Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Diagnóstico de fallos en rodamientos

Autor:

María Navarro Carmona

Tutor:

Carlos Navarro Pintado

Profesor titular

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

1. Introducción. 7
2. Objetivo del proyecto. 12
3. Transformada de Fourier. 13
4. Descripción del equipo experimental. 15
4.1. Banco de ensayos. 15
4.2. Rodamientos. 19
4.3. Velocidades y carga. 20
4.4. Medición de la señal. 20
4.5. Adquisición y almacenamiento de los datos. 21
5. Frecuencia de defecto de los rodamientos. 24
6. Análisis experimental. 25
6.1. Nomenclatura de las señales adquiridas. 25
6.2. Tratamiento de las señales. 25
6.3. Rodamiento en perfecto estado. 26
6.3.1. Rodamiento en perfecto estado a 20 Hz. 26
6.3.2. Rodamiento en perfecto estado a 10 Hz. 35
6.3.3. Rodamiento en perfecto estado a 30 Hz. 40
6.3.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro. 45
6.4. Rodamiento con defecto en pista exterior. 46
6.4.1. Rodamiento con defecto en pista exterior a 20 Hz. 48
6.4.2. Rodamiento con defecto en pista exterior a 10 Hz. 52
6.4.3. Rodamiento con defecto en pista exterior a 30 Hz. 55
6.4.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro. 58
6.5. Rodamiento con defecto en pista interior. 60
6.5.1. Rodamiento con defecto en pista interior a 20 Hz. 61
6.5.2. Rodamiento con defecto en pista interior a 10 Hz. 65
6.5.3. Rodamiento con defecto en pista interior a 30 Hz. 69
6.5.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro. 73
6.6. Rodamiento con defecto en bola. 75
6.6.1. Rodamiento con defecto en bola a 20 Hz. 76
6.6.2. Rodamiento con defecto en bola a 10Hz. 81
6.6.3. Rodamiento con defecto en bola a 30 Hz. 85
6.6.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro. 89
7. Conclusiones. 90
8. Futuros desarrollos. 93

9. Bibliografía.....94
10. Anexo.....95

Los rodamientos son elementos mecánicos presentes en la mayoría de las máquinas rotativas. Su vida útil depende de una serie de factores: la carga, la velocidad de trabajo, la lubricación, el montaje, la temperatura, las fuerzas exteriores causadas por desalineaciones, desequilibrios, etc., de ahí que sea prácticamente imposible determinar su duración por métodos analíticos. La importancia y criticidad de estos elementos hace necesaria la utilización de técnicas modernas de mantenimiento predictivo (basadas en el análisis de vibraciones) que contribuyan a un mejor reconocimiento de su estado y, por lo tanto, de la disponibilidad de las máquinas rotativas en las que están instalados.

El estudio espectral y de la onda en el tiempo es determinante a la hora de diagnosticar un deterioro de un rodamiento permitiéndonos, por comparación de la evolución de las amplitudes espectrales, llegar a predecir el grado de deterioro y planificar su cambio con la suficiente antelación.

Los rodamientos están formados por varios componentes claramente diferenciados: pista interior, bolas o rodillos, jaula y pista exterior. El deterioro de cada uno de estos elementos generará una o varias frecuencias características en los espectros de frecuencia que nos permitirán una rápida y fácil identificación. Las cuatro posibles frecuencias de deterioro de un rodamiento son:

- BPFO (Ball pass frequency of the outer race), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo.

- BPFI (Ball pass frequency of the inner race), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo.

- BSF (Ball spin frequency), es la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Físicamente es el número de giros que realiza una bola del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

- FTF (Fundamental train frequency), es la frecuencia de rotación de la jaula que contiene los elementos rodantes. Físicamente es el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

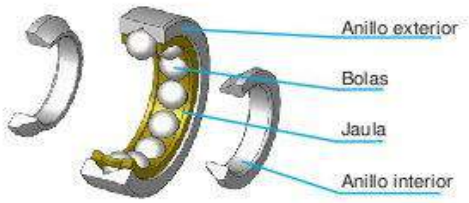


Figura 1.1. Partes de un rodamiento.

Cada rodamiento tiene unas características geométricas propias a partir de las cuales podemos determinar sus frecuencias de deterioro. Estas frecuencias aparecerán en las firmas espectrales cuando el rodamiento está deteriorado, y las fórmulas para su cálculo se muestran a continuación.

$$BPFO = RPM\frac{N_b}{2}\left(1 - \frac{B_D}{P_D}\cos(\beta)\right) \tag{1.1}$$

$$BPFI = RPM\frac{N_b}{2}(1 + \frac{B_D}{P_D}\cos(\beta)) \tag{1.2}$$

$$BSF = RPM\frac{P_D}{2B_D}\left[1 - (\frac{B_D}{P_D}\cos(\beta))^2\right] \tag{1.3}$$

$$FTF = RPM\frac{1}{2}\left[1 - \frac{B_D}{P_D}\cos(\beta)\right] \tag{1.4}$$

Siendo N_b el número de bolas del rodamiento, B_D el diámetro de la bola, P_D diámetro primitivo y β el ángulo de contacto, que en rodamientos de bolas su valor es cero. El diámetro primitivo será la media aritmética de los diámetros de la pista exterior e interior.

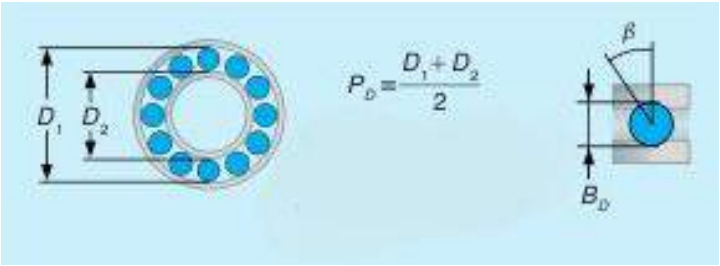


Figura 1.2. Dimensiones principales de un rodamiento.

Para la mayoría de los rodamientos estas frecuencias de deterioro no serán números enteros, por lo que la vibración dominante, cuando exista un defecto de alguno de los componentes del rodamiento, será no síncrona (no coincidente con armónicos de la frecuencia de giro).

Cuando alguno de los componentes del rodamiento está dañado distinguiremos en el espectro de frecuencias la frecuencia fundamental correspondiente al elemento dañado, acompañada siempre de armónicos.

En aquellos casos en que se desconozcan los parámetros físicos del rodamiento, hay unas fórmulas experimentales bastante aproximadas que nos permitirán determinar las frecuencias de deterioro de las pistas y de la jaula de un rodamiento en función del número de elementos rodantes y la velocidad de giro:

$$FTF = 0{,}4 * RPM \tag{1.5}$$

$$BPFO = 0{,}4 * N_b * RPM \tag{1.6}$$

$$BPFI = 0{,}6 * N_b * RPM \quad (1.7)$$

A continuación se presentan los defectos más típicos de rodamientos y su identificación en el espectro de frecuencias.

- **Defectos en la pista interior**. Los espectros presentan varios picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista interior (normalmente entre 8 y 10 armónicos de la BPFI) modulados por bandas laterales a 1x RPM.

Figura 1.3. Espectro típico en rodamiento con defectos en la pista interior

- **Defectos en la pista exterior**. Los espectros se caracterizan por presentar picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior (entre 8 y 10 armónicos de la BPFO).

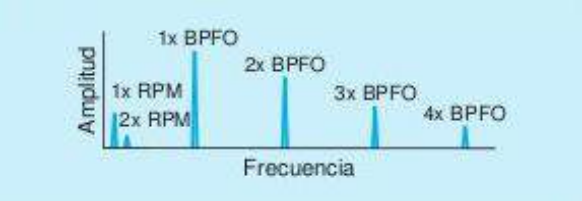


Figura 1.4. Espectro típico en rodamiento con defectos en la pista exterior.

- **Defectos en bolas o rodillos**. Se caracterizan por presentar en los espectros las frecuencias de deterioro de los elementos rodantes (BSF). En la mayoría de las ocasiones, el armónico de mayor amplitud nos suele indicar el número de bolas o rodillos deteriorados. Normalmente van acompañadas por defectos en pista.

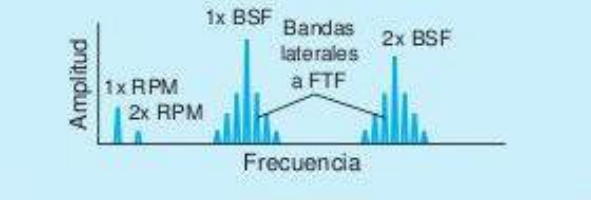


Figura 1.5. Espectro típico en rodamiento con defectos en bolas.

- **Deterioro de la jaula**. Generalmente un defecto en jaula va acompañado por defectos en pistas y las FTF suelen modular a estas frecuencias de deterioro de pista como sumas y/o diferencias de frecuencias.

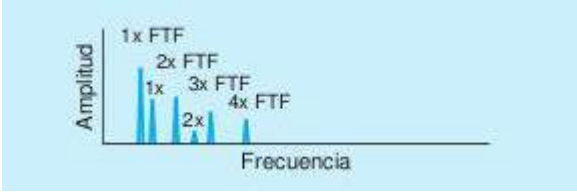


Figura 1.6. Espectro típico en rodamiento con defectos la jaula.

- **Defectos de múltiples componentes**. Es bastante frecuente encontrar rodamientos con múltiples componentes deteriorados, en cuyo caso aparecerán todas las frecuencias de deterioro y sus armónicos correspondientes.

El deterioro en los rodamientos presenta varias fases. A continuación se muestran dichas fases así como el espectro de frecuencias.

- **Fase 1**: En esta fase, el rodamiento se encuentra en perfecto estado con lo cual en el espectro sólo se aprecian la frecuencia de giro y posiblemente algunos de sus armónicos.

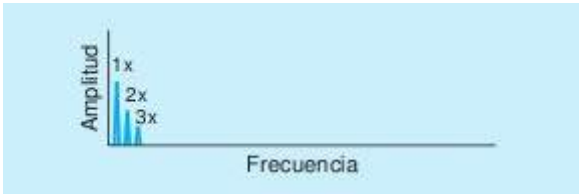


Figura 1.7. Espectro de la fase 1 de deterioro.

- **Fase 2**: Aparecen lecturas de vibración a alta frecuencia, las cuales constituyen el primer indicador del inicio del deterioro de un rodamiento. Dichas lecturas se deben a impactos, provocados por un pequeño defecto, que suelen excitar las frecuencias naturales de las pistas de rodadura a alta frecuencia. Estas medidas se realizan en el espectro de aceleración en una banda comprendida entre 1 kHz y 20 kHz.

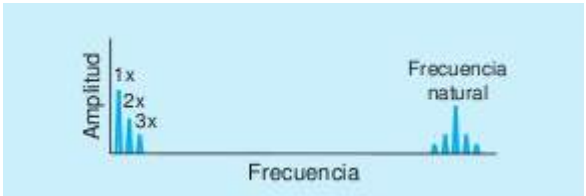


Figura 1.8. Espectro de la fase 2 de deterioro.

- **Fase 3**: Aparecen las frecuencias características de defectos y sus armónicos. A medida que el daño progresa se incrementa la magnitud de los armónicos de las frecuencias de fallo y aumenta la aceleración a alta frecuencia. El seguimiento de su evolución nos permite planificar su cambio con la suficiente antelación.

Figura 1.9. Espectro de la fase 3 de deterioro.

- **Fase 4**: Esta es la fase final del rodamiento. Cuando éste se encuentra muy dañado aparecen síntomas similares a holguras y roces. Aparece además, ruido de fondo detectable en aceleración a alta frecuencia. Aumenta la amplitud de 1x RPM y sus armónicos y disminuyen o desaparecen las frecuencias de fallo enmascaradas en el ruido de fondo.

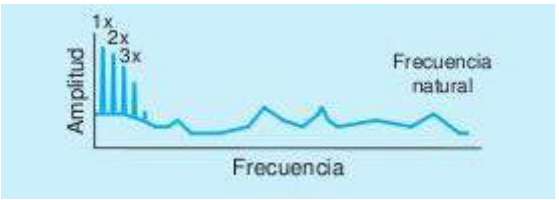


Figura 1.10. Espectro de la fase 4 de deterioro.

Este proyecto se encuadra en el mantenimiento de los rodamientos de las máquinas y se pretende estudiar los niveles de vibración de los mismos con y sin defectos a diferente velocidad de giro. Se realizará un análisis con la transformada de Fourier, para a continuación hacer un estudio estadístico de los niveles de vibración obtenidos en los distintos niveles de velocidad.

La teoría de Fourier se basa en la idea de que cualquier señal periódica puede descomponerse en una suma de senos. Esta suma de senos se denomina serie de Fourier, la descomposición en serie de Fourier de una señal cualquiera facilita en gran medida su análisis y es una técnica muy utilizada en el tratamiento de señales.

Cuando la señal es una función no periódica entra en escena la transformada de Fourier. Es evidente que cualquier función no periódica puede tratarse como una función periódica de periodo infinito, es en esta idea donde se sustenta la teoría de la transformada de Fourier, que nos permitirá descomponer nuestra señal en una suma de senos con diferentes frecuencias. Con la transformada de Fourier podemos pasar del dominio temporal al dominio en frecuencia y viceversa, mediante las siguientes ecuaciones:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t}\, dt \tag{3.1}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t}\, d\omega \tag{3.2}$$

Donde F es la señal $f(t)$ en el dominio de la frecuencia, f la señal en el dominio del tiempo, ω la frecuencia y t el tiempo.

De esta manera disponemos de dos formas diferentes de representar las señales, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Ambas representaciones disponen de la misma información sobre la señal, siendo los enfoques completamente diferentes.

En la siguiente figura se muestran ambas representaciones para distintas señales. Las dos primeras señales son dos senos, la frecuencia del segundo es superior a la del primero, como se puede observar en el análisis en frecuencia. La tercera señal es la suma de las dos primeras y tras aplicar la transformada de Fourier se observan las frecuencias de ambos armónicos, cuando tratamos con señales más complicadas compuestas por una gran cantidad de armónicos, el análisis en el dominio de la frecuencia nos permite distinguir las frecuencias de los armónicos principales, labor que sería casi imposible si sólo dispusiéramos del análisis temporal.

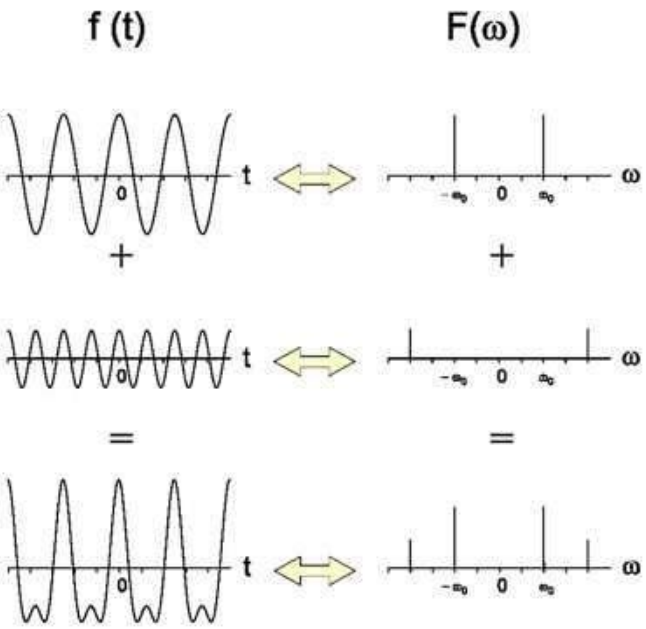


Figura 3.1. Señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

4.1. Banco de ensayos.

Se utiliza el banco de ensayos que diseñó y construyó un antiguo alumno en su Proyecto Fin de Carrera en Junio de 2006. Está compuesto de un motor eléctrico (motor trifásico asíncrono de 1,5 kW), una mesa soporte y bancada, dos pistones de aire comprimido para aplicar la carga radial y la carga axial (siendo la máxima carga aplicable 6 bares de presión), un circuito neumático y un cuadro eléctrico que incluye un variador de frecuencia, la lectura de los manómetros y el circuito de control neumático.

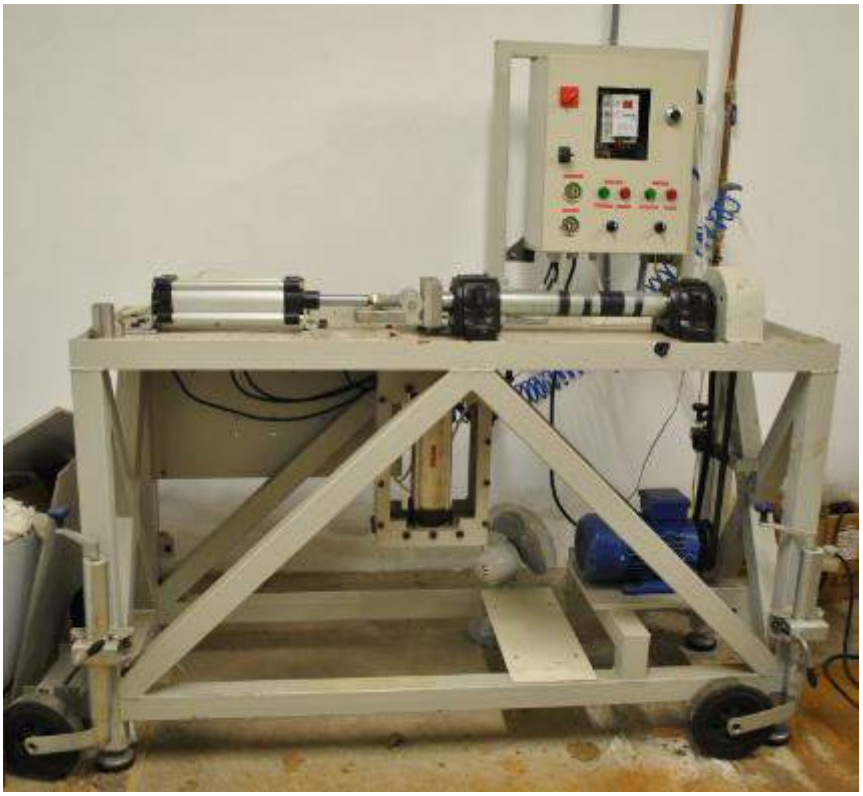


Figura 4.1.1. Banco de ensayos.

Figura 4.1.2. Detalle del cuadro eléctrico.

Se explica a continuación el funcionamiento del banco de ensayos. En primer lugar se conecta el cuadro eléctrico y se abre la llave del aire comprimido. Una vez abierta dicha llave se aplica la carga radial y/o axial poniendo los interruptores en posición de carga como muestra la siguiente imagen.

Figura 4.1.3. Posición de los interruptores para aplicar carga radial y axial.

Al accionar dichos interruptores los pistones se desplazan hasta que llegan a la jaula. En ese momento se vuelven a poner en posición (0) y se puede ver la lectura de los manómetros. En la siguiente imagen se ve que la presión aplicada tanto de forma radial como axial es de 6 bares.

Figura 4.1.4. Lectura de los manómetros (6 bares)

Para ajustar la presión aplicada se gira la llave correspondiente del circuito neumático, siendo la máxima presión aplicable de 6 bares. A continuación se ve dicho circuito y un detalle de una de las llaves.

Figura 4.1.5. Circuito neumático.

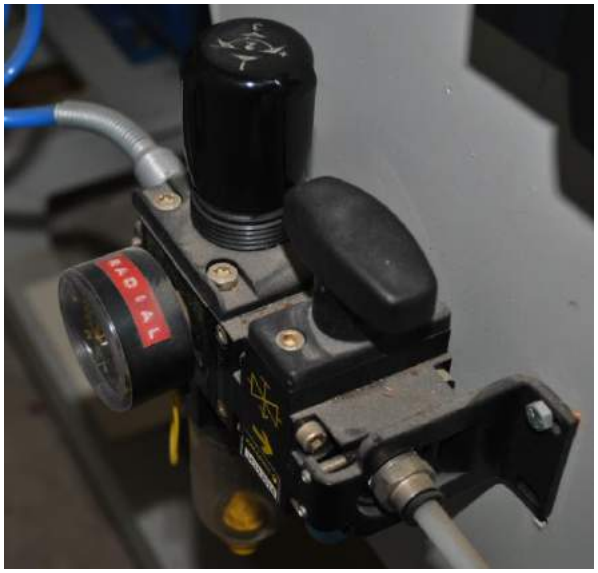


Figura 4.1.6. Detalle llave para regular la presión radial.

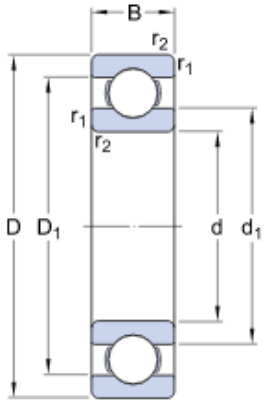
Una vez ajustada la presión aplicada, se pone en marcha el motor girando el variador de frecuencia hasta alcanzar la frecuencia de giro deseada. En la siguiente imagen se muestra dicho variador cuando el motor gira a 10 Hz.

