4]: Time_series_plot(11,12,1,(20,15))
        print('time windows: 1 sec')
```




```
time windows: 1 sec
```

7 Time Serie + Impacts from Rails:

```
In [5]: impact_plot(0,335,15,(20,15))
```



The next cell identifies periods of time between impacts, Period of impact and n (average behave of the wave) must be achieved manually, this can be done by analyzing Channels plot.

```
In [6]: _topsd=to_Psd(df_base)
        toplot=topsdplot(_topsd)
```

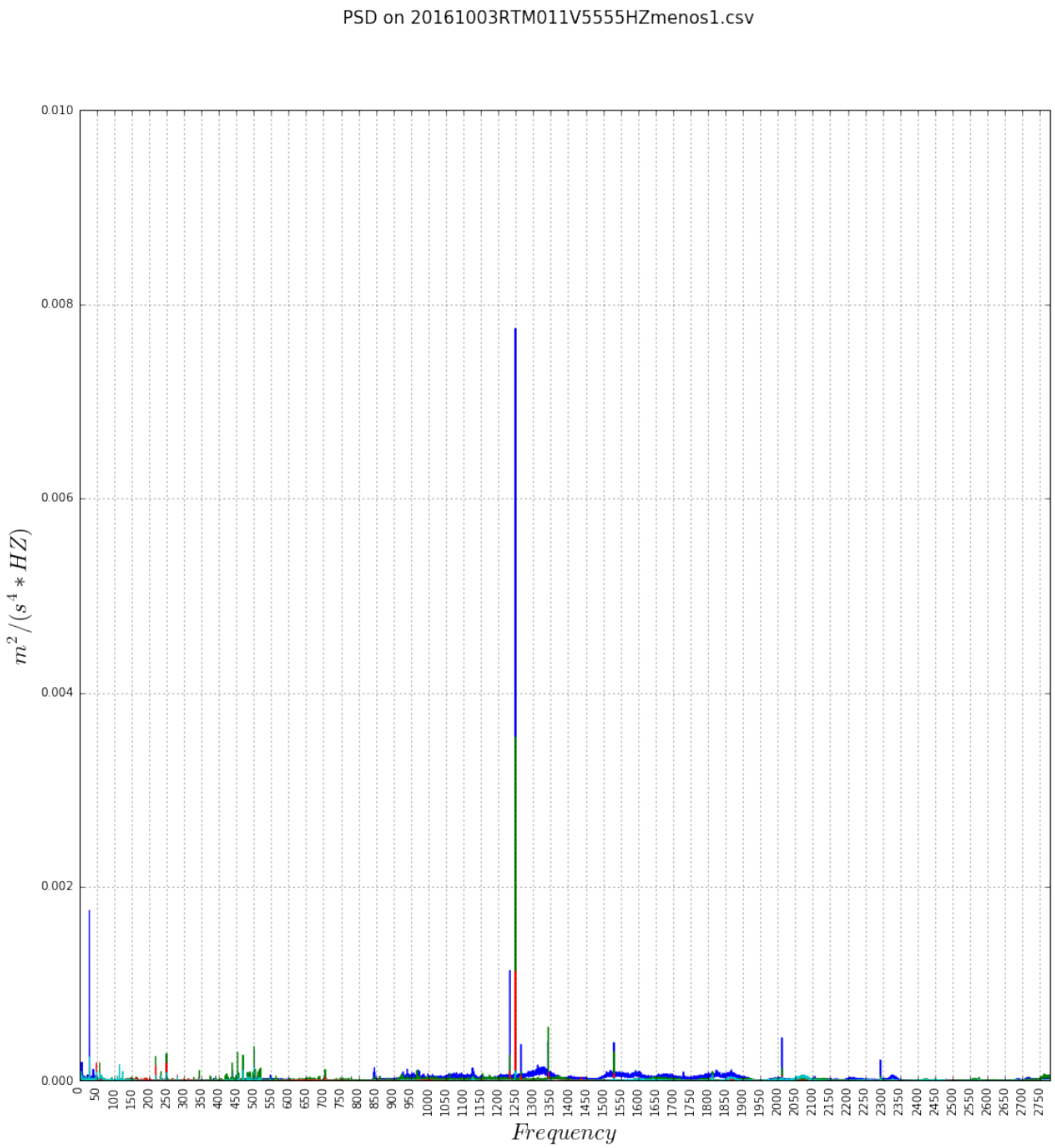
```
Interval Found ... Interval Found ... Interval Found ... Interval Found ... Interval Found ... Interval

total ranges found:  47
Deleting ranges with less than 39996 samples
final ranges:  9
len of range n°1 : 47423
len of range n°2 : 63107
len of range n°3 : 67871