Figura 4.1.7. Variador de frecuencia.

Cuando se termina el trabajo se deshacen los pasos anteriores. En primer lugar se para el motor girando el variador de frecuencia, seguidamente se elimina la carga poniendo los interruptores en posición de descarga, se apaga el cuadro eléctrico y se cierra la llave del aire comprimido.

4.2. Rodamientos.

Se usan rodamientos SKF 61806, ya que la jaula disponible está diseñada para este tipo de rodamiento. En la siguiente figura se muestra dicho rodamiento, así como sus dimensiones.



d		30	mm
D		42	mm
B		7	mm
d_1	≈	33.7	mm
D_1	≈	38.35	mm
$r_{1,2}$	min.	0.3	mm

Figura 4.2.1. Rodamiento SKF 61806.

Nótese que el diámetro interior ($d = 30mm$) es el diámetro del eje.

Se utilizan cuatro rodamientos diferentes. Uno en perfectas condiciones, y los otros tres con un defecto localizado en pista exterior, pista interior y bola, respectivamente.

Figura 4.2.2. Rodamientos a ensayar en perfecto estado.

4.3. Velocidades y carga.

Las velocidades de giro estudiadas son 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz, que corresponden a 600 rpm, 1200 rpm y 1800 rpm respectivamente.
Las cargas aplicadas son 3 y 6 bares de presión de manera axial y radial simultáneamente. Traducidos los valores de presión a fuerza son 1360.7 N y 2721.4 N respectivamente.

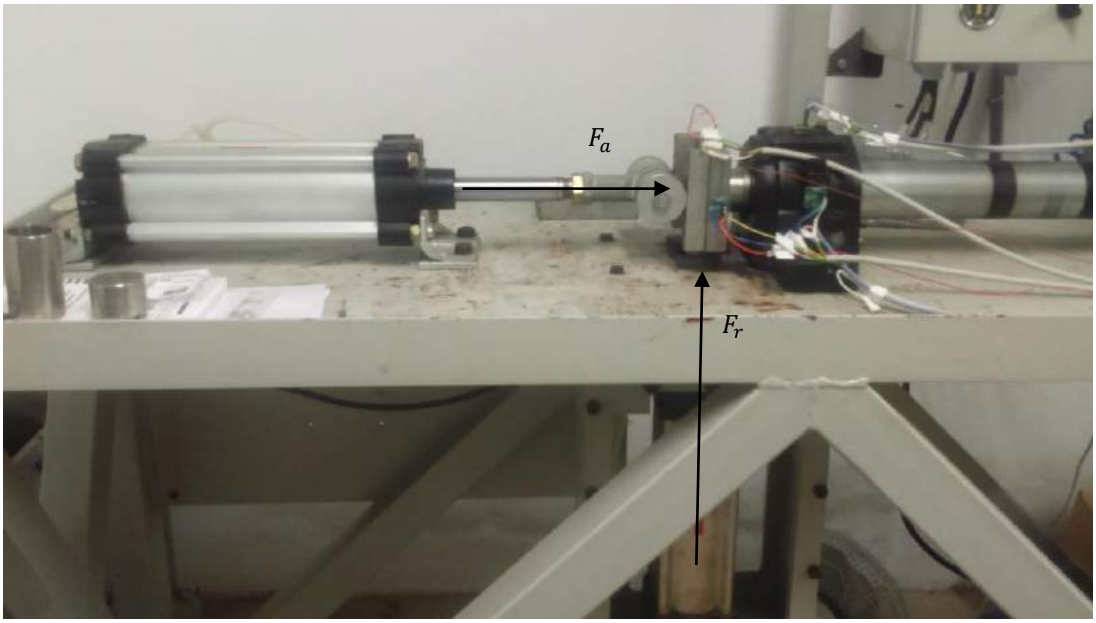


Figura 4.3.1. Aplicación de las cargas radial (F_r) y axial (F_a).

4.4. Medición de la señal.

Para la toma de la señal se utilizan cuatro acelerómetros ADXL 203, que tienen un ancho de banda de 2500 Hz. Dichos acelerómetros se compraron con la tarjeta de evaluación incorporada (ADXL 203EB), que filtra la señal y reduce el ruido. Dichas tarjetas estaban provista de tres condensadores, de los cuales se tuvieron que modificar dos (C2 y C3), ya que su capacidad era de $0.1\ \mu F$ y ese valor proporcionaba un ancho de banda insuficiente. Se cambiaron por otros del mismo tipo pero de $0.002\ \mu F$ de capacidad.

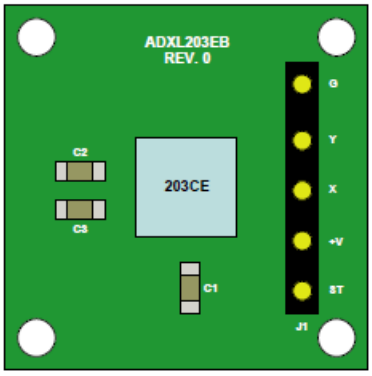


Figura 4.4.1. Acelerómetro ADXL 203EB.

Dichos acelerómetros miden dos dimensiones, X e Y, por tanto para medir en las tres dimensiones se necesitan dos. Se utilizan cuatro porque se miden las vibraciones en la jaula, así como en el eje.

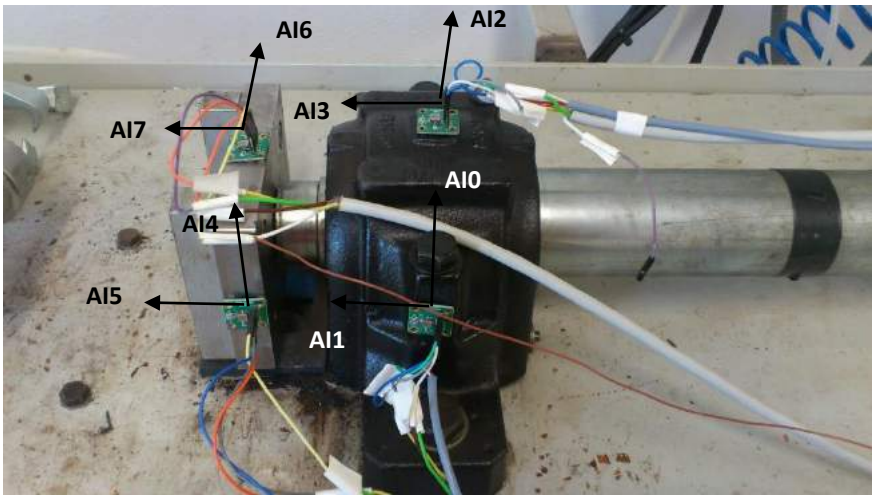


Figura 4.4.2. Posición de los 4 acelerómetros en el banco de ensayos.

4.5. Adquisición y almacenamiento de los datos.

Para la adquisición de los datos se utilizó una tarjeta NI USB-6211 que dispone de entradas tanto analógicas como digitales. Para este proyecto sólo se utilizaron las analógicas debido a la señal adquirida. La tarjeta cuenta con ocho entradas analógicas, las mismas que se necesitaban. También dispone de salida analógica con un rango de [-10,10] V, que se utilizó para alimentar los acelerómetros.

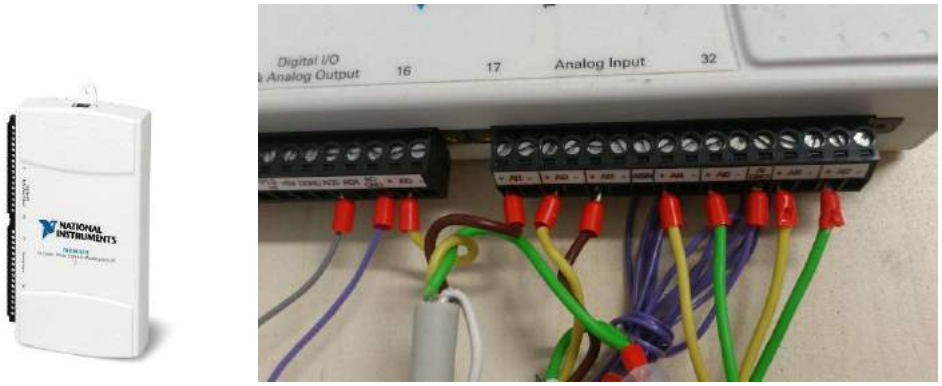


Figura 4.5.1. Tarjeta de adquisición NI USB-6211 y sus conexiones con los acelerómetros.

Para el procesamiento y almacenamiento de las señales se utilizó un ordenador portátil. Que se conectó con la tarjeta de adquisición a través de un puerto USB.

El programa de adquisición se desarrolló con el Software Labview, que representa gráficamente las señales tomadas en los ensayos y es capaz de realizar el procesado de las señales adquiridas, mostrando la transformada de Fourier de dichas señales. Dichos datos se almacenaban para, posteriormente, ser tratados. A continuación se muestra el programa utilizado.

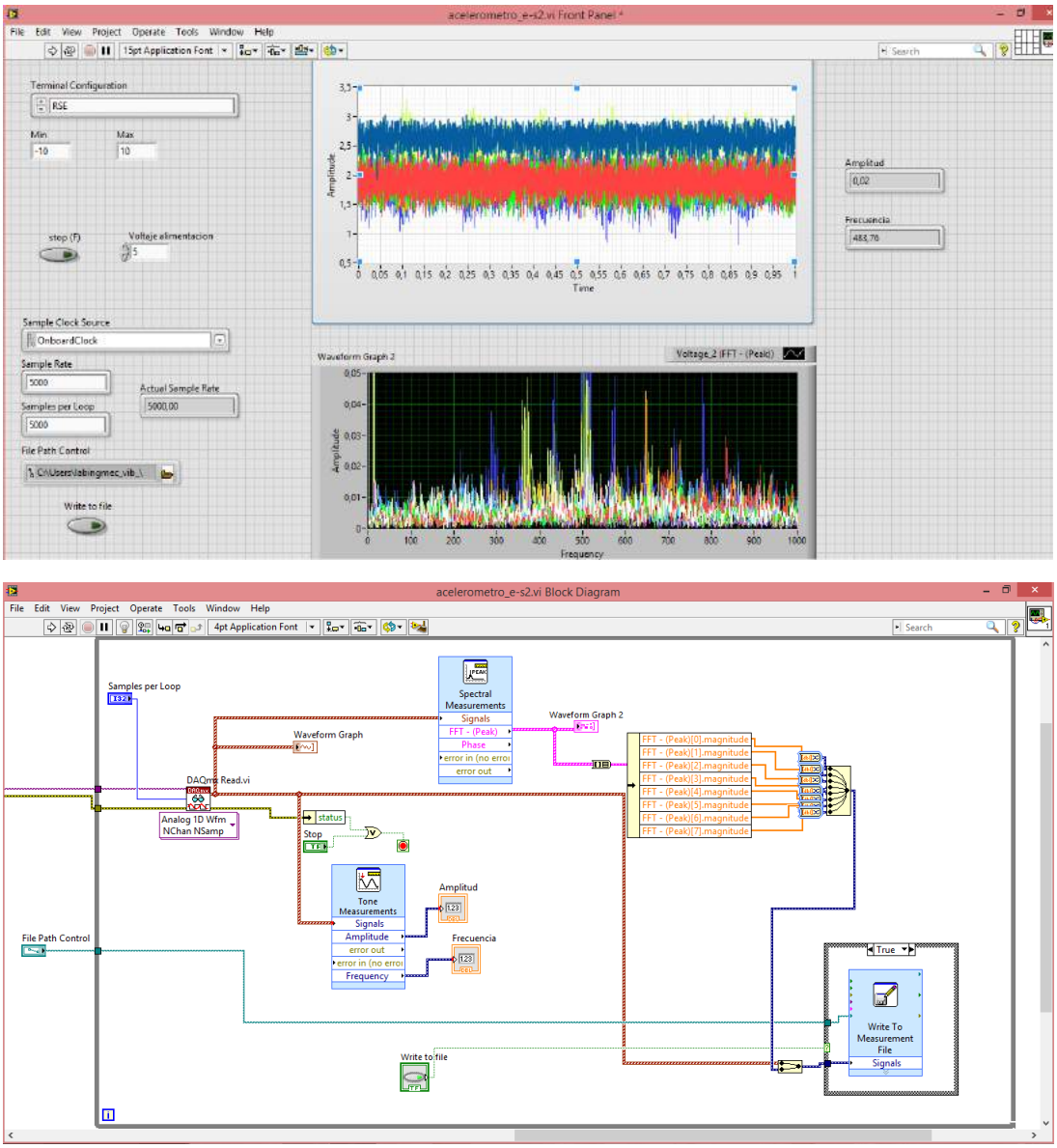


Figura 4.5.2. Programa de adquisición de datos Labview.

Las frecuencias de fallo de los rodamientos varían en función del tipo de rodamiento y de la velocidad de giro. Con los valores del rodamiento SKF 61806 y con las ecuaciones (1.1), (1.2), (1.3) y (1.4) se obtienen las frecuencias para cada tipo de fallo y cada velocidad.

ω (Hz)	FTF (Hz)	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	BSF (Hz)
10	4.58	77.92	92.08	59.63
20	9.17	155.84	184.16	119.25
30	13.75	233.76	276.24	178.88

En la introducción se comentaba que existían unas ecuaciones aproximadas para calcular las frecuencias de deterioro de las pistas y de la jaula de un rodamiento en función del número de elementos rodantes y la velocidad de giro cuando se desconocieran los parámetros del rodamiento. Se muestran a continuación los valores obtenidos con las ecuaciones (1.5), (1.6) y (1.7).

ω (Hz)	FTF (Hz)	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)
10	4	58	102
20	8	136	204
30	12	204	306

Se puede ver la diferencia entre las teóricas y las aproximadas. Siendo los valores obtenidos para la FTF los que más se parecen. En el caso de la BPFO las ecuaciones aproximadas proporcionan unos valores inferiores a los teóricos y, por el contrario, para la BPFI los valores aproximados son mayores que los teóricos.

En este capítulo se realizará un estudio de las señales obtenidas en los ensayos descritos en el capítulo 2. Las señales almacenadas durante los ensayos fueron las siguientes:

- Se ensayaron 4 rodamientos: uno en perfecto estado y otros tres con defectos localizados en pista exterior, pista interior y bola.

- Cada rodamiento se ensayó 10 veces a 3 velocidades distintas del eje de giro: 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz.

- Cada una de las condiciones anteriores se ensayó para dos configuraciones de carga distintas: 3 y 6 bares de presión.

Cada ensayo tuvo una duración de cincuenta segundos, lo que hace que a una frecuencia de muestreo de 5000 Hz cada señal estuviese compuesta por 250000 datos. La razón de realizar una medición de cincuenta segundos en lugar de cinco segundos, que sería suficiente para observar las vibraciones, es que a la hora de proceder al análisis estadístico cada ensayo equivale a diez ensayos de cinco segundos, contando así con mayor cantidad de muestras.

Como se comenta anteriormente, a la tarjeta llegan ocho entradas analógicas. Dos (ejes X e Y) por cada acelerómetro. Los datos de guardan en el ordenador a través del Labview en forma de matrices de 250000 x 8. Dicho programa también realiza la Transformada de Fourier, almacenando los resultados en matrices de 125000 x 8.

El análisis experimental se llevará a cabo con los datos de la Transformada de Fourier, para lo que se utilizará la teoría expuesta en el primer capítulo.

6.1. Nomenclatura de las señales adquiridas.

La nomenclatura utilizada para nombrar las señales es la misma para las tres velocidades estudiadas. Cada ensayo proporciona una matriz llamada AI_i con los valores de las vibraciones y otra matriz T_i con los valores de la transformada. El índice i va de 1 a 10, que es el número de ensayos.

6.2. Tratamiento de las señales.

El tratamiento de las señales se realiza con Matlab y se explica a continuación. En primer lugar se realiza la media de los diez ensayos para eliminar ruido y se representan los diez espectros de los 50 segundos sobre la misma gráfica (dichas gráficas se llaman Tj, variando el índice j de 0 a 7, que son los ocho canales). Seguidamente, con el fin de eliminar el máximo ruido posible, se realiza la media de los diez espectros, obteniendo una gráfica de una sola curva para cada canal. Dichas gráficas se llaman Tj_m.

6.3. Rodamiento en perfecto estado.

Los canales de los acelerómetros que están en la jaula son AI_4, AI_5, AI_6 y AI_7. Los dos primeros corresponden al acelerómetro que está en posición vertical y los dos últimos al que está horizontalmente.

6.3.1. Rodamiento en perfecto estado a 20 Hz.

En primer lugar se estudia la velocidad de 20 Hz con una presión aplicada de 6 bares. Ejecutando el programa creado en Matlab se obtienen las siguientes gráficas para los canales mencionados arriba.

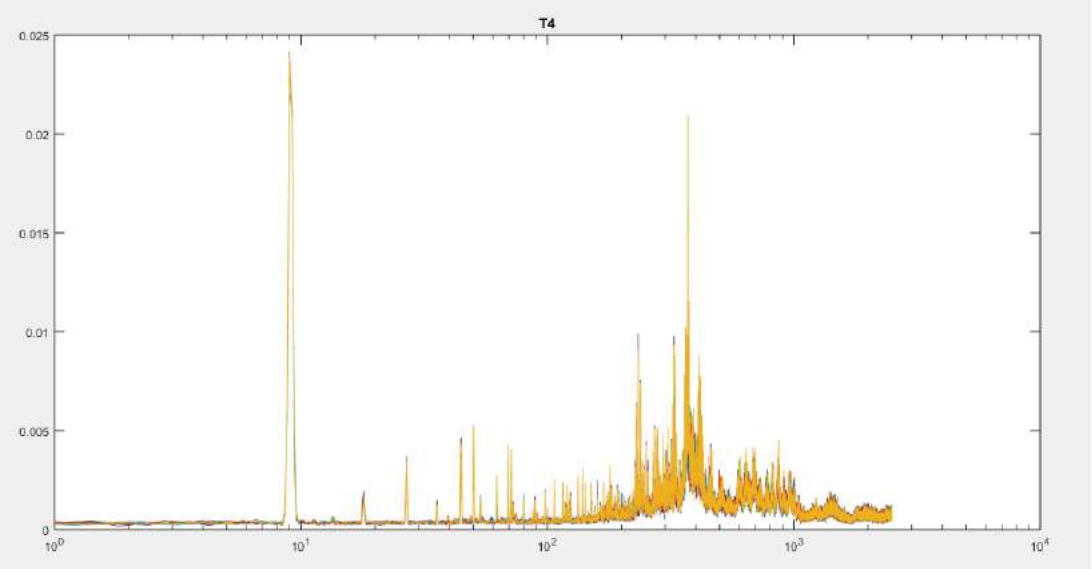


Figura 6.3.1.1. Representación de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 20 Hz).

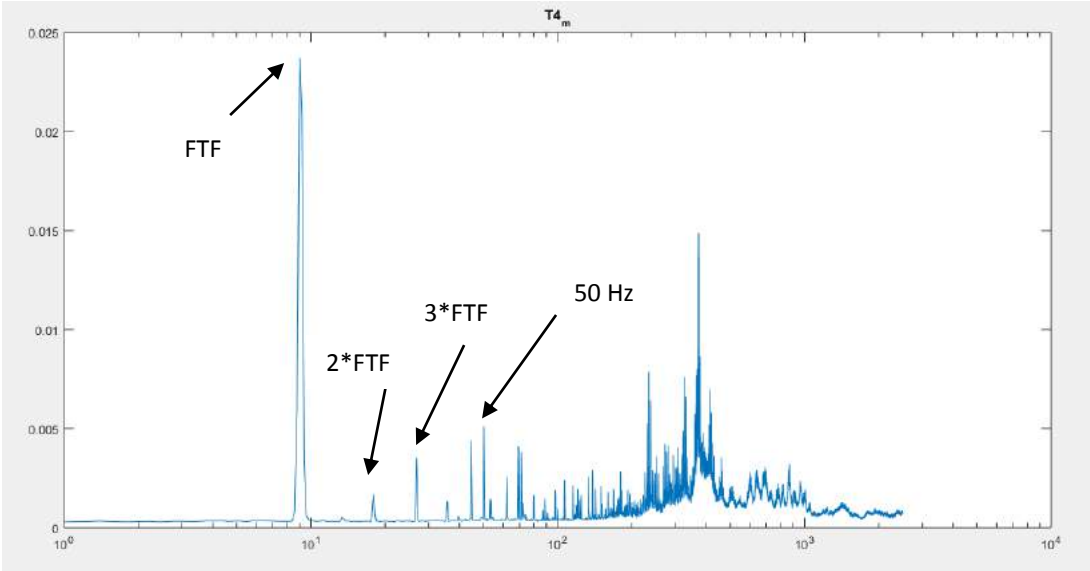


Figura 6.3.1.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 20 Hz).

Se señalan algunos puntos destacados. La FTF teórica para 20 Hz se veía anteriormente que era 9.17 Hz. En este caso, con el cursor del Matlab se comprueba que el punto llamado FTF corresponde al (9, 0.0237), el 2*FTF es el (18, 0.001704) y el 3*FTF el (26.8, 0.003512). También se observa un pico a 50 Hz (50.2, 0.005126), que es la frecuencia de la red.