len of range n°4 : 130389
len of range n°5 : 177247
len of range n°6 : 78263
len of range n°7 : 95377
len of range n°8 : 224117
len of range n°9 : 446892
Final total Samples of len 39996 achived:  29
psdplot1 done
psdplot2 done
```

```
psdplot3 done
psdplot4 done
```

8 PSD plot

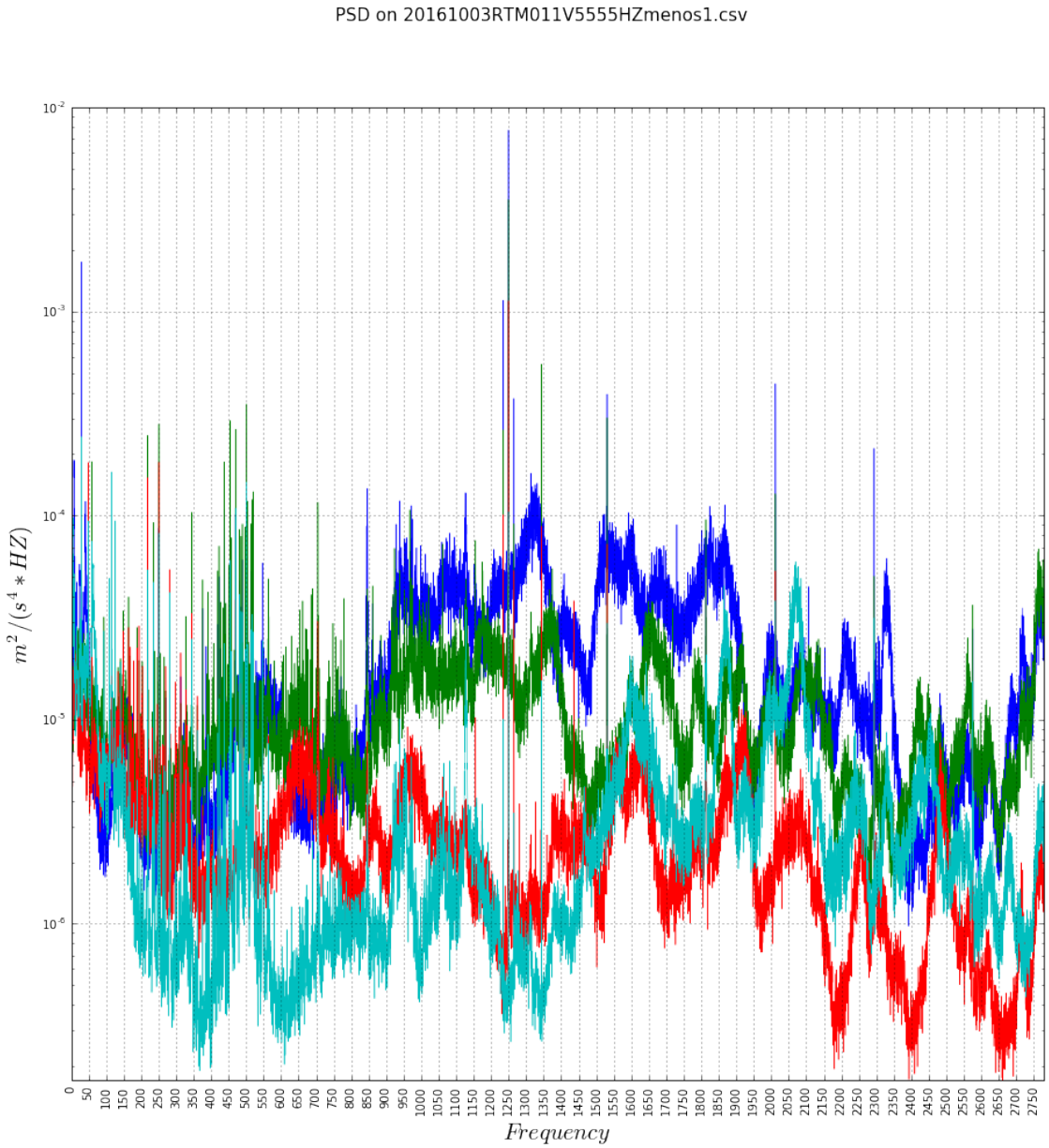
8.1 Linear Plot

```
In [8]: plot_autoo(toplot)
```



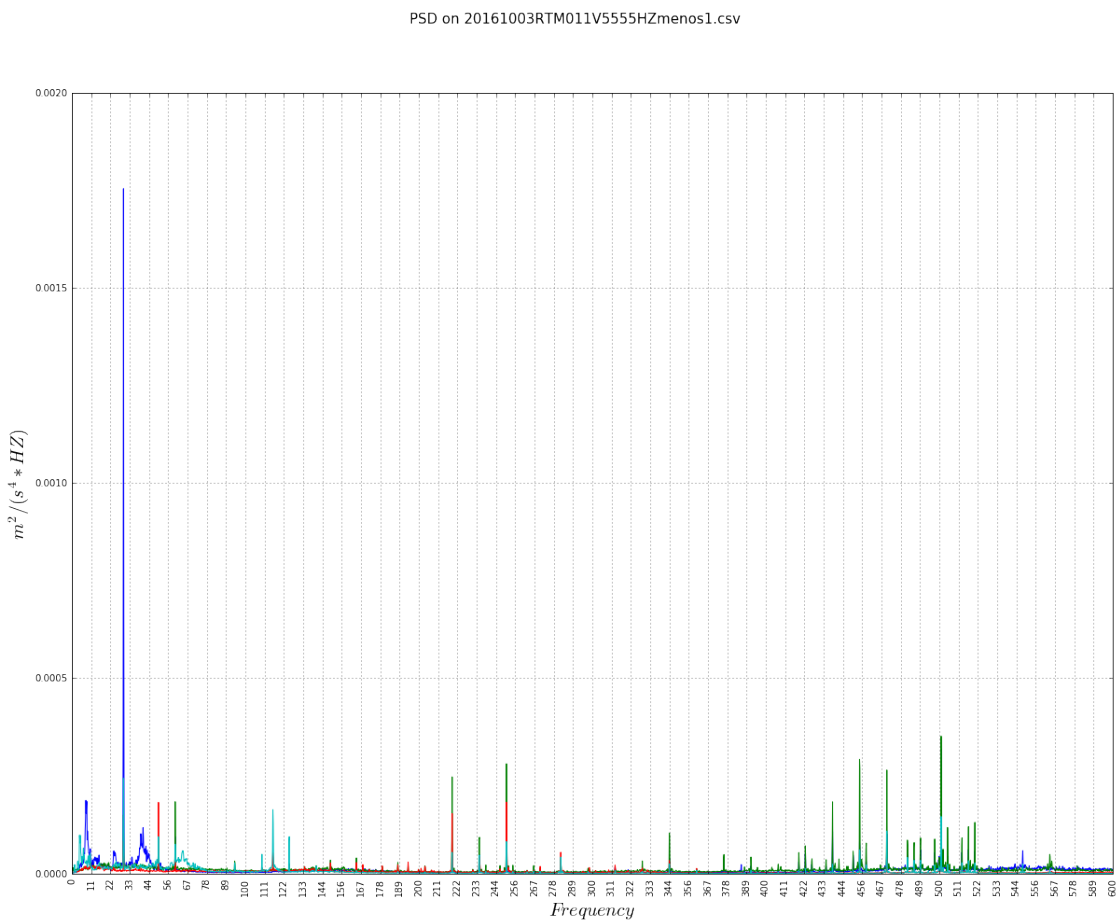
8.2 SemiLog Y Plot

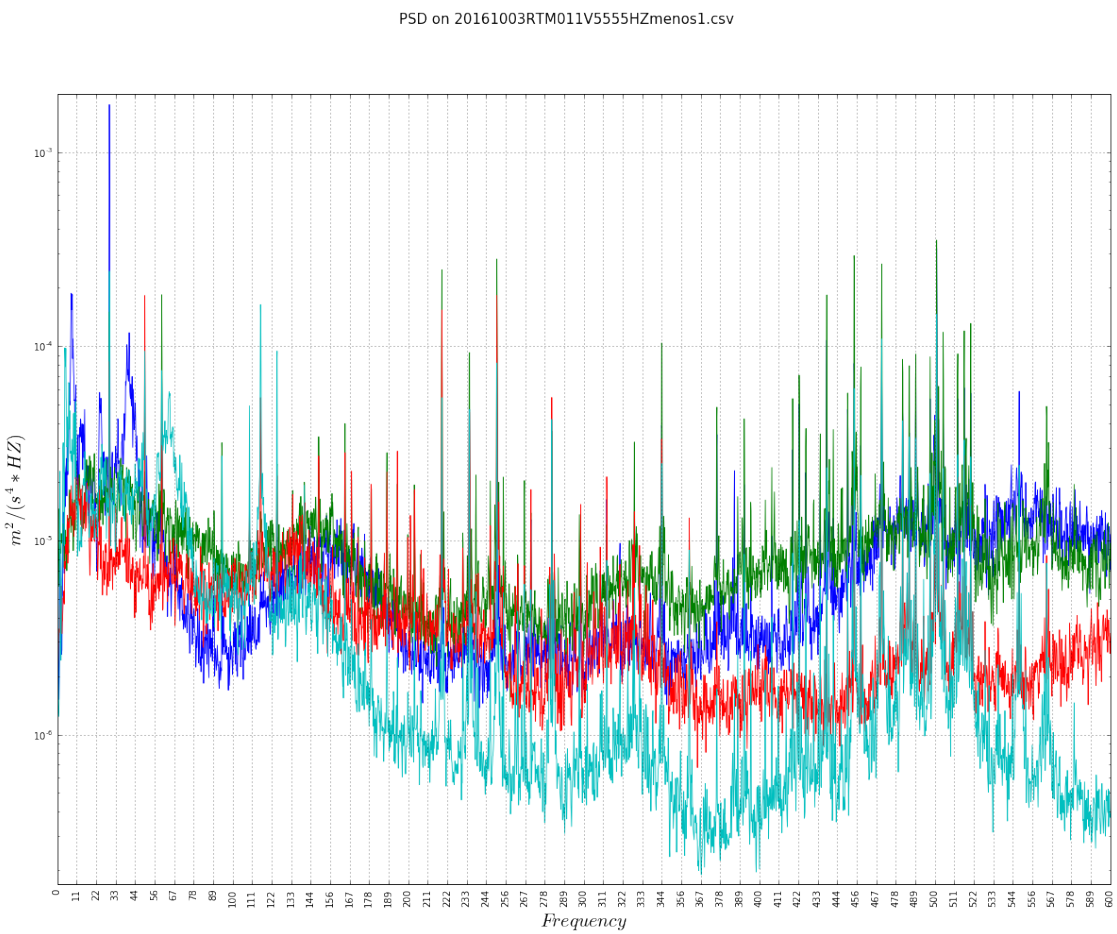
```
In [9]: plot_logg(toplot)
```



8.3 Low Range [0-600] Hz

```
In [12]: plot_manual(toplot,0,600,0,0.002,(20,15))
         plot_manuallog(toplot,0,600,0,0.002,(20,15))
```

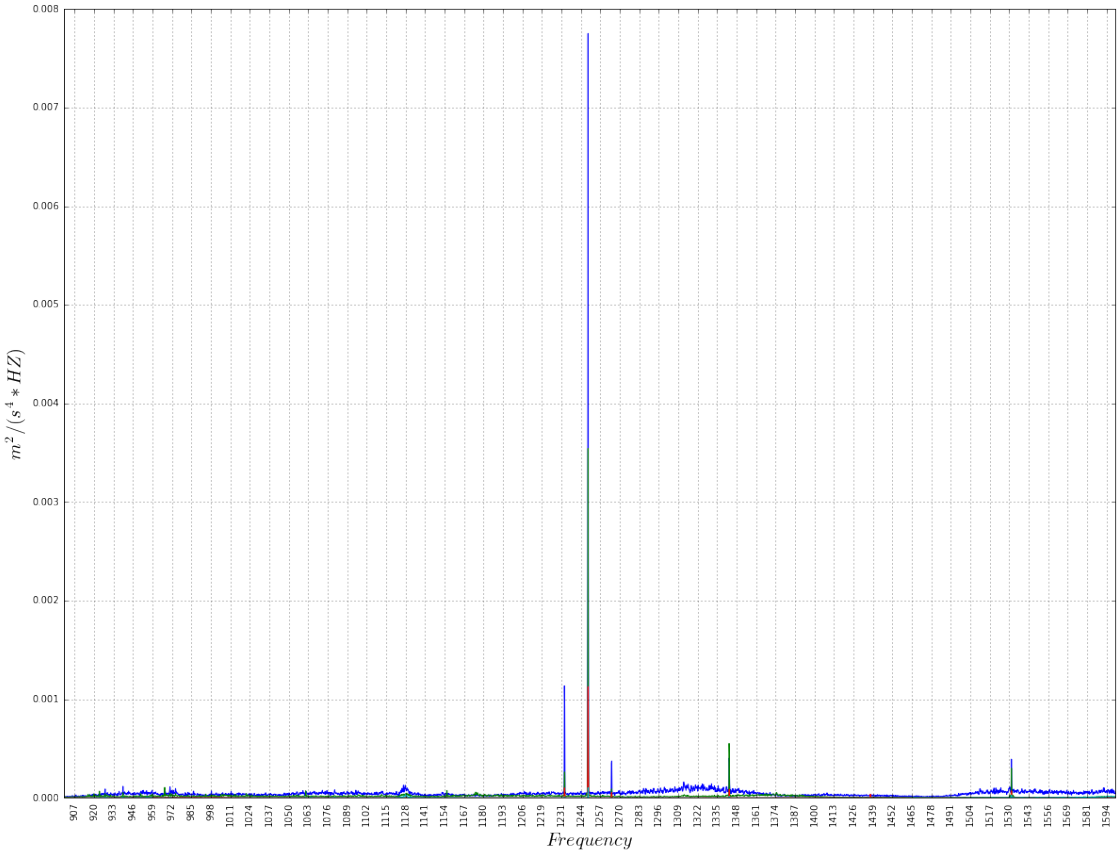

PSD on 20161003RTM011V5555HZmenos1.csv
0.0020
0.0015
0.0010
0.0005