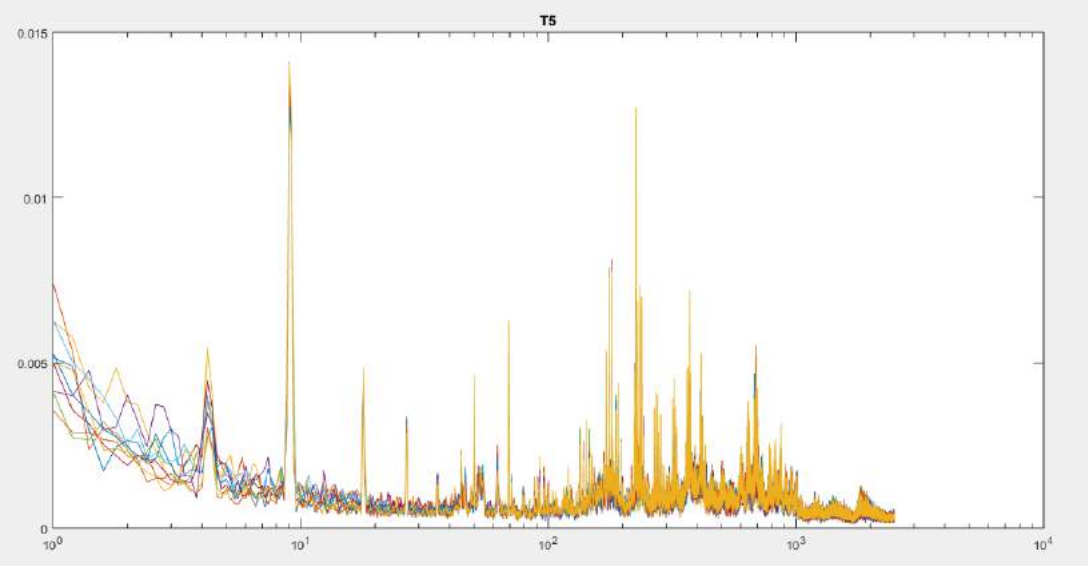


Figura 6.3.1.3. Representación de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 20 Hz).

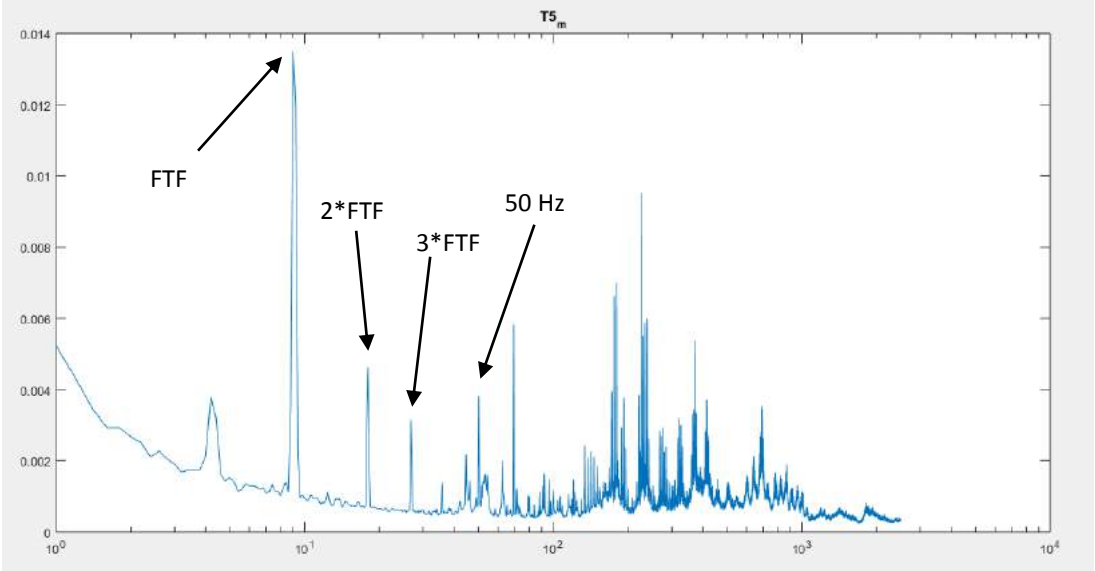


Figura 6.3.1.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 20 Hz).

En este canal los puntos son los siguientes: el FTF es el (9, 0.01348), el 2*FTF es el (18, 0.004628) y el 3*FTF el (26.8, 0.003145). Por último, a la frecuencia de la red está el (50.2, 0.003812).

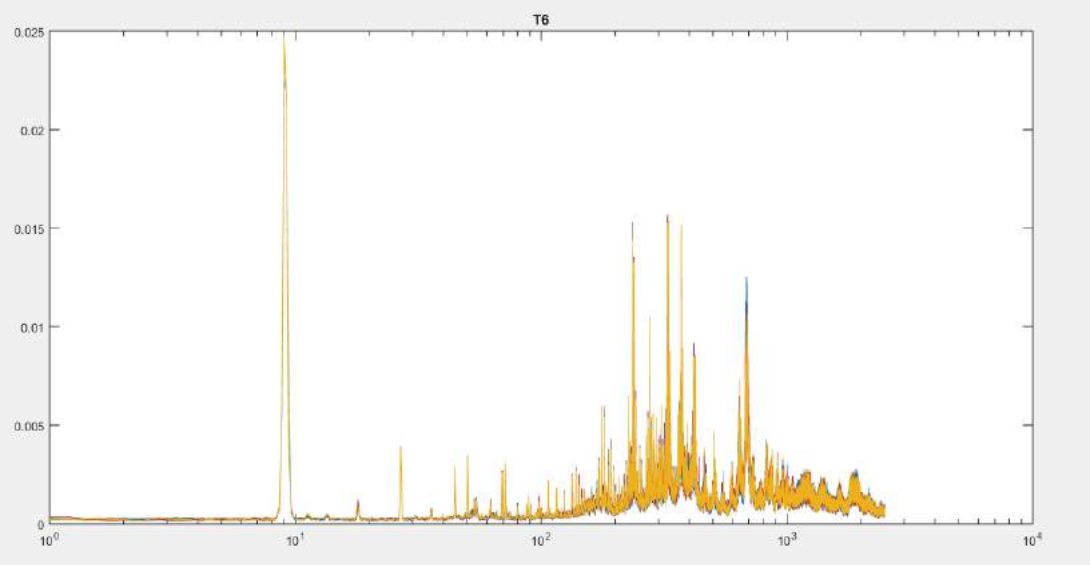


Figura 6.3.1.5. Representación de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 20 Hz).

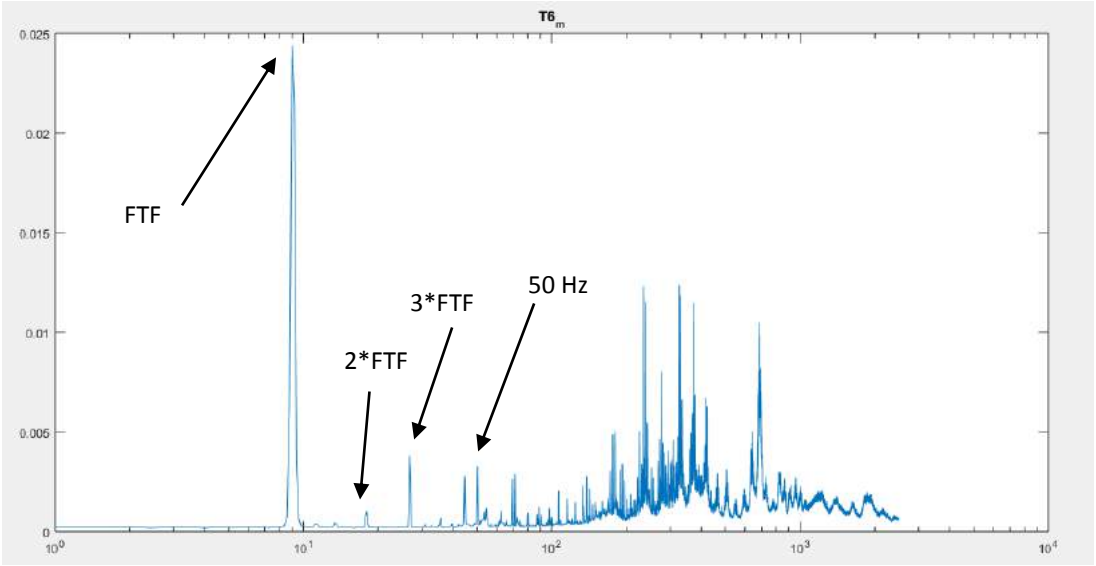


Figura 6.3.1.6. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 20 Hz).

En esta ocasión se tienen los siguientes puntos. FTF (9, 0.0244), 2*FTF (18, 0.001019), 3*FTF (26.8, 0.003809) y en la frecuencia de la red el (50.2, 0.003286).

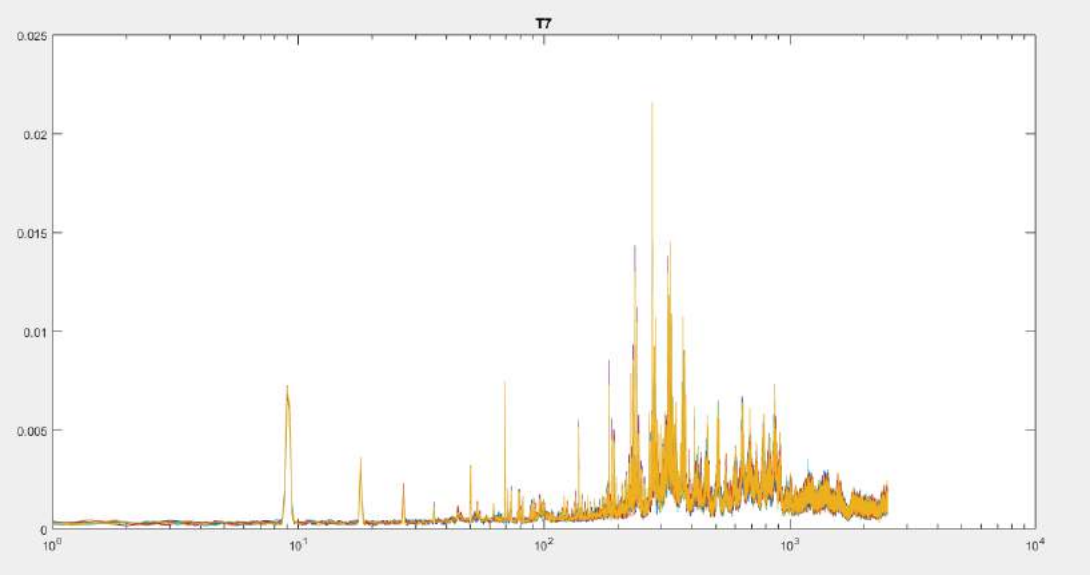


Figura 6.3.1.7. Representación de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 20 Hz).

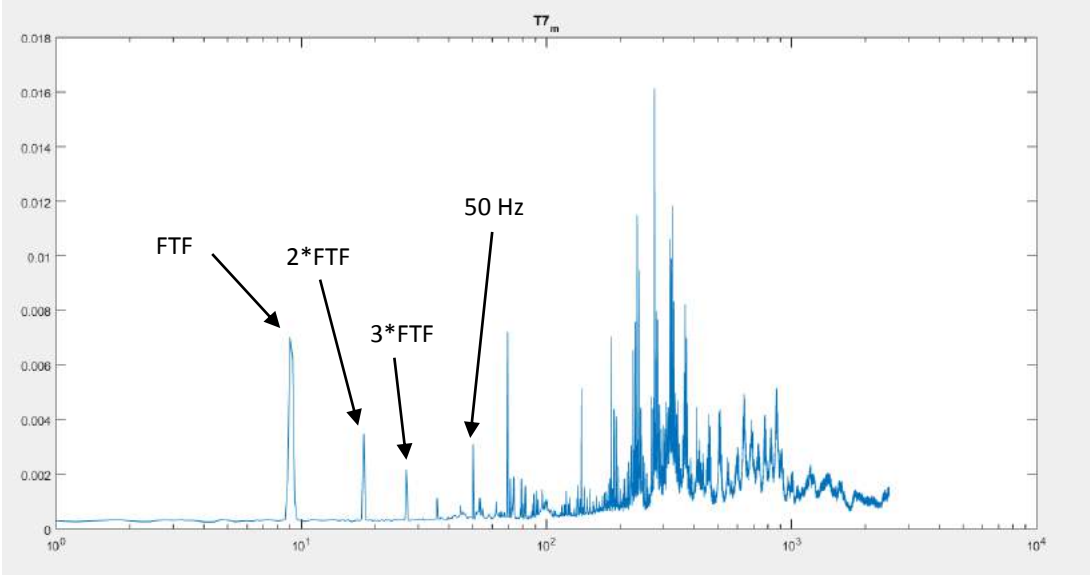


Figura 6.3.1.8. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 20 Hz).

En este último canal los puntos señalados son los siguientes: el FTF es el (9, 0.007044), el 2*FTF es el (18, 0.0035) y el 3*FTF el (26.8, 0.002173). A la frecuencia de la red se tiene el punto (50.2, 0.003096).

A continuación se va a comparar con los valores obtenidos a la misma velocidad de giro pero con una presión aplicada de 3 bares.

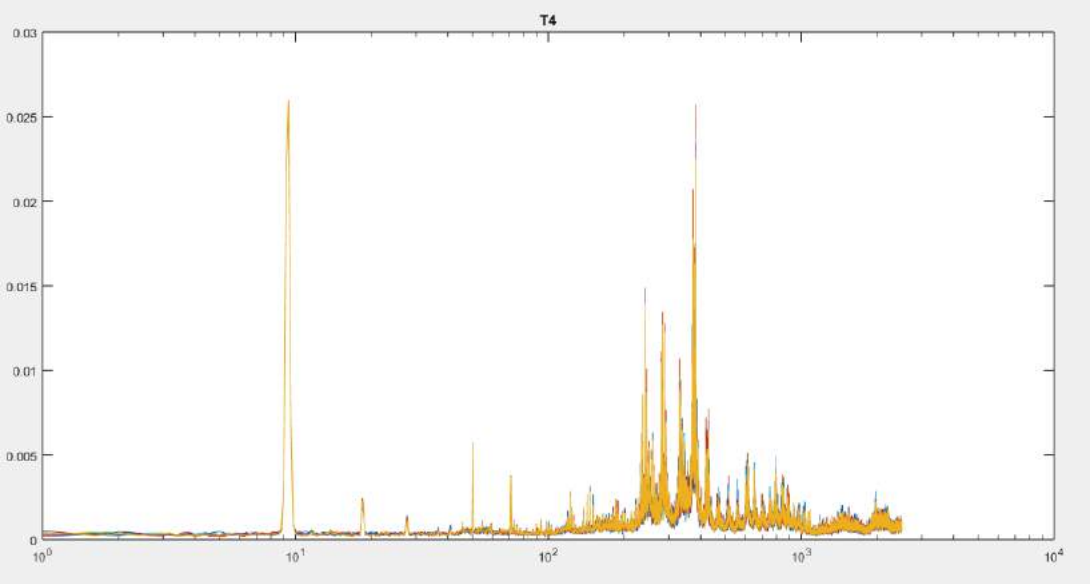


Figura 6.3.1.9. Representación de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 20 Hz).

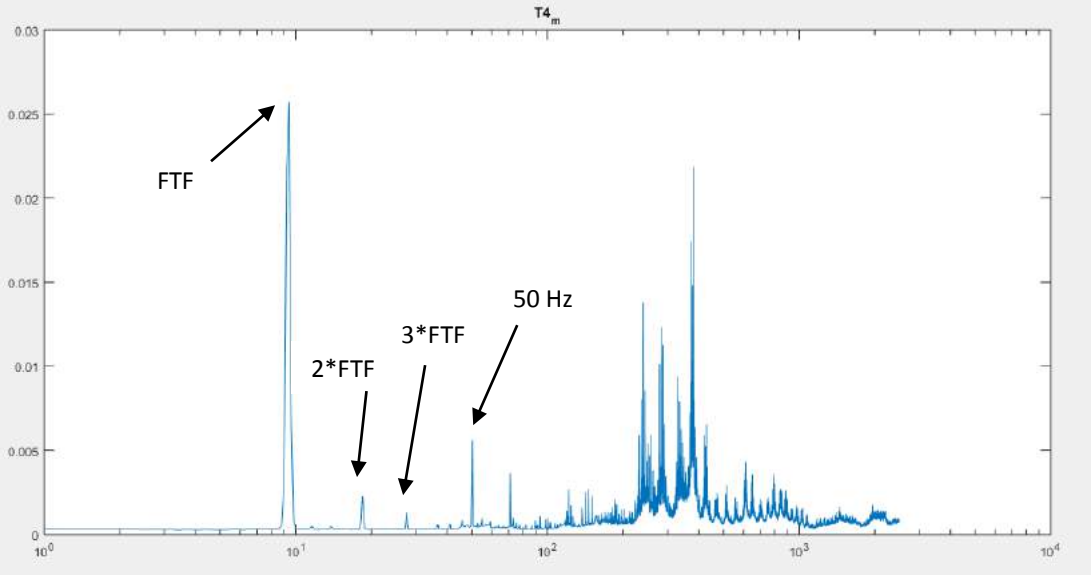


Figura 6.3.1.10. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 20 Hz).

Se observa que los puntos señalados son el FTF (9.4, 0.02569), el 2*FTF (18.4, 0.002274) y el 3*FTF (27.6, 0.001312). Los valores son similares a los estudiados a 6 bares de presión, salvo el tercer armónico de la FTF, que el valor del pico es menor.
Para la frecuencia de la red se da el punto (50.2, 0.005598), también similar al de 6 bares.

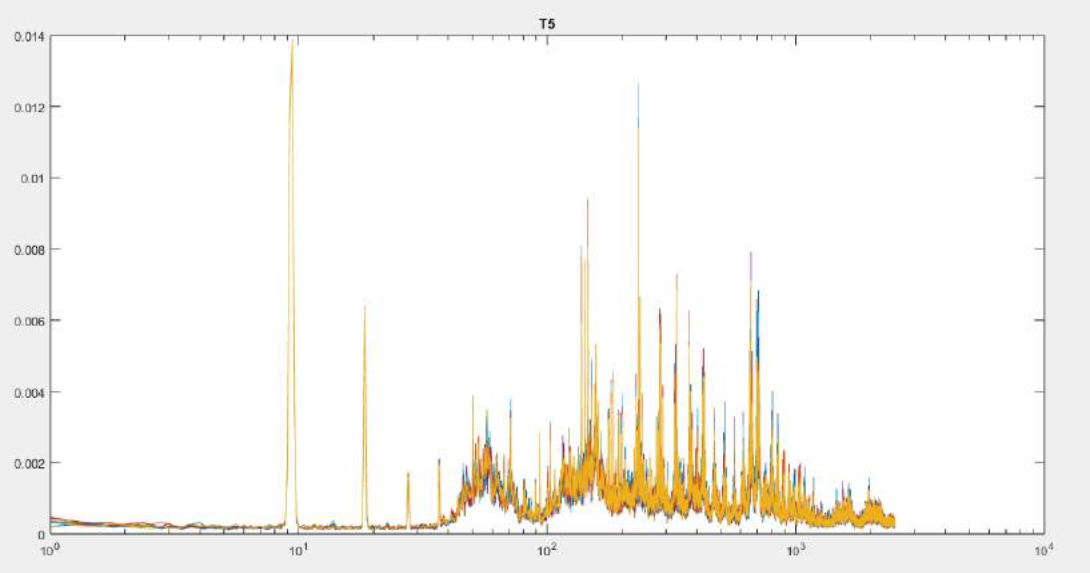


Figura 6.3.1.11. Representación de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 20 Hz).

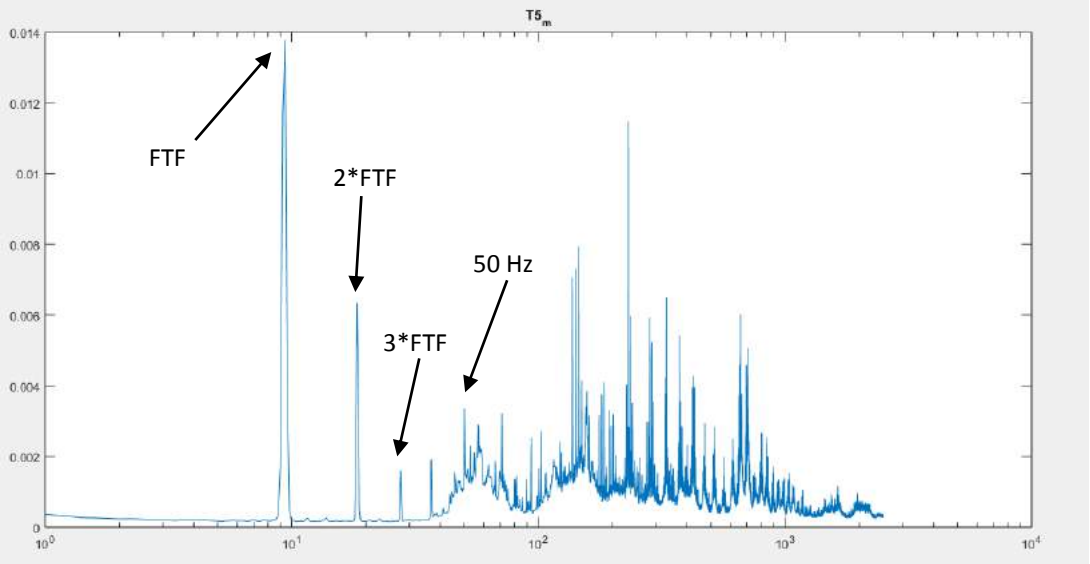


Figura 6.3.1.12. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 20 Hz).