0.0000
$m^2/(s^4 * HZ)$
0 11 22 33 44 56 67 78 89 100 111 122 133 144 156 167 178 189 200 211 222 233 244 256 267 278 289 300 311 322 333 344 356 367 378 389 400 411 422 433 444 456 467 478 489 500 511 522 533 544 556 567 578 589 600
$Frequency$

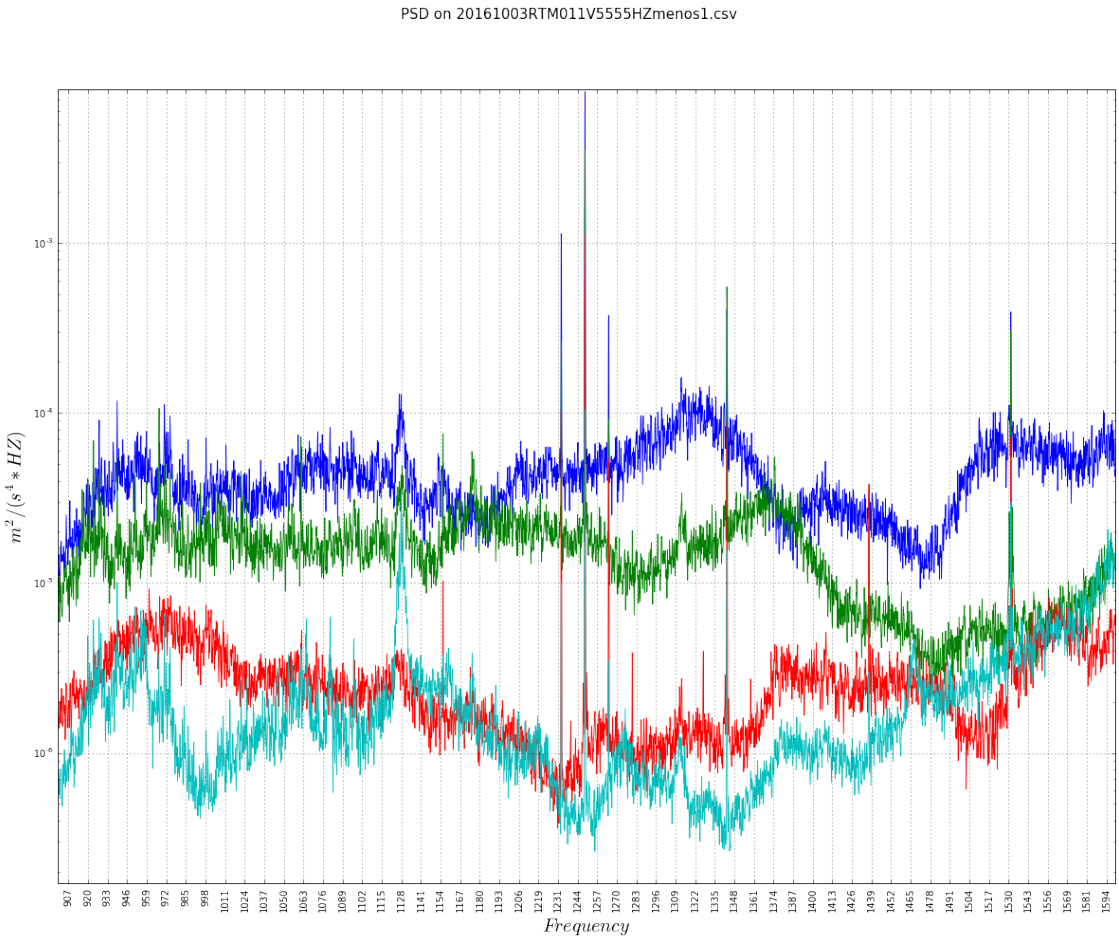


8.4 Middle Range 900-1600] Hz

```
In [13]: plot_manual(toplot,900,1600,0,0.008,(20,15))