En esta ocasión los puntos señalados son FTF (9.4, 0.01378), 2*FTF (18.4, 0.006331) y 3*FTF (27.6, 0.001617). A la frecuencia de la red se encuentra el punto (50.2, 0.003354).

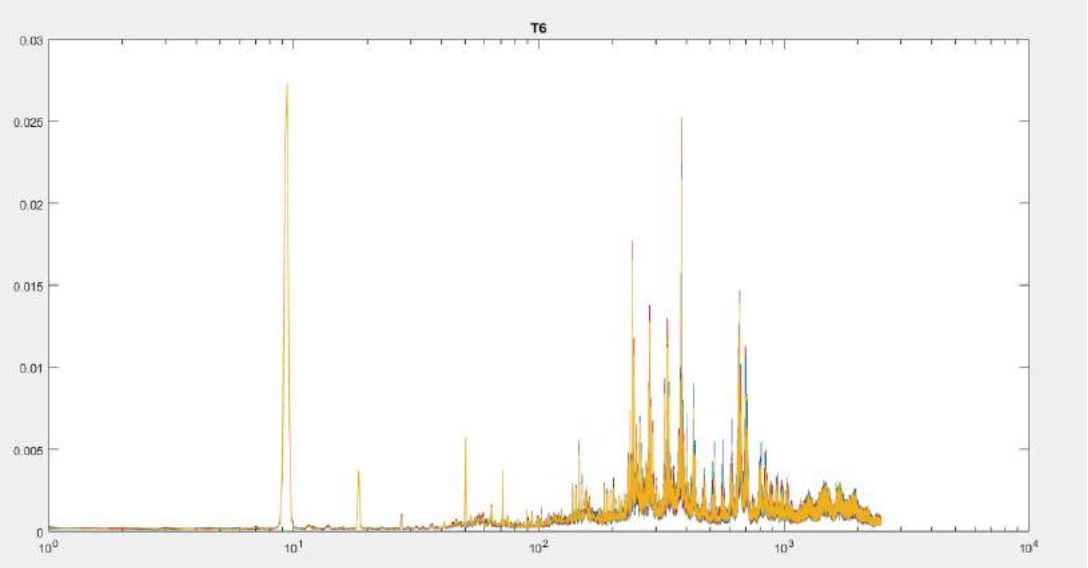


Figura 6.3.1.13. Representación de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 20 Hz).

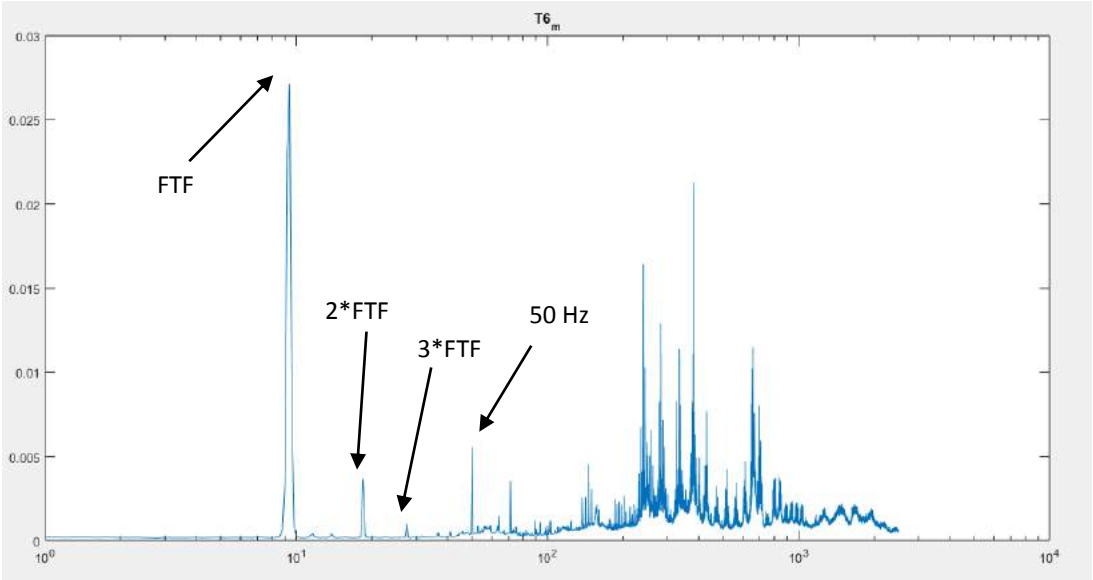


Figura 6.3.1.14. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 20 Hz).

Los puntos señalados en este canal son el FTF (9.4, 0.02712), el 2*FTF (18.4, 0.003655) y el 3*FTF (27.6, 0.0009795). El tercer armónico es bastante menor que el que se obtenía para 6 bares.
El pico de la frecuencia de la red es (50.2, 0.005569).

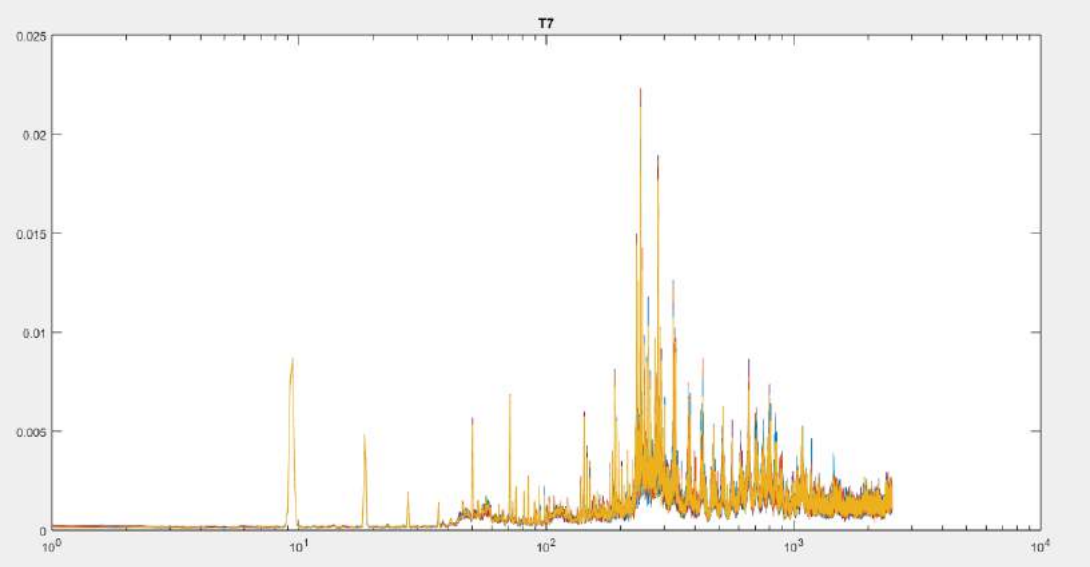


Figura 6.3.1.15. Representación de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 20 Hz).

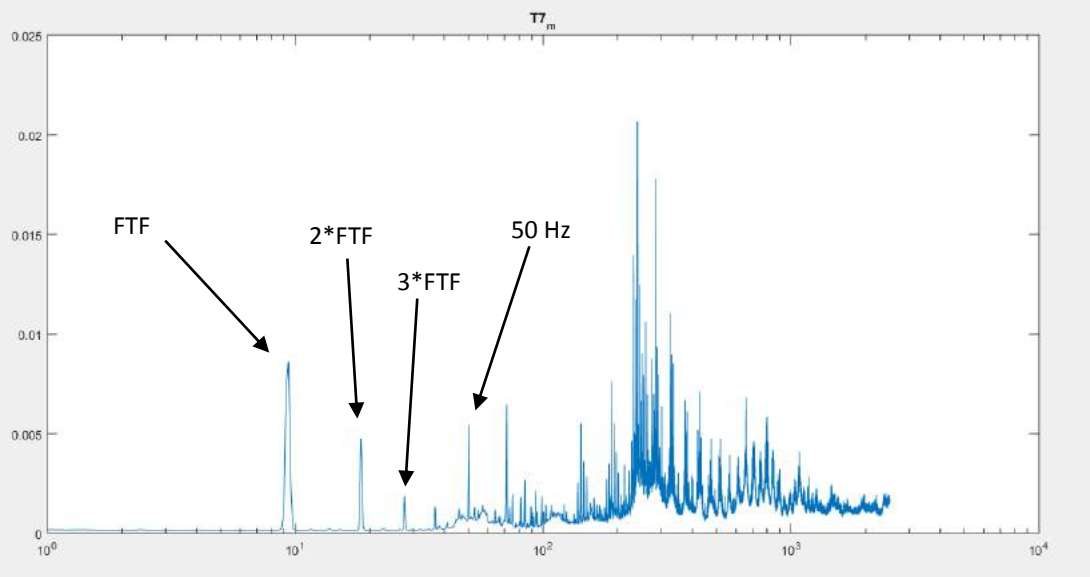


Figura 6.3.1.16. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 20 Hz).

Por último, los puntos que se obtienen para este canal son el FTF (9.4, 0.008621), el 2*FTF (18.4, 0.004774), y el 3*FTF (27.6, 0.001862). A la frecuencia de la red se encuentra el (50.2, 0.005465).

Para finalizar este análisis a 20 Hz de frecuencia, se va a representar a continuación una gráfica comparativa del canal 6 para las dos presiones estudiadas, así como una tabla donde se comparan todos los datos.

	FTF (9.17 Hz)		2*FTF (18.34 Hz)		3*FTF (27.51 Hz)		50Hz	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(9.4, 0.02569)	(9, 0.0237)	(18.4, 0.002274)	(18, 0.001704)	(27.6, 0.001312)	(26.8, 0.003512)	(50.2, 0.005598)	(50.2, 0.005126)
T5_m	(9.4, 0.01378)	(9, 0.01348)	(18.4, 0.006331)	(18, 0.004628)	(27.6, 0.001617)	(26.8, 0.003145)	(50.2, 0.003354)	(50.2, 0.003812)
T6_m	(9.4, 0.02712)	(9, 0.0244)	(18.4, 0.003655)	(18, 0.001019)	(27.6, 0.0009795)	(26.8, 0.003809)	(50.2, 0.005569)	(50.2, 0.003286)
T7_m	(9.4, 0.008621)	(9, 0.007044)	(18.4, 0.004774)	(18, 0.0035)	(27.6, 0.001862)	(26.8, 0.002173)	(50.2, 0.005465).	(50.2, 0.003096)

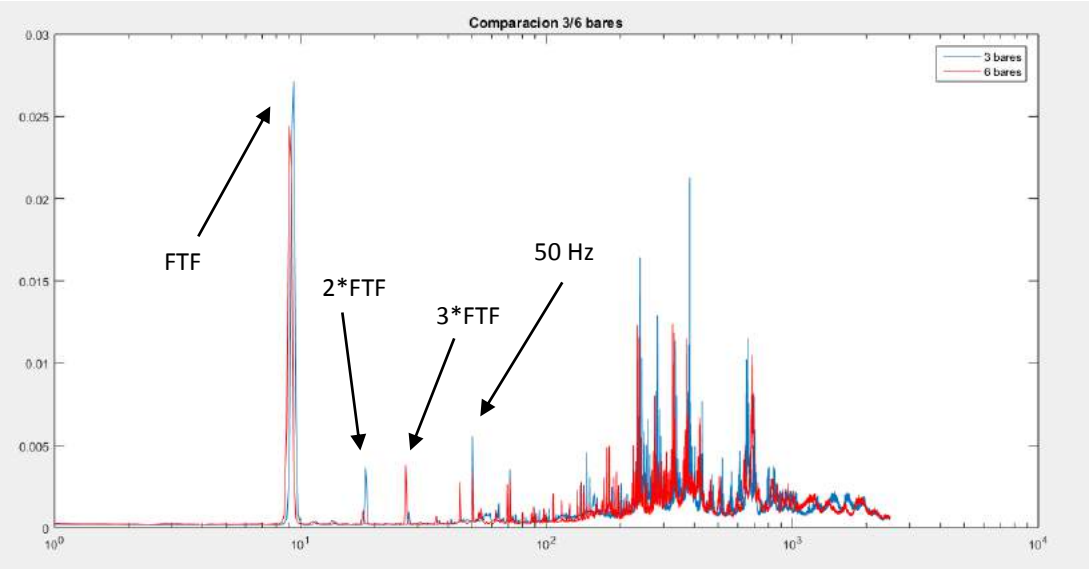


Figura 6.3.1.17. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (20 Hz).

Se observa, por lo general, que las amplitudes de los ensayos a 6 bares son menores que las de los mismos a 3 bares.

6.3.2. Rodamiento en perfecto estado a 10 Hz.

En este apartado solamente se van a representar las gráficas Tj_m. En primer lugar con una presión aplicada de 6 bares.

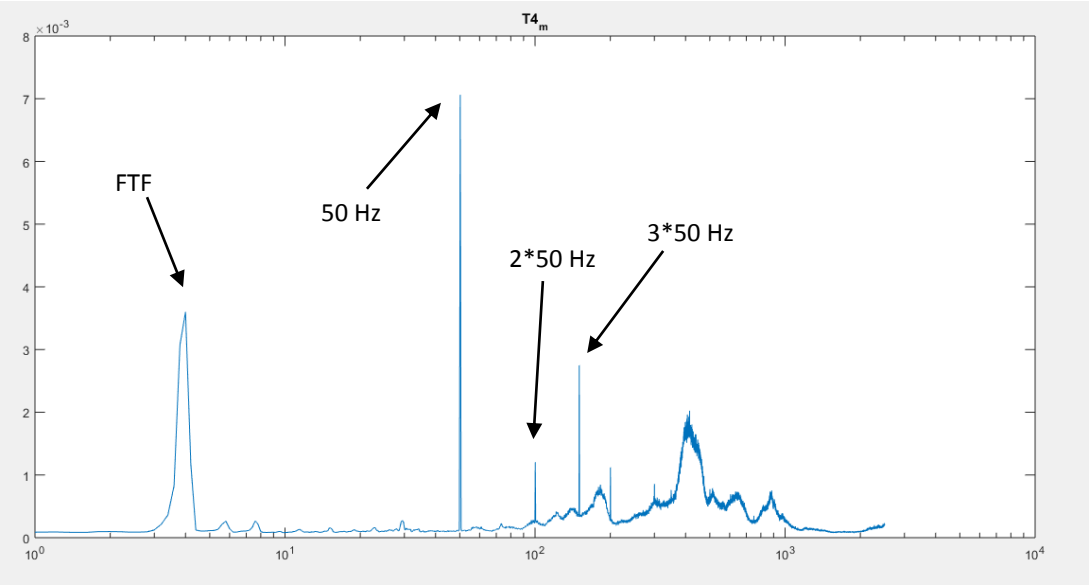


Figura 6.3.2.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 10 Hz).

Para 10 Hz, la FTF teórica es, como se veía anteriormente, 4.58 Hz. En la gráfica anterior el punto correspondiente a la FTF es el (4, 0.0036). Llama la atención el pico que se produce a la frecuencia de la red (50.2, 0.007061), así como sus armónicos (100.2, 0.001204) y (150.2, 0.002749).

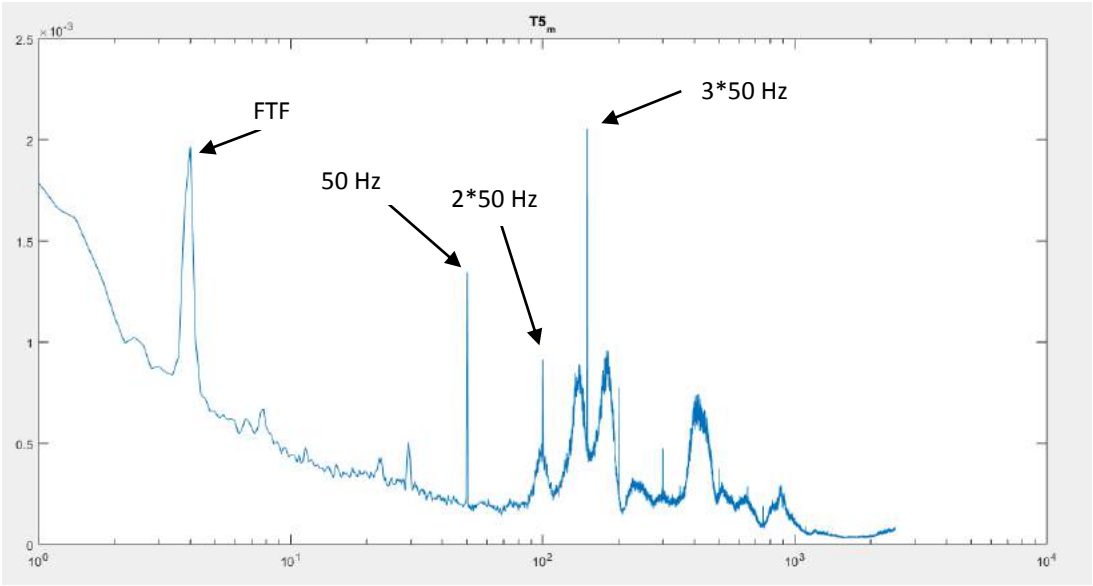


Figura 6.3.2.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 10 Hz).

En este canal el pico de la FTF corresponde al punto (4, 0.001963). Para la frecuencia de la red se tiene el punto (50.2, 0.001346) y para sus armónicos los puntos (100.2, 0.0009134) y (150.2, 0.002056).

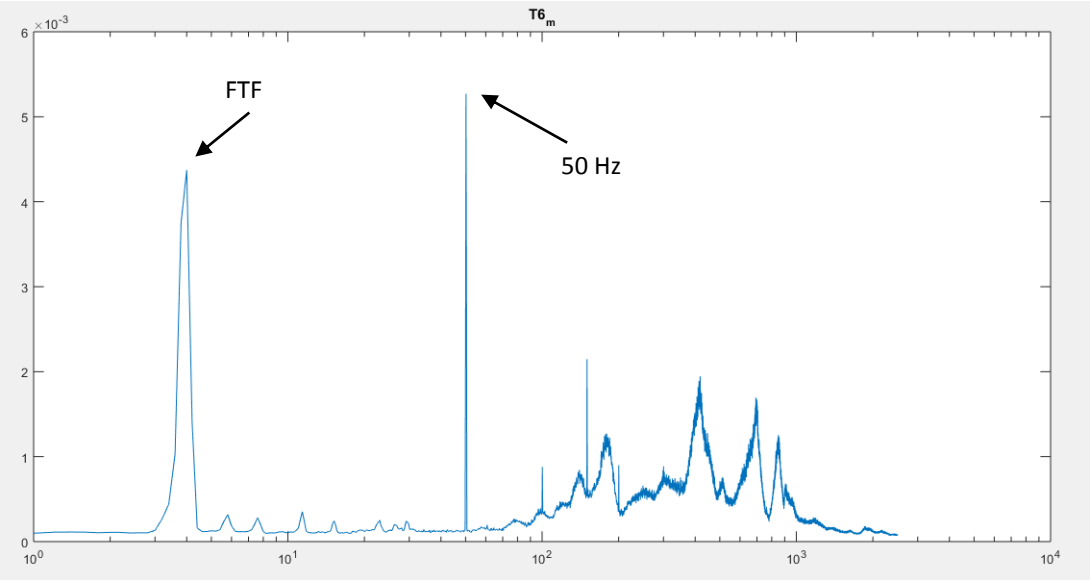


Figura 6.3.2.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 10 Hz).

En el canal 6 se aprecia el pico a la FTF que es el (4, 0.004372). Se observan pequeños picos que son los armónicos de la FTF a 7.6 Hz, 11.4 Hz o 15.2 Hz. En cuanto a la frecuencia de la red, se ve un pico en el (50.2, 0.005269).

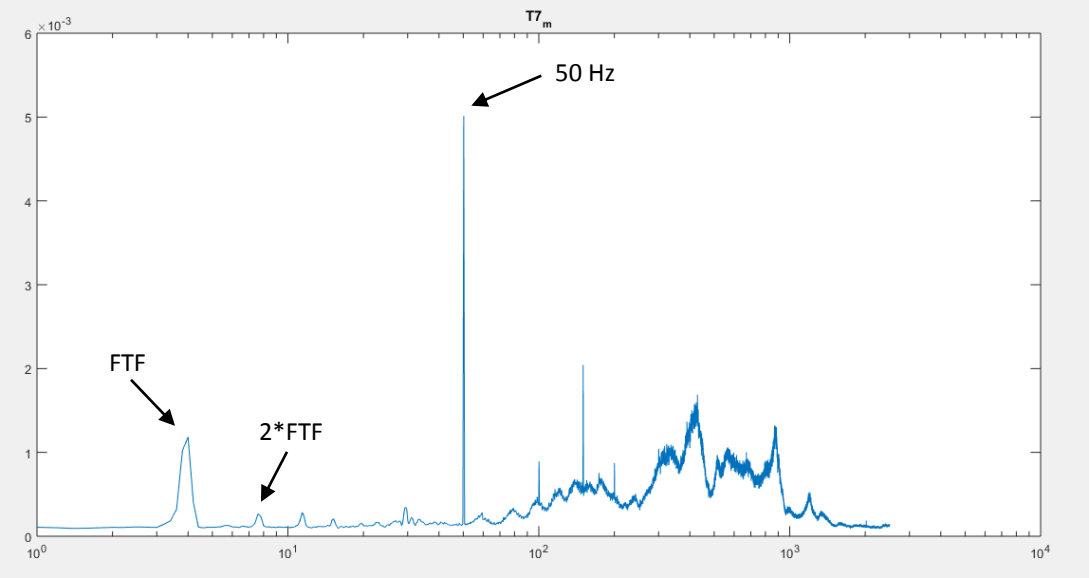


Figura 6.3.2.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 10 Hz).

Este último canal presenta un máximo a la frecuencia de la red y es el (50.2, 0.005013). También se aprecia el pico de la FTF, que es el (4, 0.001184) y sus armónicos a 7.6 Hz, 11.4 Hz o 15.2 Hz.

A continuación se van a representar las gráficas para los cuatro canales anteriores obtenidas en los ensayos realizados con 3 bares de presión.

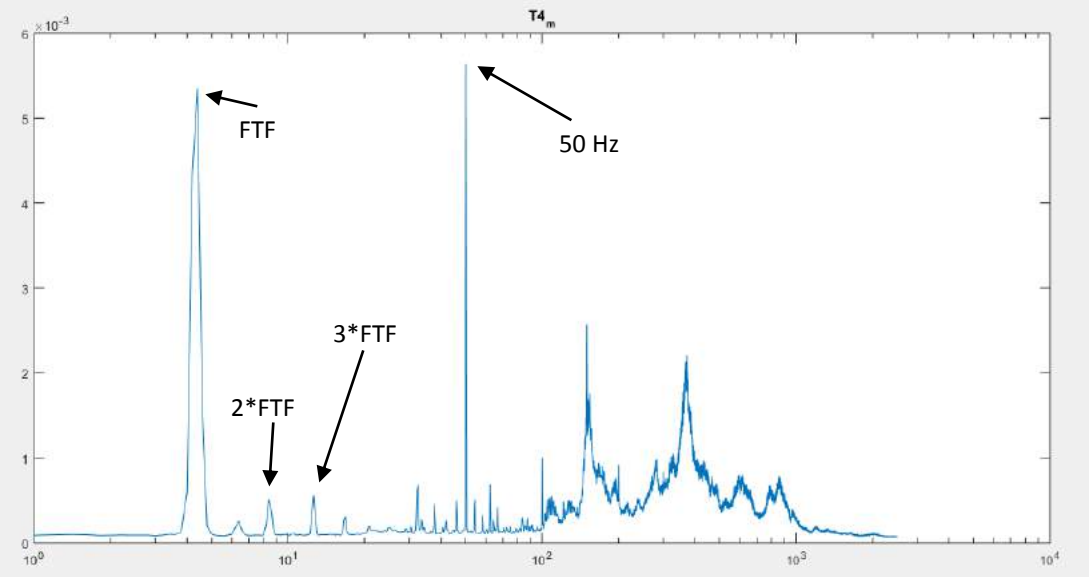


Figura 6.3.2.5. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 10 Hz).

Se puede apreciar en la gráfica anterior los picos que se producen en la FTF (4.4, 0.00535), 2*FTF (8.4, 0.0005137) y 3*FTF (12.6, 0.0005574). También es destacable el pico a la frecuencia de la red en el punto (50.2, 0.005641).

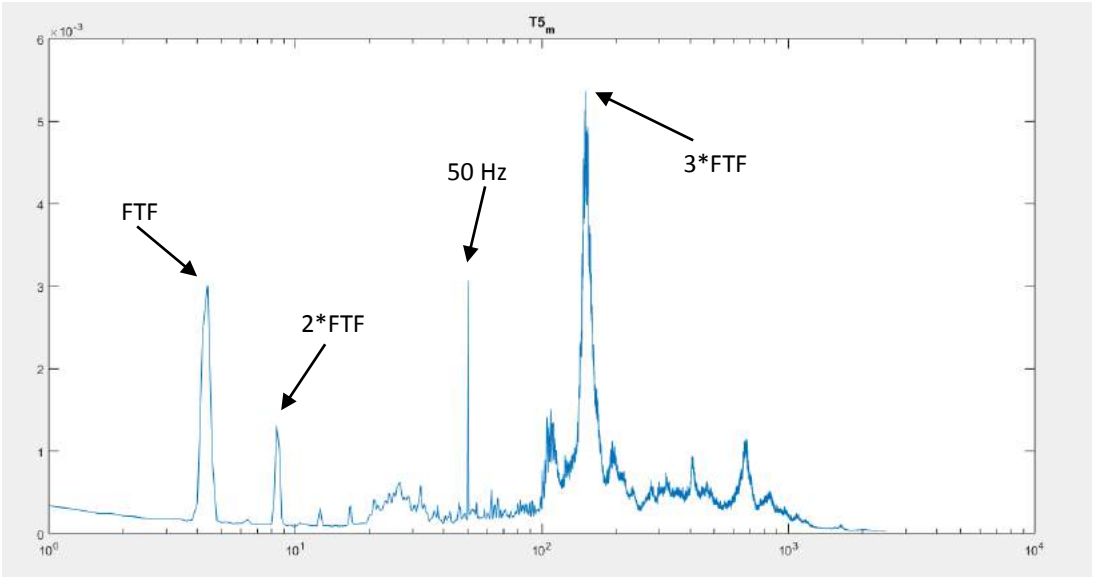


Figura 6.3.2.6. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 10 Hz).

Se observa en la gráfica correspondiente al canal 5 varios puntos interesantes. El FTF (4.4, 0.00301) y el 2*FTF (8.4, 0.001307) por un lado. Y por otro, a la frecuencia de la red (50.2, 0.003066), así como el máximo al triple de la frecuencia de la red (150.2, 0.005369).

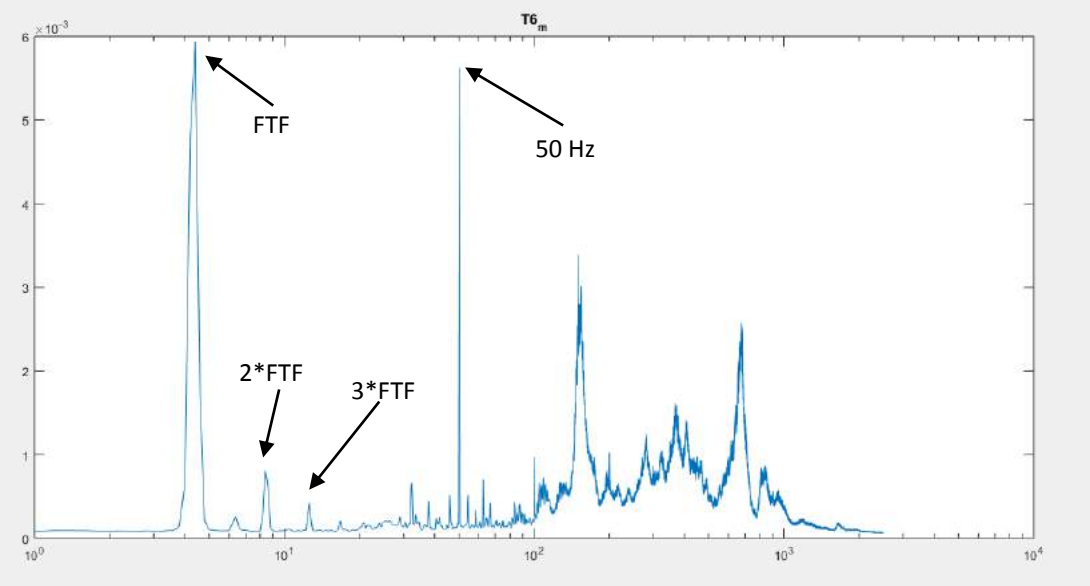


Figura 6.3.2.7. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 10 Hz).

En la anterior gráfica se aprecia un máximo a la FTF (4.4, 0.005933), así como sus armónicos 2*FTF (8.4, 0.0008077) y 3*FTF (12.6, 0.0004171). A la frecuencia de la red se observa también un máximo (50.2, 0.005624).

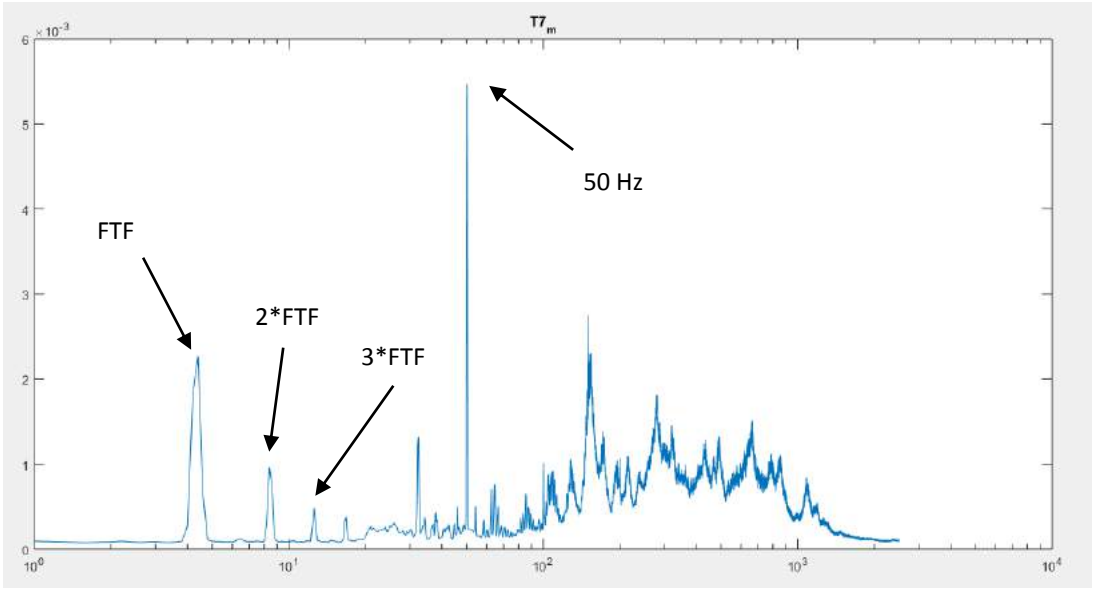


Figura 6.3.2.8. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 10 Hz).

Por último, en el canal 7 se dan los siguientes puntos. FTF (4.4, 0.002264), 2*FTF (8.4, 0.0009581), 3*FTF (12.6, 0.0004858) y a la frecuencia de la red (50.2, 0.005466).

Para finalizar el análisis a 10 Hz de frecuencia se muestra a continuación una tabla comparativa, así como una gráfica con los valores obtenidos para esta velocidad a ambas presiones.

	FTF (4.58)		50 Hz	
	3 bares	**6 bares**	**3bares**	**6 bares**
T4_m	(4.4, 0.00535)	(4, 0.0036)	(50.2, 0.007061)	(50.2, 0.007061)
T5_m	(4.4, 0.00301)	(4, 0.001963)	(50.2, 0.003066)	(50.2, 0.001346)
T6_m	(4.4, 0.005933)	(4, 0.004372)	(50.2, 0.005624)	(50.2, 0.005269)
T7_m	(4.4, 0.002264)	(4, 0.001184)	(50.2, 0.005466)	(50.2, 0.005013)

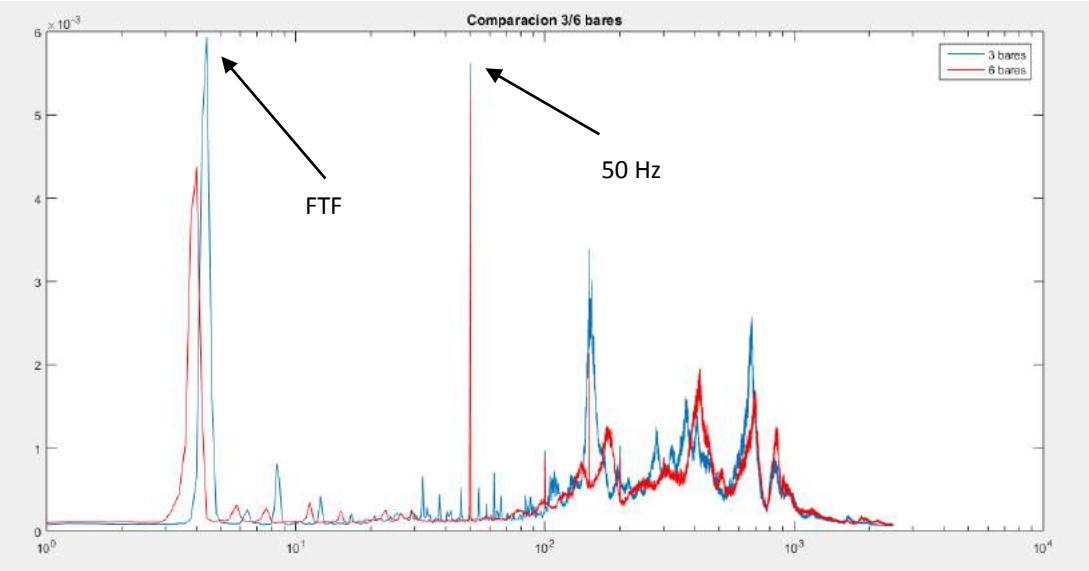


Figura 6.3.2.9. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (10 Hz).

Se observa, por lo general, que las amplitudes son mayores para los ensayos realizados a 3 bares. También se puede apreciar que a esta velocidad, los picos de la FTF, así como sus armónicos, están adelantados para 6 bares con respecto a 3 bares, acercándose éstos más a la FTF teórica y sus armónicos.

6.3.3. Rodamiento en perfecto estado a 30 Hz.

En este capítulo se representan las gráficas obtenidas a la velocidad de 30 Hz. Al igual que en el apartado anterior, solo se representarán las Tj_m.

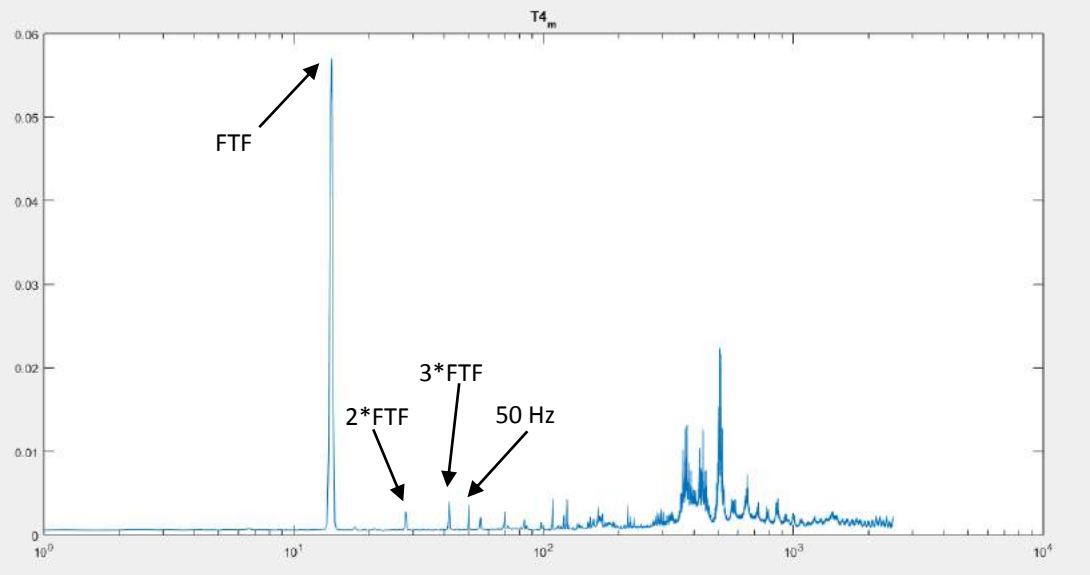


Figura 6.3.3.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 30 Hz).

Se veía anteriormente que la FTF para esta velocidad era de 13.75 Hz y se observa en la gráfica un pico muy próximo a esa frecuencia, el (14.2, 0.05699), así como sus armónicos 2*FTF (28, 0.002811) y 3*FTF (42, 0.004025). A la frecuencia de la red se ve el pico (50.2, 0.003612).

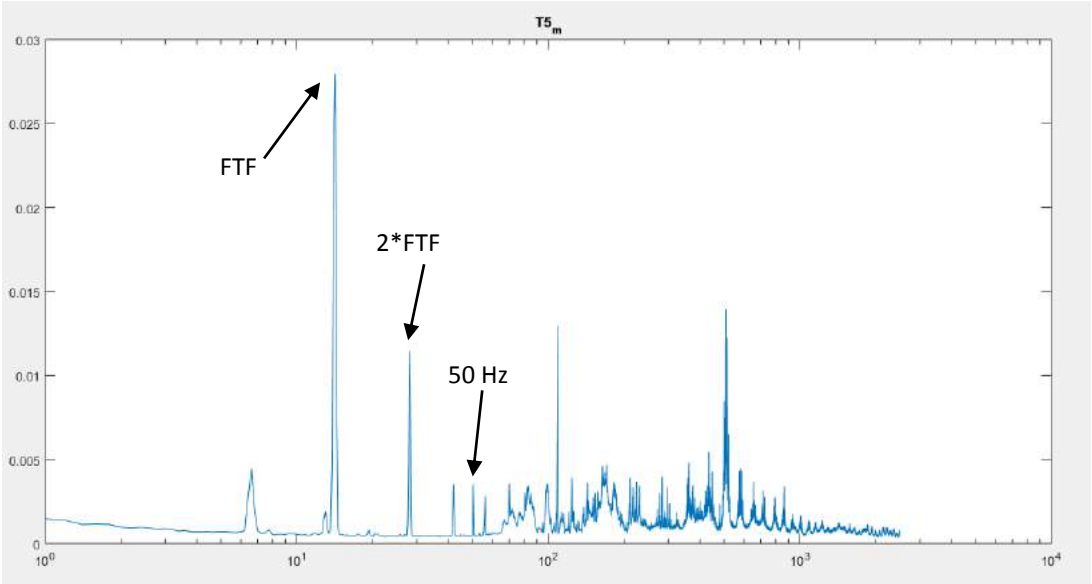


Figura 6.3.3.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 30 Hz).

Se observa un máximo cercano a la FTF, el (14.2, 0.02795), así como los picos de sus armónicos a 28 Hz y 42 Hz. A la frecuencia de la red se localiza el pico (50.2, 0.003493).

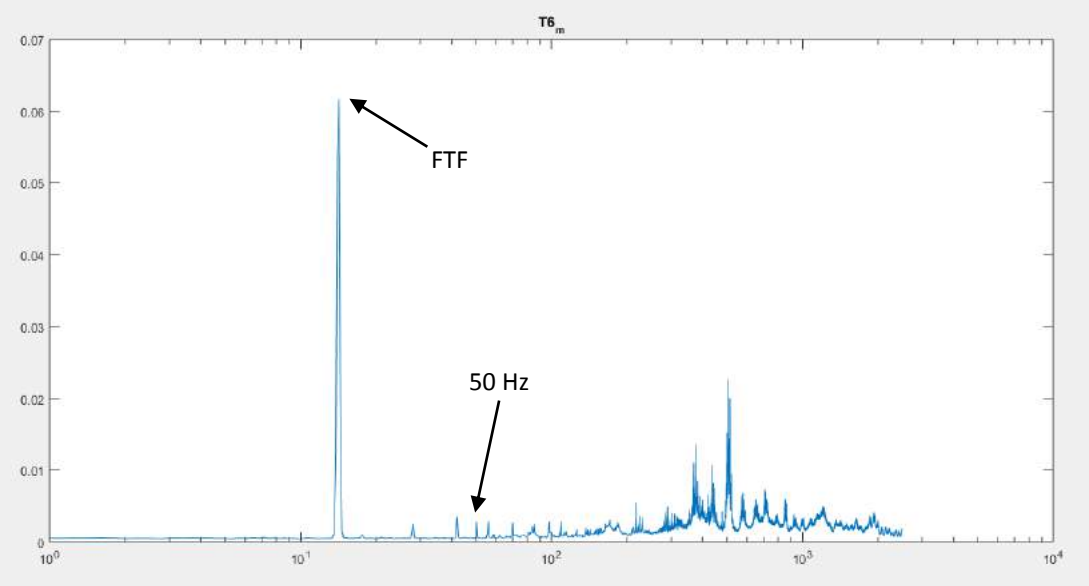


Figura 6.3.3.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 30 Hz).