         plot_manuallog(toplot,900,1600,0,0.008,(20,15))
```

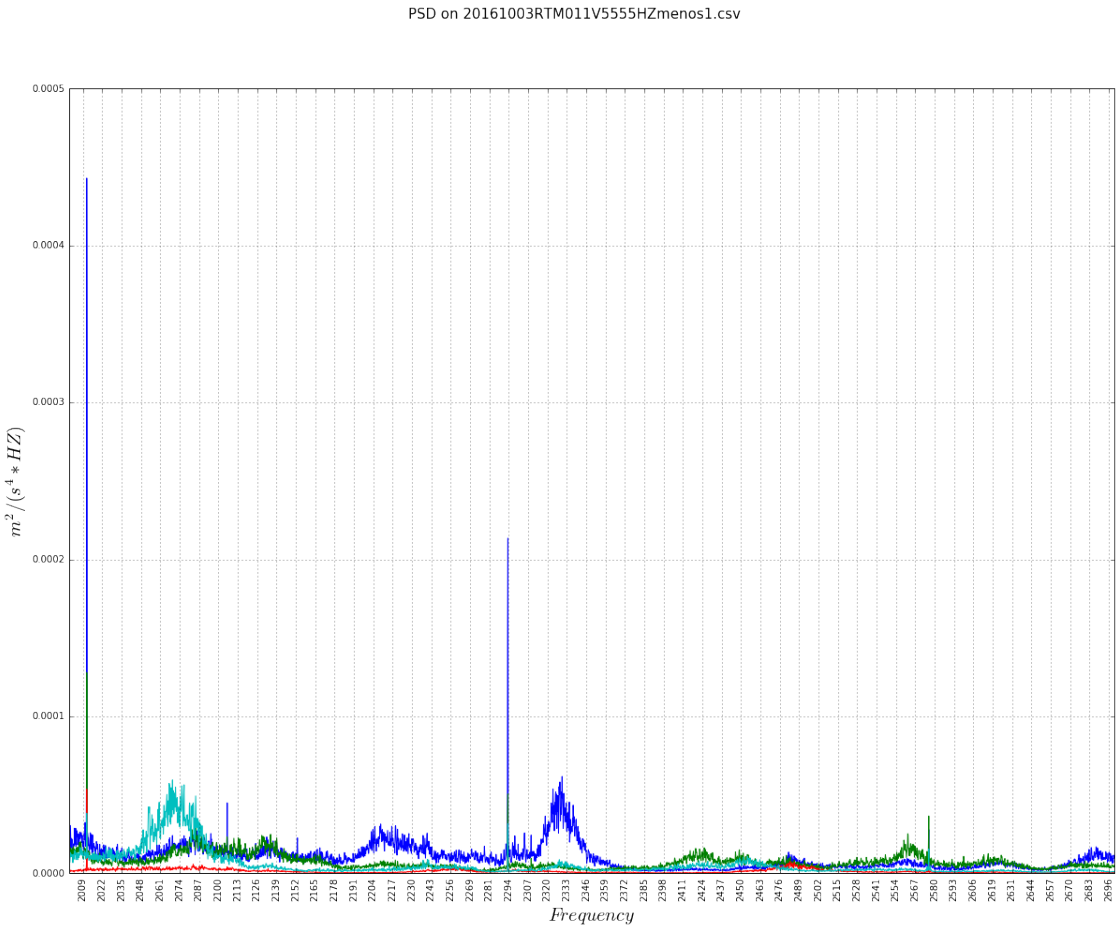
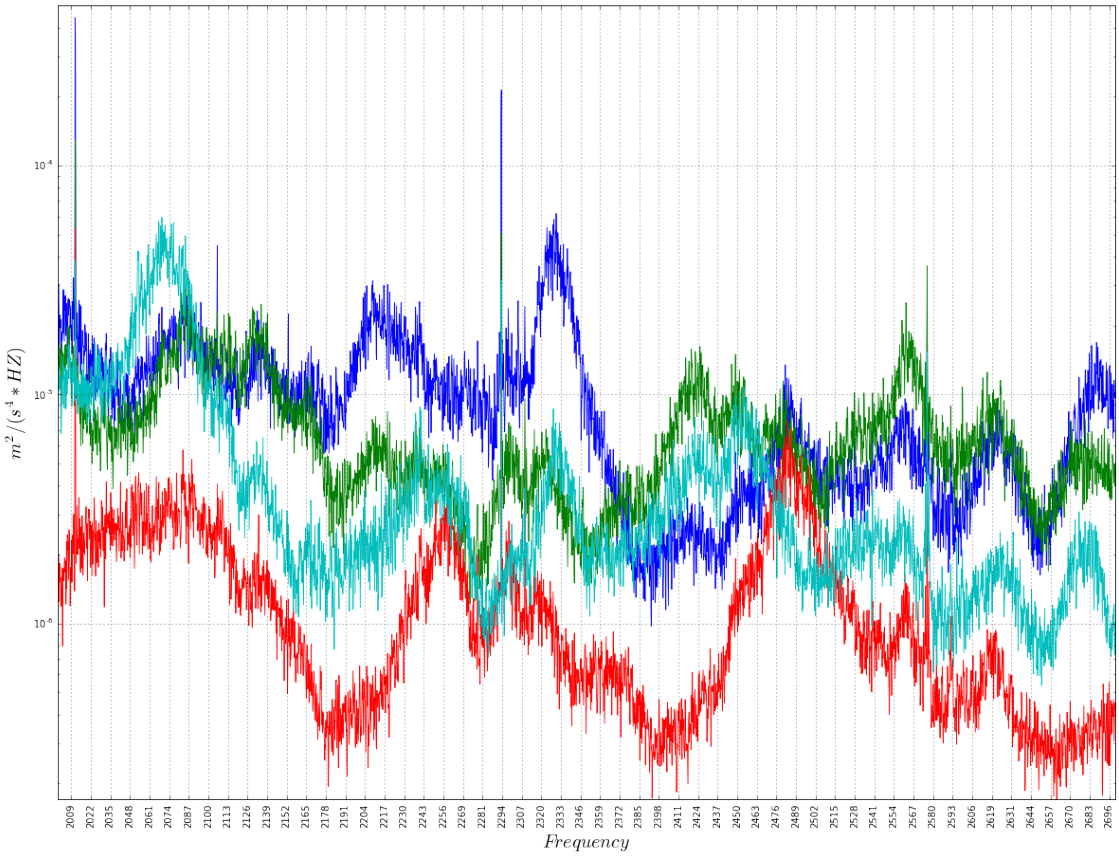
PSD on 20161003RTM011V5555HZmenos1.csv





8.5 High Range [2000-2700] Hz

```
In [15]: plot_manual(toplot,2000,2700,0,0.0005,(20,15))
         plot_manuallog(toplot,2000,2700,0,0.0005,(20,15))
```


PSD on 20161003RTM011V5555HZmenos1.csv
0.0005
0.0004
0.0003
0.0002
0.0001
0.0000
$m^2/(s^4 * HZ)$
2009
2022
2035
2048
2061
2074
2087
2100
2113
2126
2139
2152
2165
2178
2191
2204
2217
2230
2243
2256
2269
2281
2294
2307
2320
2333
2346
2359
2372
2385
2398
2411
2424
2437
2450
2463
2476
2489
2502
2515
2528
2541
2554
2567
2580
2593
2606
2619
2631
2644
2657
2670
2683
2696
$Frequency$

PSD on 20161003RTM011V5555HZmenos1.csv