El primer pico que se ve, que a su vez es máximo, es el (14.2, 0.06164) muy próximo a la FTF. También se aprecian sus armónicos a 28 Hz y a 42 Hz con un valor muy bajo, así como a la frecuencia de la red el (50.2, 0.00286).

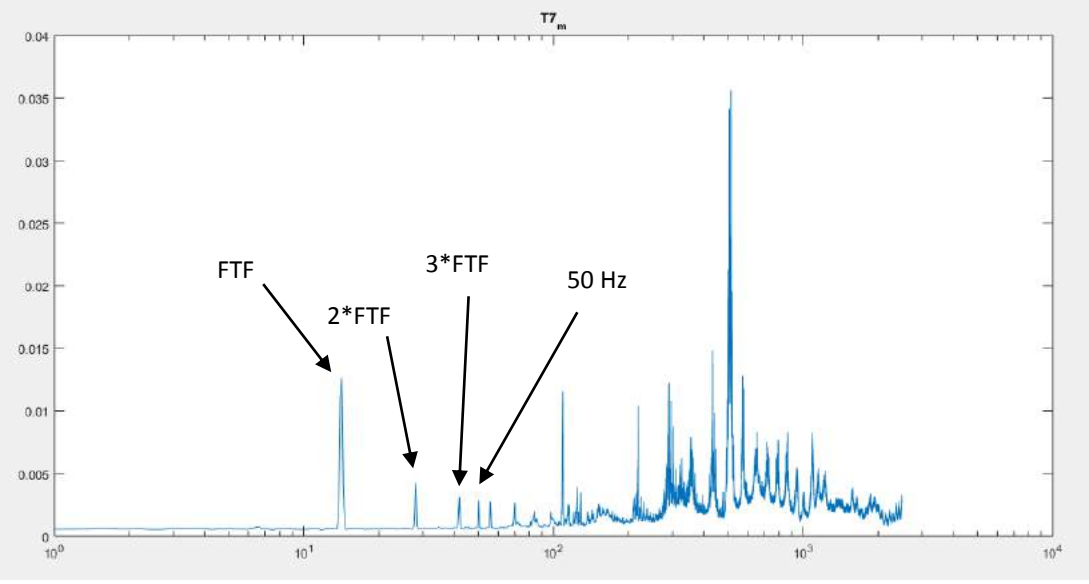


Figura 6.3.3.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 30 Hz).

En este último canal se aprecia un pico cercano a la FTF, el (14.2, 0.01262), así como sus armónicos 2*FTF (28, 0.00427) y 3*FTF (42, 0.003126). Se ve también el pico a la frecuencia de la red, el (50.2, 0.002822).

A continuación se muestran las gráficas obtenidas para 3 bares de presión aplicada.

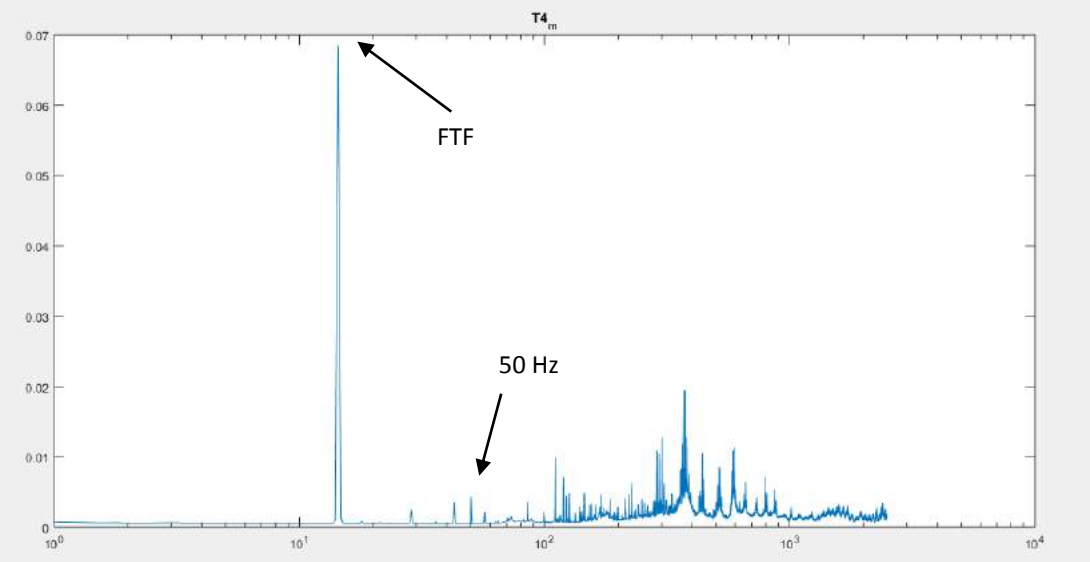


Figura 6.3.3.5. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 30 Hz).

El máximo de la gráfica anterior se da para una frecuencia próxima a la FTF y es el punto (14.4, 0.06849). Con menores amplitudes se ven sus armónicos a 28.6 Hz y 42.8 Hz. Se aprecia también un pico a la frecuencia de la red, el (50.2, 0.004299).

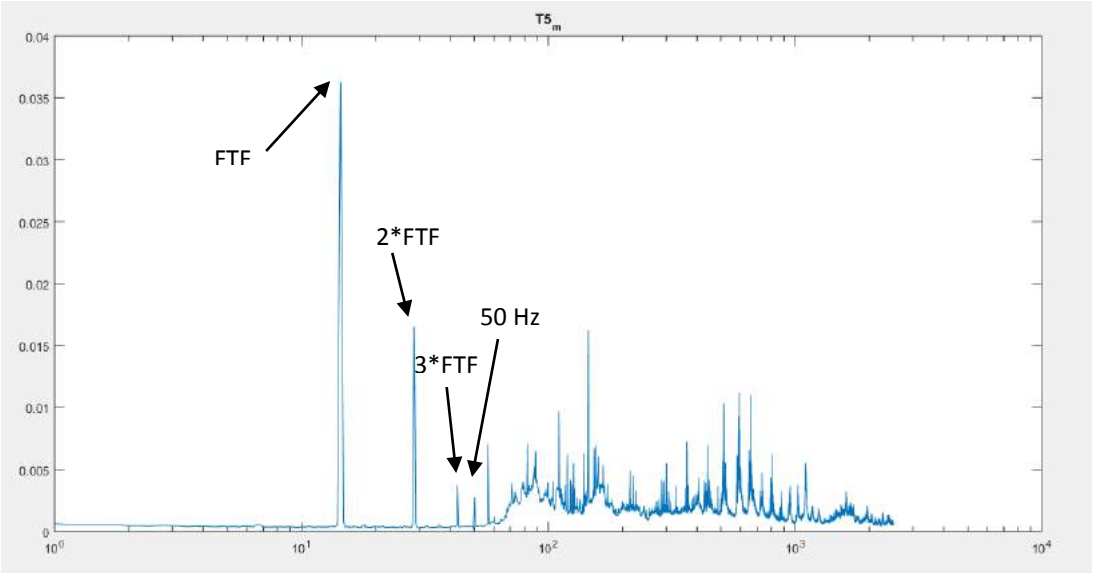


Figura 6.3.3.6. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 30 Hz).

En este canal, los picos son el FTF (14.4, 0.03628), el 2*FTF (28.6, 0.01654) y el 3*FTF (42.8, 0.003737), así como el que se da a la frecuencia de la red (50.2, 0.002814).

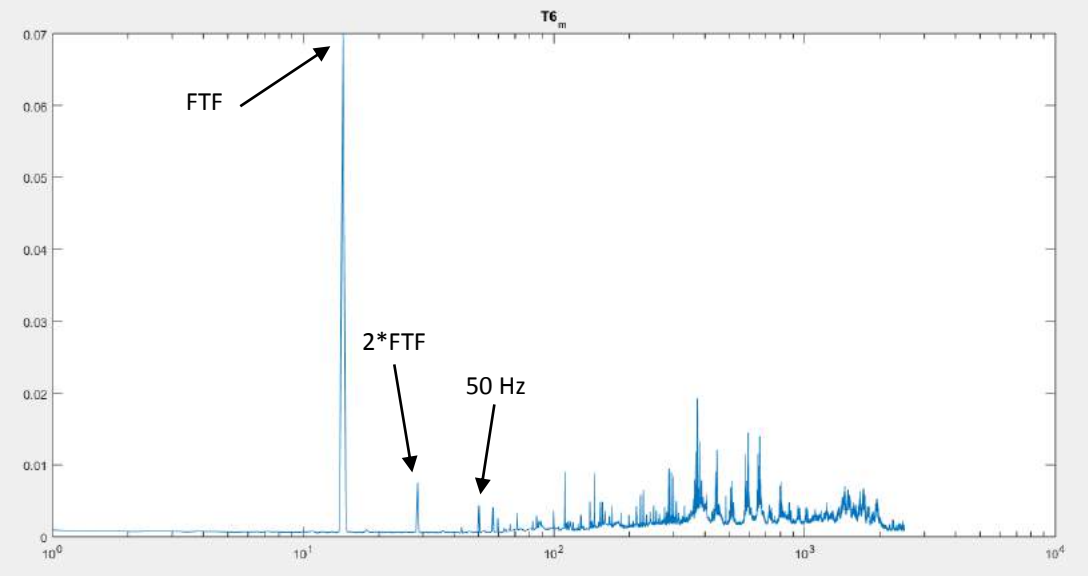


Figura 6.3.3.7. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 30 Hz).

Se observa un máximo cercano a la FTF, el (14.4, 0.06998). También se aprecian sus armónicos, aunque con mucha menos amplitud, a 28.6 Hz y 42,8 Hz. Se distingue también un pico a la frecuencia de la red, el (50.2, 0.004283).

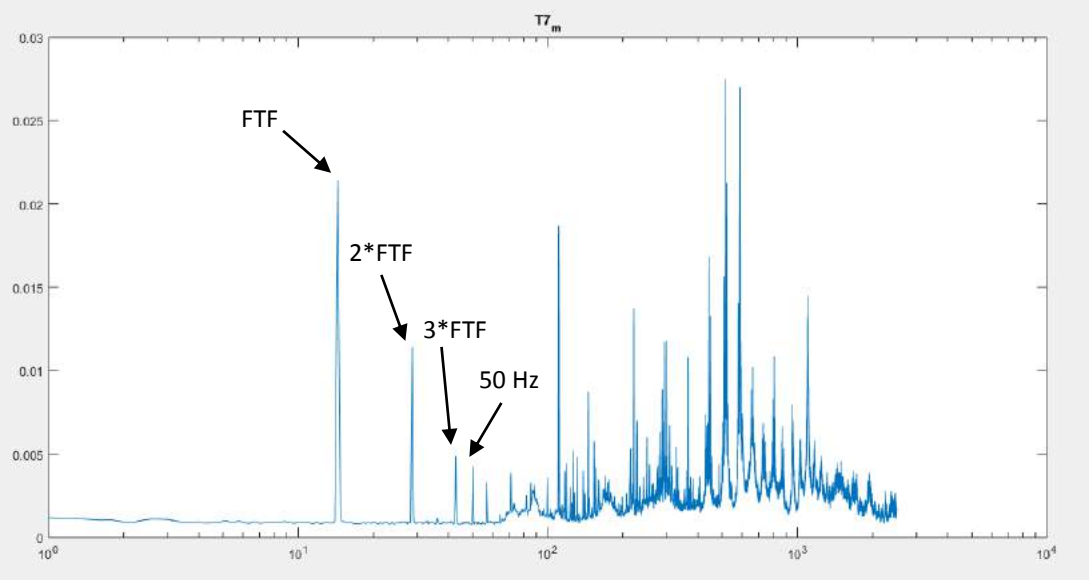


Figura 6.3.3.8. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 30 Hz).

En este último canal se observa un primer pico cercano a la FTF, el (14.4, 0.0214), y sus armónicos, 2*FTF (28.6, 0.01143) y 3*FTF (42.8, 0.004859). A la frecuencia de la red se ve también el pico (50.2, 0.004244).

Para finalizar el análisis a 30 Hz de frecuencia se muestra a continuación una tabla y una gráfica comparativas.

	FTF (13.75 Hz)		50 Hz	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(14.4, 0.06849)	(14.2, 0.05699)	(50.2, 0.004299)	(50.2, 0.003612)
T5_m	(14.4, 0.03628)	(14.2, 0.02795)	(50.2, 0.002814)	(50.2, 0.003493)
T6_m	(14.4, 0.06998)	(14.2, 0.06164)	(50.2, 0.004283)	(50.2, 0.00286)
T7_m	(14.4, 0.0214)	(14.2, 0.01262)	(50.2, 0.004244)	(50.2, 0.002822)

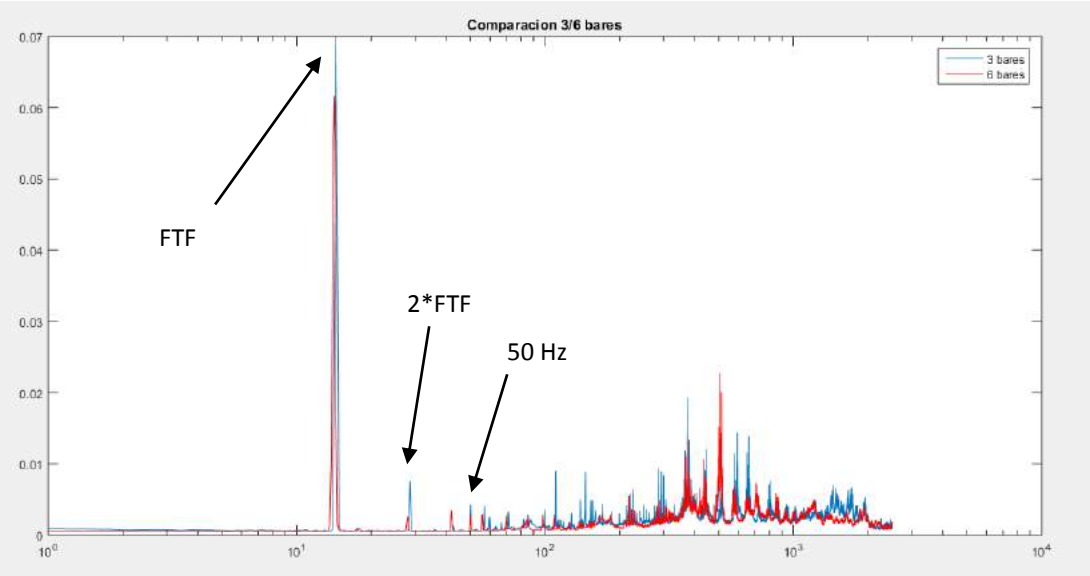


Figura 6.3.3.9. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (30 Hz).

Se observa que las amplitudes a 3 bares son mayores, por lo general, que las mismas a 6 bares.

Es destacable también que las amplitudes de los picos a más velocidad son mayores que las mismas a menos velocidad.

6.3.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro.

Para seguir comparando las gráficas obtenidas para un rodamiento en perfecto estado, se representan a continuación en la misma gráfica los espectros obtenidos para las diferentes frecuencias de giro una vez adimensionalizado el eje de frecuencia.

En primer lugar se representa la combinación de los espectros registrados a 3 bares de presión. Se puede comprobar que los picos a las tres frecuencias estudiadas coinciden. Esto reafirma que los picos obtenidos proceden de las vibraciones del rodamiento, y no de ruido.

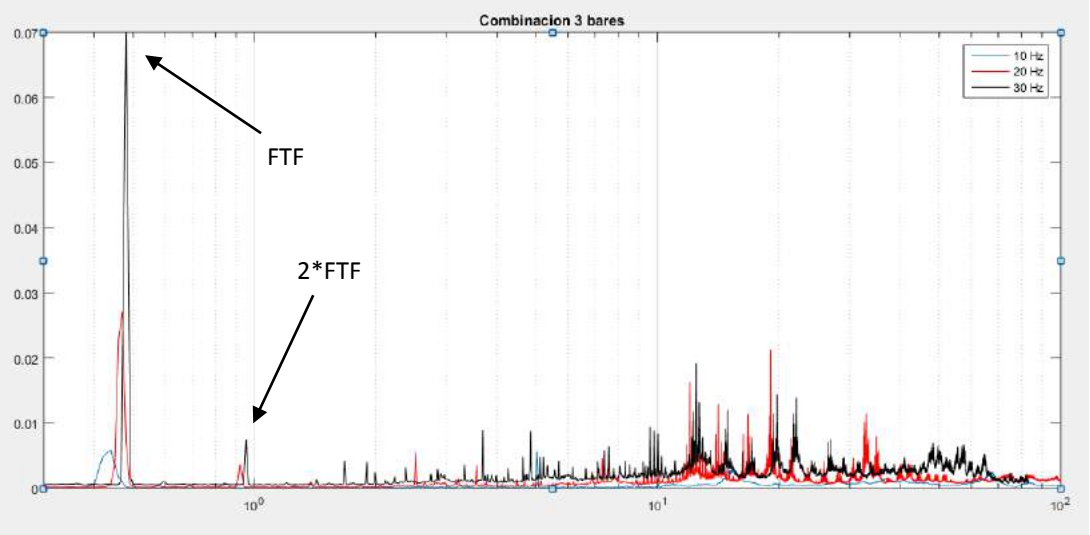


Figura 6.3.4.1. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (3 bares).

A continuación se muestra la combinación de los espectros registrados a 6 bares de presión. Al igual que en la gráfica anterior, se comprueba que los picos coinciden.

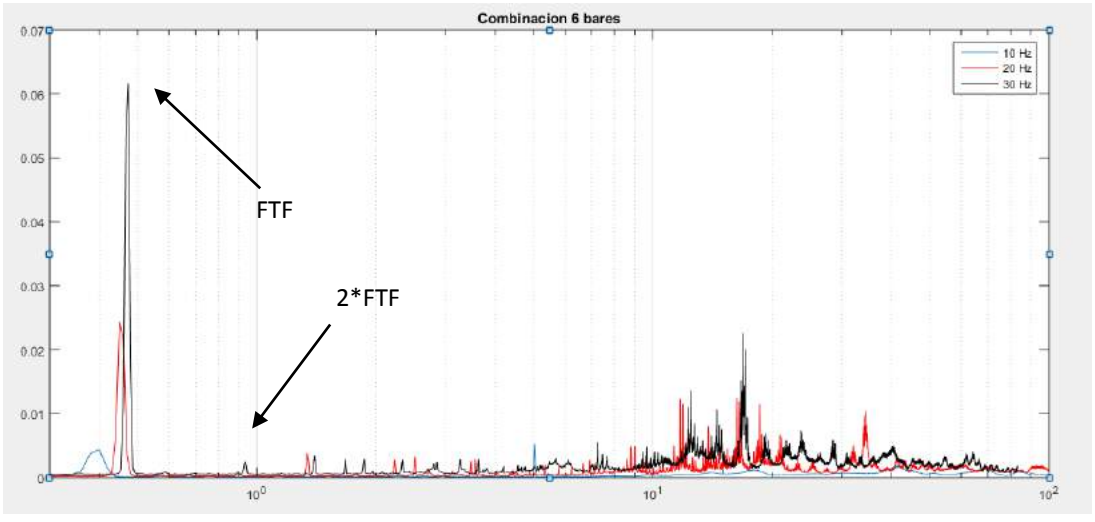


Figura 6.3.4.2. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (6 bares).

A continuación se va a representar una nueva gráfica en la que se combinan las tres frecuencias de giro estudiadas. En primer lugar se escalan las curvas con el pico de la FTF y, a continuación, se realiza la media de las tres curvas y se representa frente al eje de frecuencias adimensionalizado.

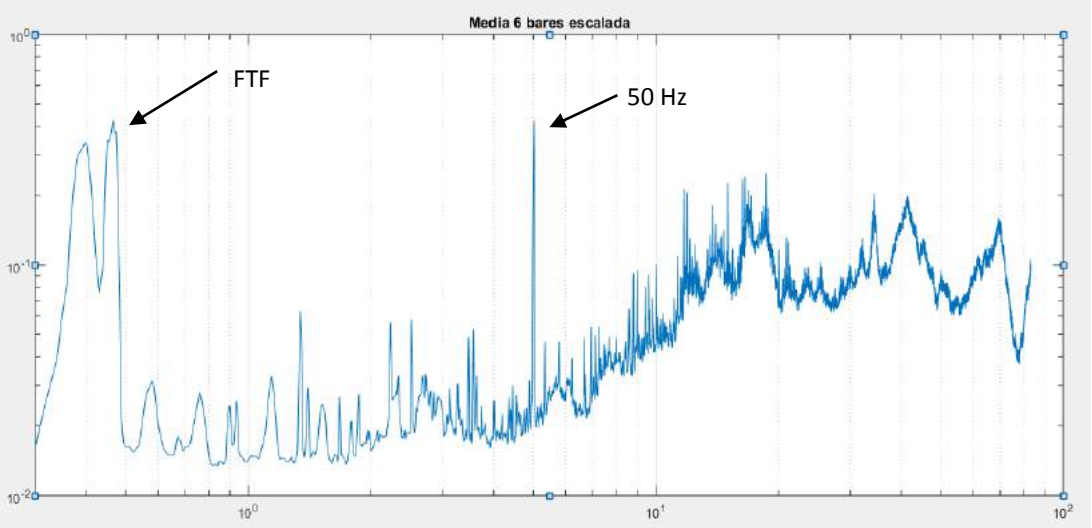


Figura 6.3.4.3. Media de las tres curvas escaladas (6 bares).

Se observan muchos picos a diferentes frecuencias que no se pueden identificar.

6.4. Rodamiento con defecto en pista exterior.

El daño en la pista exterior se realizó con ayuda de una punta y un martillo. En las siguientes imágenes se puede ver dicho defecto.

Figura 6.4.1. Defecto pista exterior.

6.4.1. Rodamiento con defecto en pista exterior a 20 Hz.

A continuación se representan las gráficas obtenidas con una presión aplicada de 6 bares.

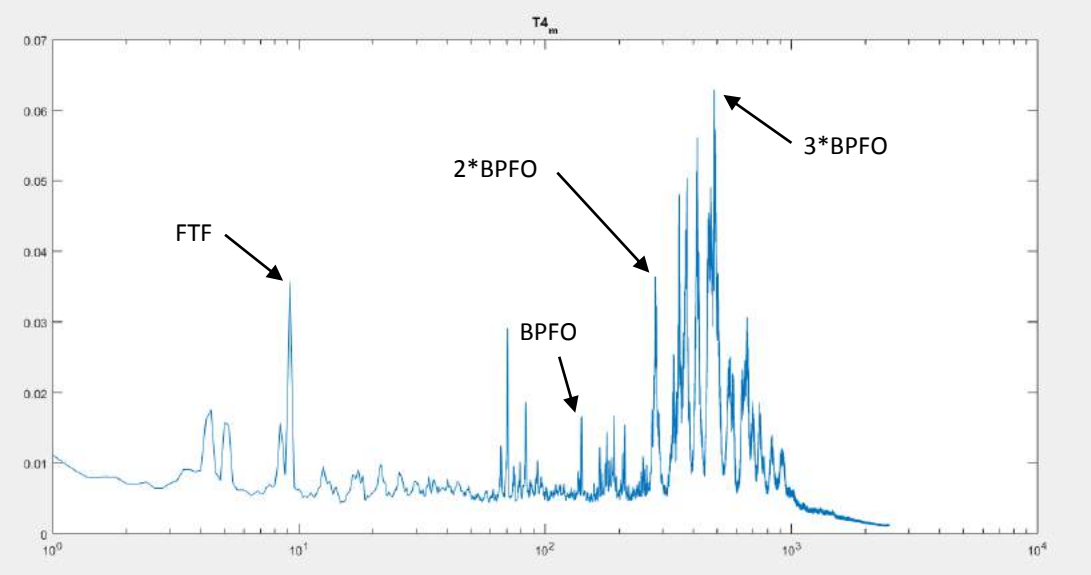


Figura 6.4.1.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 20 Hz).

El primer pico que se observa corresponde a la FTF (9.2, 0.03564). En la introducción se veía que el espectro típico de un rodamiento con defecto en pista exterior presenta picos a la BPFO y sus armónicos. También se veía anteriormente que a una frecuencia de 20 Hz, la BPFO corresponde a 155.84 Hz. En este caso se destacan la BPFO (140.8, 0.0166) y sus armónicos 2*BPFO (280.4, 0.03645) y 3*BPFO (470.4, 0.06286). Los valores obtenidos experimentalmente difieren de los teóricos. El motivo de esta diferencia debe ser la realización del daño.

Se observan también varios picos entre los señalados a la frecuencia FTF y la BPFO que no corresponden con ninguna frecuencia estudiada. El mayor se da a una frecuencia de 70.4 Hz. A éste le sigue otro a 83.4 Hz y otros muchos.

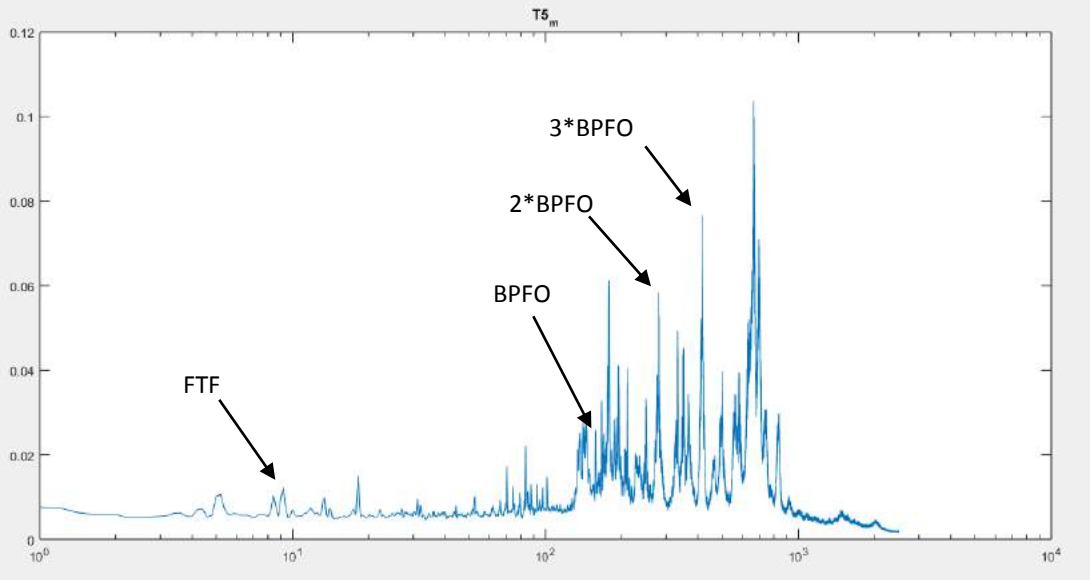


Figura 6.4.1.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 20 Hz).

En este canal se distinguen los siguientes puntos. A la frecuencia BPFO (157.8, 0.02575), 2*BPFO (280.4, 0.05838) y 3*BPFO (416.4, 0.07666). También se dan picos a frecuencias no estudiadas. Destacan los picos a la frecuencia 83.4 Hz, a 178.2 Hz y el máximo a 664.6 Hz.

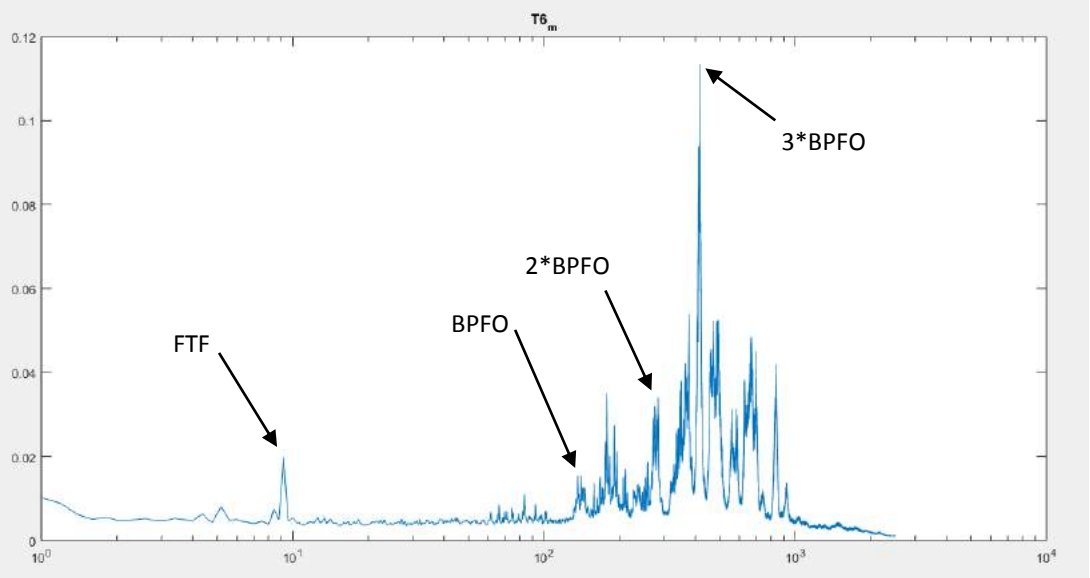


Figura 6.4.1.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 20 Hz).

En la gráfica anterior se pueden observar los siguientes picos. BPFO (157.8, 0.01521), 2*BPFO (284.2, 0.0341) y 3*BPFO (416.4, 0.1134). Se destacan picos a frecuencias no estudiadas. Se da uno entre las BPFO y 2*BPFO, a 178.2 Hz, además del que se observa a 83.4 Hz.

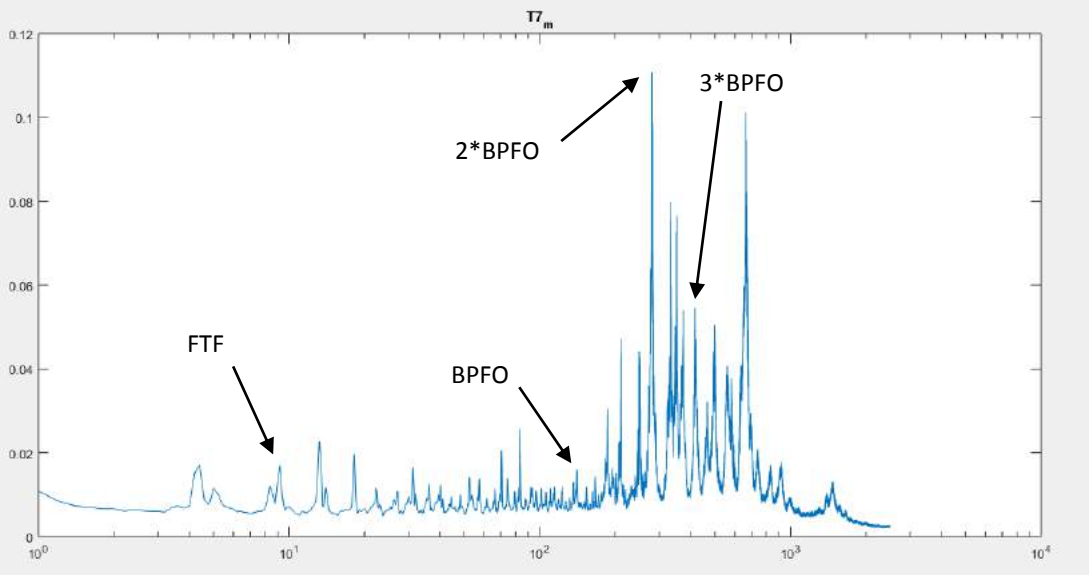


Figura 6.4.1.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 20 Hz).

En este último canal se distinguen los siguientes puntos. BPFO (140.6, 0.01597), 2*BPFO (280.4, 0.1107) y 3*BPFO (416.4, 0.05448). De nuevo se observa un pico a 83.4 Hz siguiendo a otro a 70.4 Hz. Entre las frecuencias BPFO y 2*BPFO se destaca el pico a 211 Hz y a alta frecuencia el máximo a 664.6 Hz.

Se representa a continuación una gráfica comparativa entre los espectros obtenidos en el rodamiento en perfecto estado y el rodamiento con fallo en pista exterior.

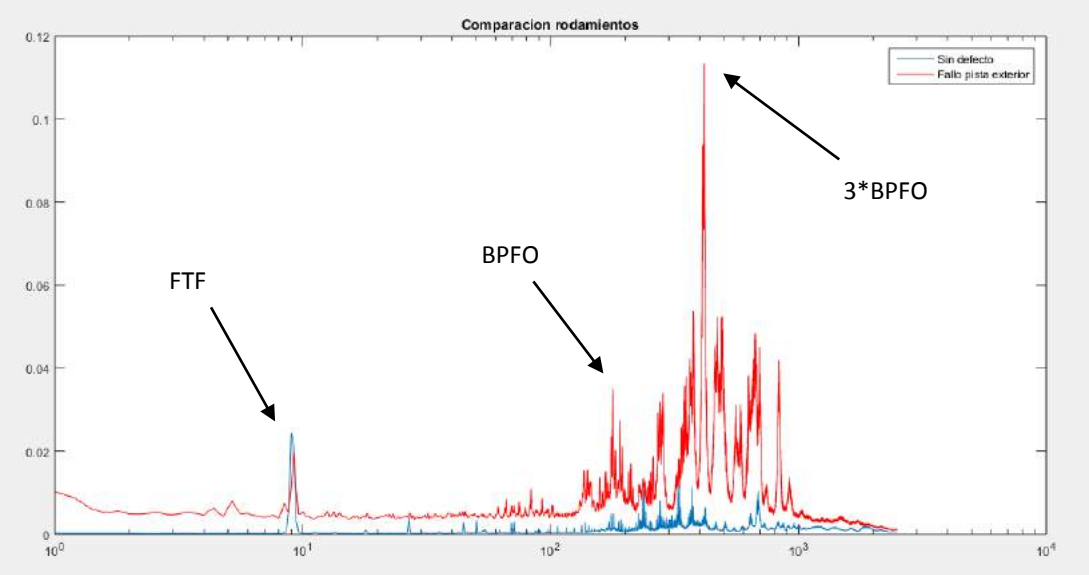


Figura 6.4.1.5. Comparación entre rodamientos sin fallo y con fallo en pista externa.

Se puede ver como coinciden en el primer pico cercano a la frecuencia FTF. La diferencia se observa, aparte de en las amplitudes, en que en la línea del rodamiento con defecto en pista exterior se distinguen los picos a la frecuencia BPFO y sus armónicos.

Se realiza un análisis similar para una presión aplicada de 3 bares y se observa que las gráficas obtenidas son muy similares. Para simplificar la memoria se suprimen dichas gráficas, pasando a mostrar una gráfica comparativa para ambas presiones, así como una tabla de valores.

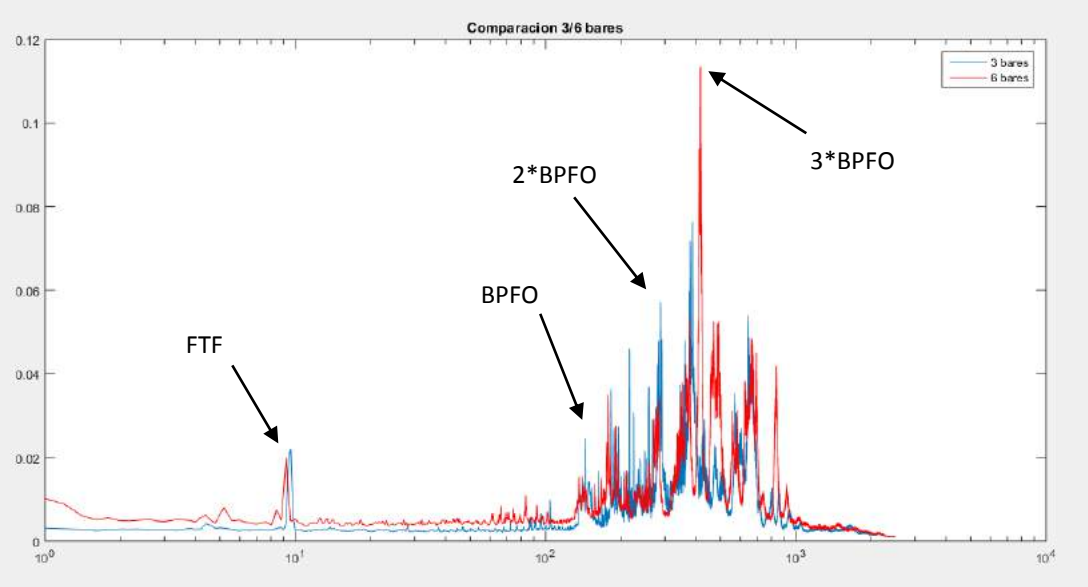


Figura 6.4.1.6. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (20 Hz).

	BPFO (155.84 Hz)		**2*BPFO (311.68 Hz)**		**3*BPFO (467.52 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(144.6, 0.0244)	(140.8, 0.0166)	(288.6, 0.07901)	(280.4, 0.03645)	(422, 0.04789)	(470.4, 0.06286)
T5_m	(163.2, 0.02469)	(157.8, 0.02575)	(288.6, 0.07455)	(280.4, 0.05838)	(431.2, 0.08044)	(416.4, 0.07666)
T6_m	(144.6, 0.03648)	(157.8, 0.01521)	(288.6, 0.05723)	(284.2, 0.0341)	(431.2, 0.07638)	(416.4, 0.1134)
T7_m	(144.6, 0.05607)	(140.6, 0.01597)	(288.6, 0.1122)	(280.4, 0.1107)	(431.2, 0.09805)	(416.4, 0.05448)

En la gráfica se observa que, por lo general, las amplitudes a 3 bares son mayores que a 6 bares, como era de esperar.

6.4.2. Rodamiento con defecto en pista exterior a 10 Hz.

Se representan a continuación las gráficas obtenidas a la frecuencia de 10 Hz y con una presión aplicada de 6 bares.

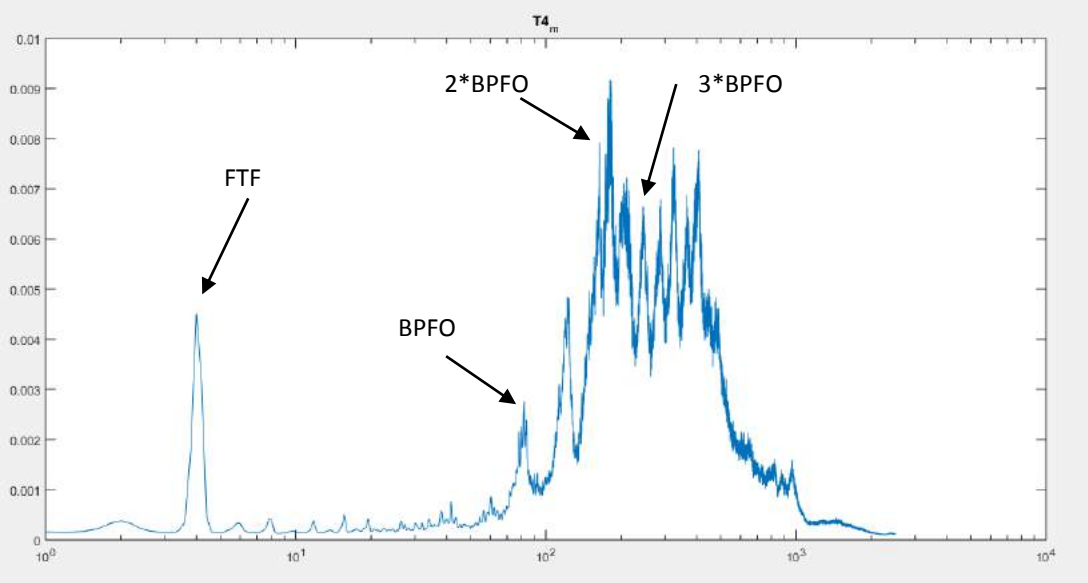


Figura 6.4.2.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 10 Hz).

Se veía anteriormente que la BPFO teórica para una frecuencia de 10 Hz es 77.92 Hz. Se distinguen picos a las siguientes frecuencias. BPFO (81.8, 0.002763), 2*BPFO (163.6, 0.007918) y 3*BPFO (245.2, 0.006645). Además de los picos señalados se pueden ver otros para frecuencias no estudiadas. El primero destacable es a 41.8 Hz, otro a 122.4 Hz y el máximo a 180.6 Hz.

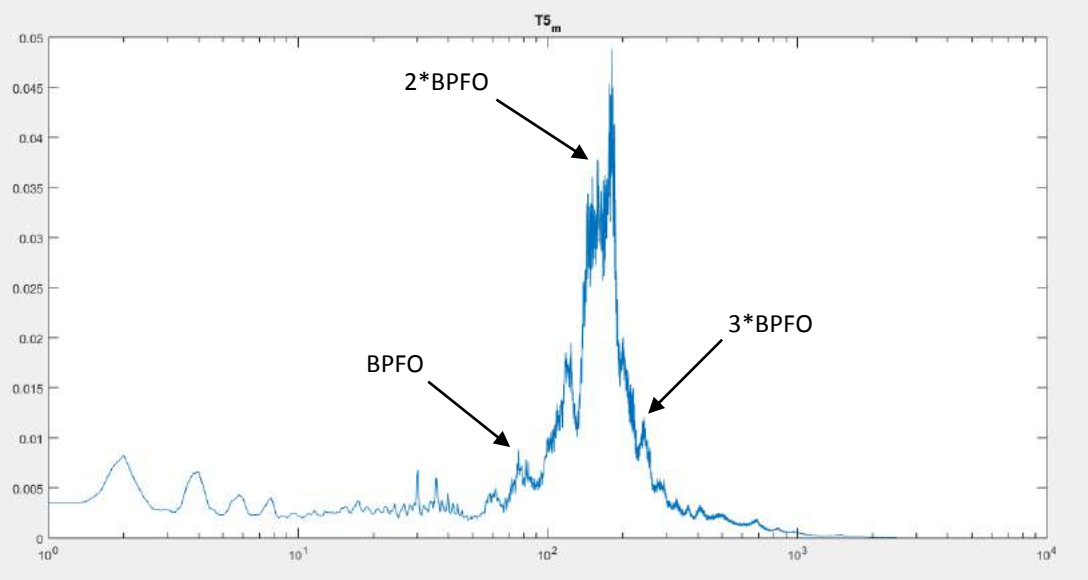


Figura 6.4.2.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 10 Hz).

En el canal 5 se observan picos a las siguientes frecuencias. BPFO (76.6, 0.008807), 2*BPFO (158.4, 0.03778) y 3*BPFO (244.4, 0.01203). También se observan picos a frecuencias no estudiadas. Por ejemplo, a la frecuencia de 30.2 Hz, 35.8 Hz, 124 Hz y el máximo a 180.4 Hz.

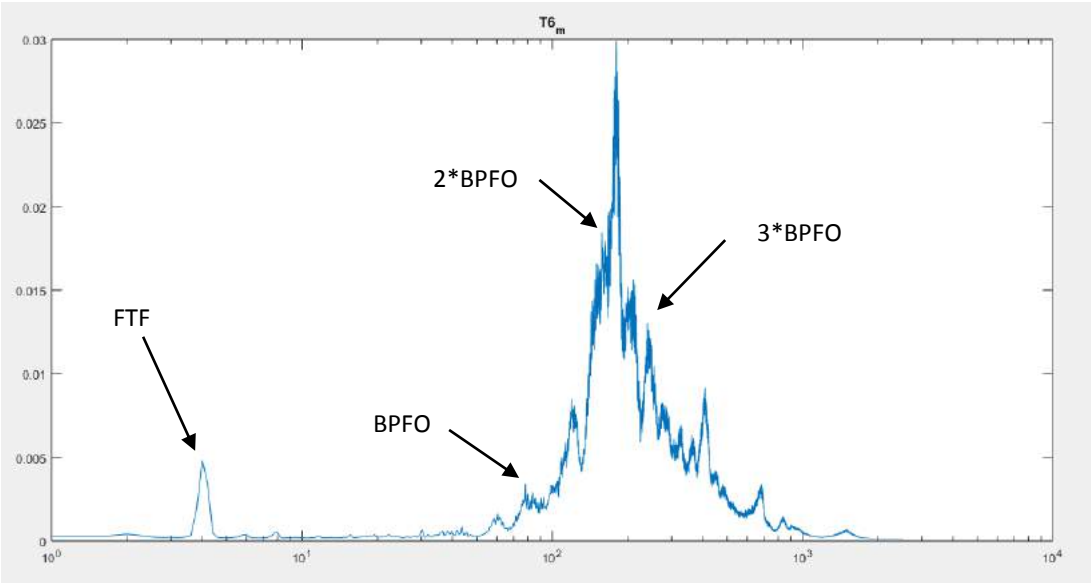


Figura 6.4.2.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 10 Hz).

En la gráfica anterior se distinguen los siguientes máximos. BPFO (78.2, 0.003422), 2*BPFO (158.4, 0.01847) y 3*BPFO (240.8, 0.01304). De nuevo se observan picos a frecuencias no estudiadas. Entre las frecuencias BPFO y 2*BPFO hay uno a 119.6 Hz y entre las frecuencias 2*BPFO y 3*BPFO hay un máximo a 180.6 Hz.

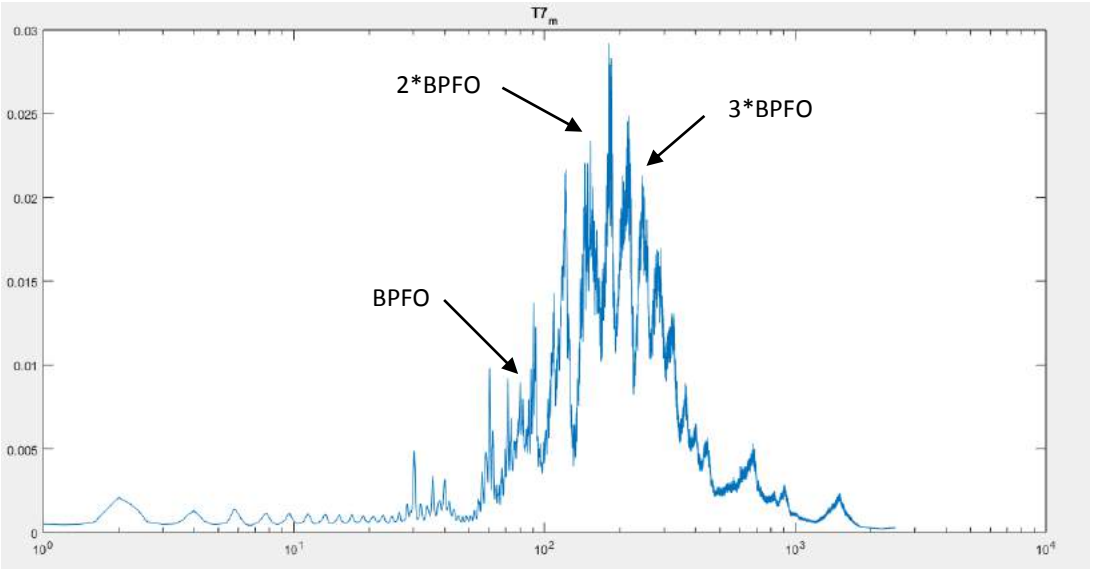


Figura 6.4.2.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 10 Hz).

Se distinguen los siguientes picos. BPFO (80, 0.008933), 2*BPFO (152.6, 0.02338) y 3*BPFO (244.4, 0.02133). En este canal se observan distintos picos para frecuencias no estudiadas. Antes de la BPFO, se

destacan dos, a 30.2 Hz y a 60.4 Hz. Entre la BPFO y la 2*BPFO se ve uno a 90.4 Hz y otro a 121.6 Hz. Finalmente, entre la 2*BPFO y la 3*BPFO hay un máximo a 180.4 Hz.

El análisis para una presión aplicada de 3 bares es análogo al realizado a 6 bares. Como en el apartado anterior, se procede a la comparación de los resultados a ambas presiones mediante una gráfica y una tabla comparativas.

	BPFO (77.92 Hz)		**2*BPFO (155.84 Hz)**		**3*BPFO (233.76 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(89.6, 0.004011)	(81.8, 0.002763)	(167.6, 0.01629)	(163.6, 0.007918)	(238.8, 0.01629)	(245.2, 0.006645)
T5_m	(85.8, 0.01228)	(76.6, 0.008807)	(159, 0.04418)	(158.4, 0.03778)	(235, 0.0177)	(244.4, 0.01203)
T6_m	(87.8, 0.003991)	(78.2, 0.003422)	(169.2, 0.017)	(158.4, 0.01847)	(231.8, 0.01337)	(240.8, 0.01304)
T7_m	(80, 0.01041)	(80, 0.008933)	(163.2, 0.03714)	(152.6, 0.02338)	(236.2, 0.05632)	(244.4, 0.2133)

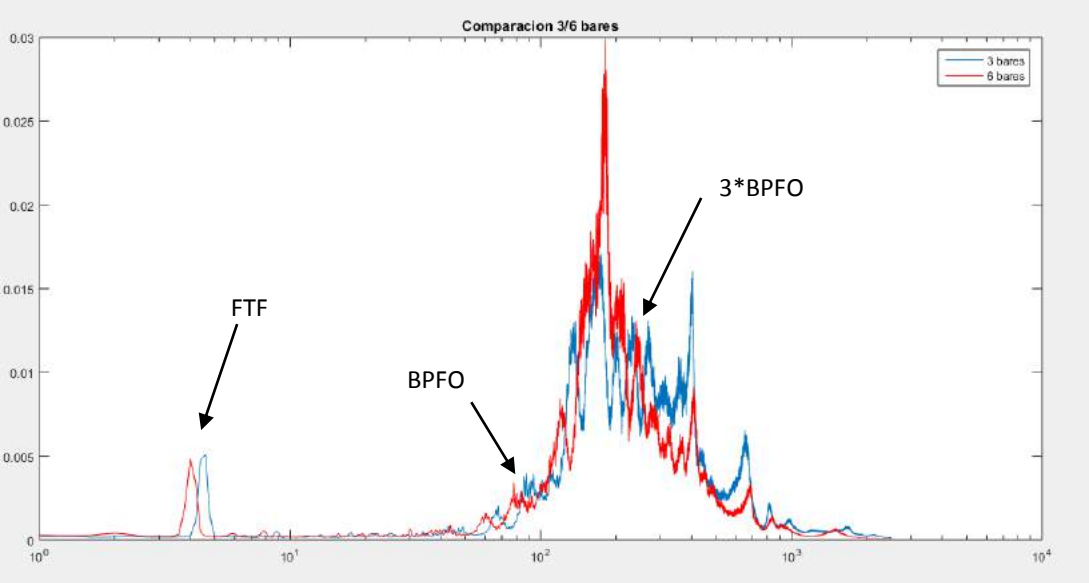


Figura 6.4.2.5. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (20 Hz).

Se puede observar en la gráfica comparativa que las amplitudes y las frecuencias de los picos, por lo general, son mayores para la presión aplicada de 3 bares.

6.4.3. Rodamiento con defecto en pista exterior a 30 Hz.

Se muestran a continuación los espectros obtenidos de los ensayos realizados a una frecuencia de 30 Hz y con una presión aplicada de 6 bares.

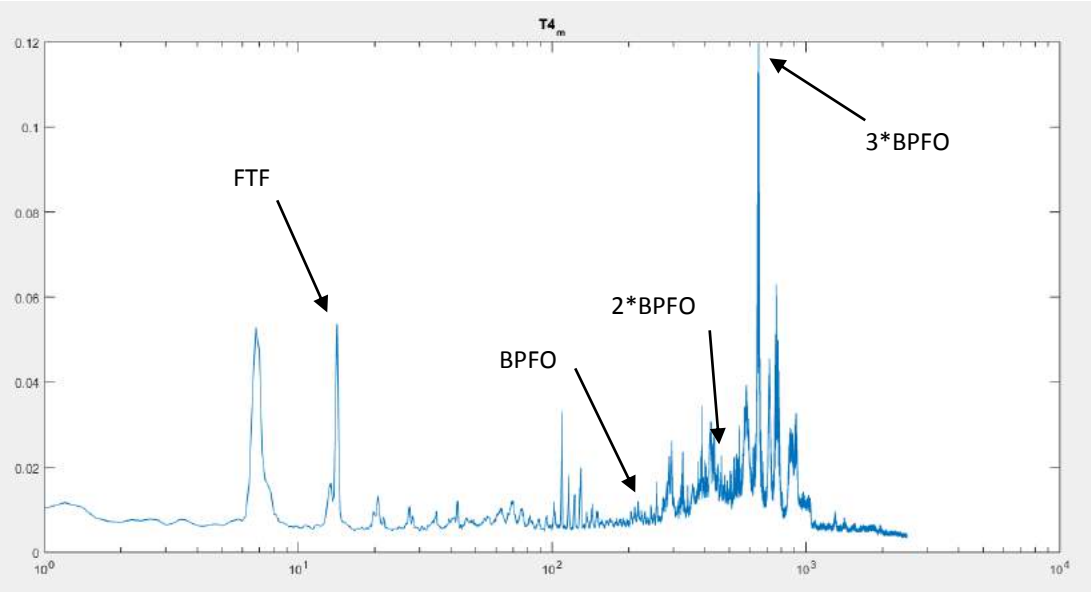


Figura 6.4.3.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 30 Hz).

A esta frecuencia de giro se observan más picos. La BPFO teórica se veía anteriormente que era 233.76 Hz. Se destacan los siguientes máximos. BPFO (218.2, 0.01183), 2*BPFO (464, 0.02277) y 3*BPFO (650.6, 0.1197). Además de los picos señalados, se pueden distinguir otros a frecuencias no estudiadas. Antes de la BPFO hay uno a 109.2 Hz. Entre la BPFO y la 2*BPFO destaca el pico a 388.4 Hz y otro menor a 295.8 Hz. Hay que señalar también el producido a 6.8 Hz, siendo esta frecuencia la mitad de la señalada como FTF (14 Hz).

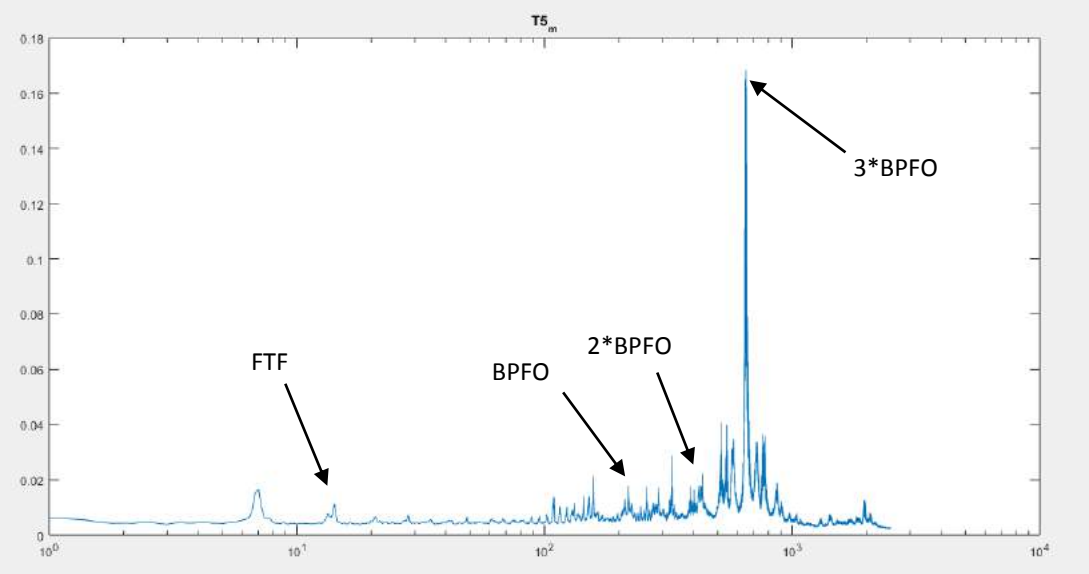


Figura 6.4.3.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 30 Hz).

En la gráfica anterior se señalan los siguientes puntos. BPFO (218, 0.01779), 2*BPFO (435.8, 0.02254) y 3*BPFO (650.6, 0.1683). De nuevo se dan algunos picos a frecuencias no estudiadas. Antes de la BPFO se destacan los producidos a 109.2 Hz y a 157.6 Hz. Entre la BPFO y la 2*BPFO se observa uno a 327 Hz y entre la 2*BPFO y la 3*BPFO hay otro a 517.8 Hz.

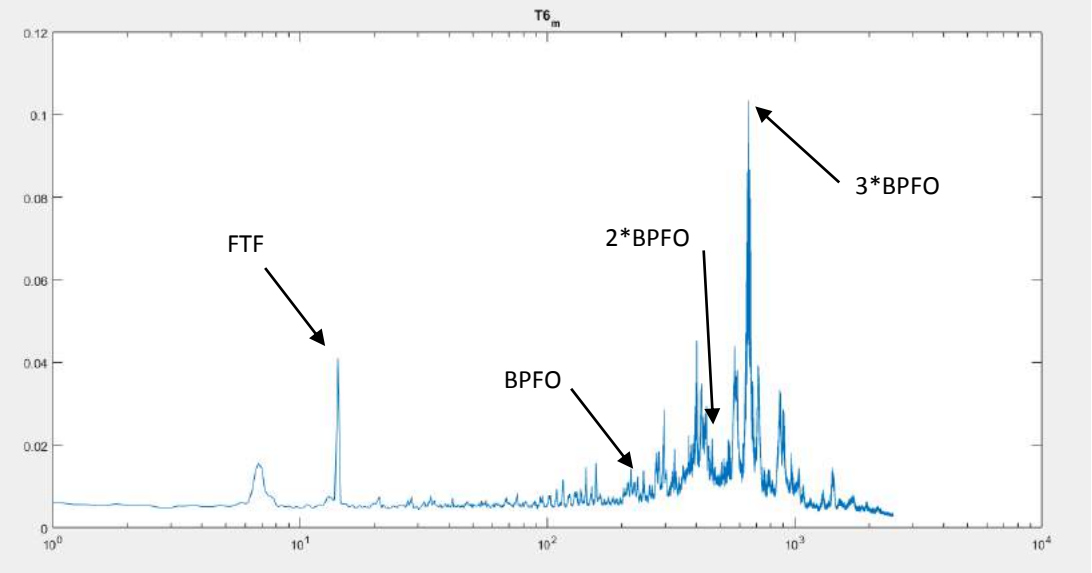


Figura 6.4.3.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 30 Hz).

En este canal se pueden destacar los siguientes puntos. BPFO (232, 0.01249), 2*BPFO (464, 0.02156) y 3*BPFO (647.4, 0.1035). Se observan picos a frecuencias no estudiadas. Antes de la BPFO se dan a las frecuencias de 115.6 Hz, 143.6 Hz y 157.6 Hz. Entre la BPFO y la 2*BPFO destacan dos, a 295.8 Hz y a 402.4 Hz. Otro pico destacable está entre la 2*BPFO y la 3*BPFO a 572 Hz.

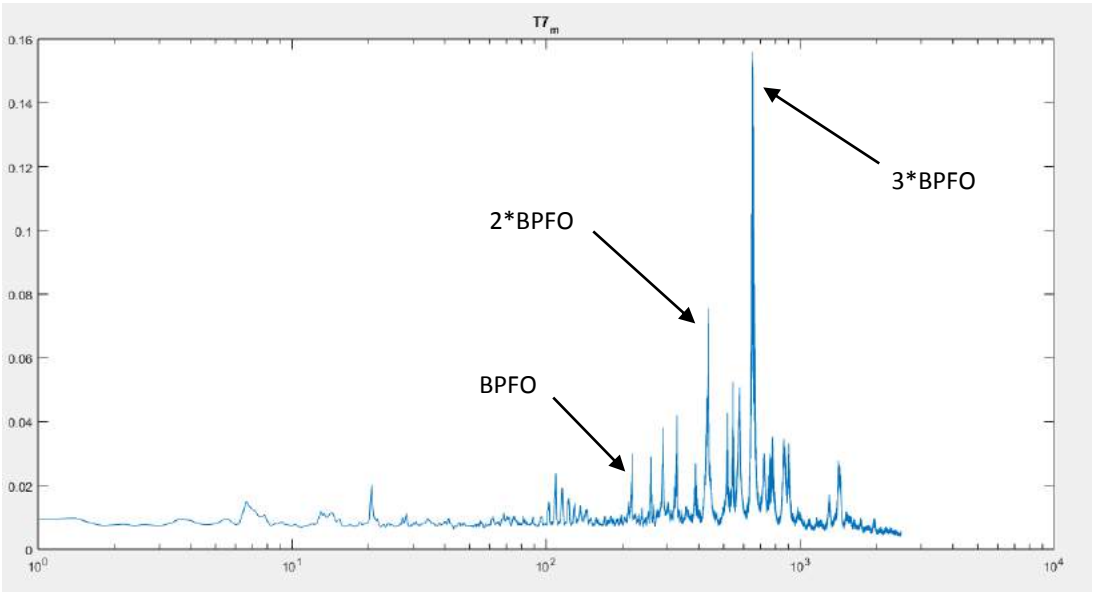


Figura 6.4.3.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 30 Hz).

En la gráfica anterior se marcan los siguientes puntos. BPFO (218, 0.03), 2*BPFO (435.8, 0.07555) y 3*BPFO (650.6, 0.156). Este canal presenta muchos picos para frecuencias no estudiadas. Un primer pico a 20.6 Hz y otro a 109.6 Hz preceden al que se da a la BPFO. Entre esta última y la 2*BPFO se dan tres a 259 Hz, 289.4 Hz y 327 Hz. Por último, entre la 2*BPFO y la 3*BPFO se da otro a 544.8 Hz.

Se realiza un análisis similar para los espectros obtenidos con una presión aplicada de 3 bares. A continuación se muestran una tabla y una gráfica comparativas.

	BPFO (233.76 Hz)		**2*BPFO (467.52 Hz)**		**3*BPFO (701.28 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(221, 0.09495)	(218.2, 0.01183)	(456, 0.01685)	(464, 0.02277)	(659.2, 0.1316)	(650.6, 0.1197)
T5_m	(221, 0.04586)	(218, 0.01779)	(441.8, 0.1061)	(435.8, 0.02254)	(662.6, 0.09721)	(650.6, 0.1683)
T6_m	(235.2, 0.03804)	(232, 0.01249)	(433.6, 0.03607)	(464, 0.02156)	(656, 0.1512)	(647.4, 0.1035)
T7_m	(221, 0.1811)	(218, 0.03)	(441.8, 0.09256)	(435.8, 0.07555)	(659.2, 0.161)	(650.6, 0.156)

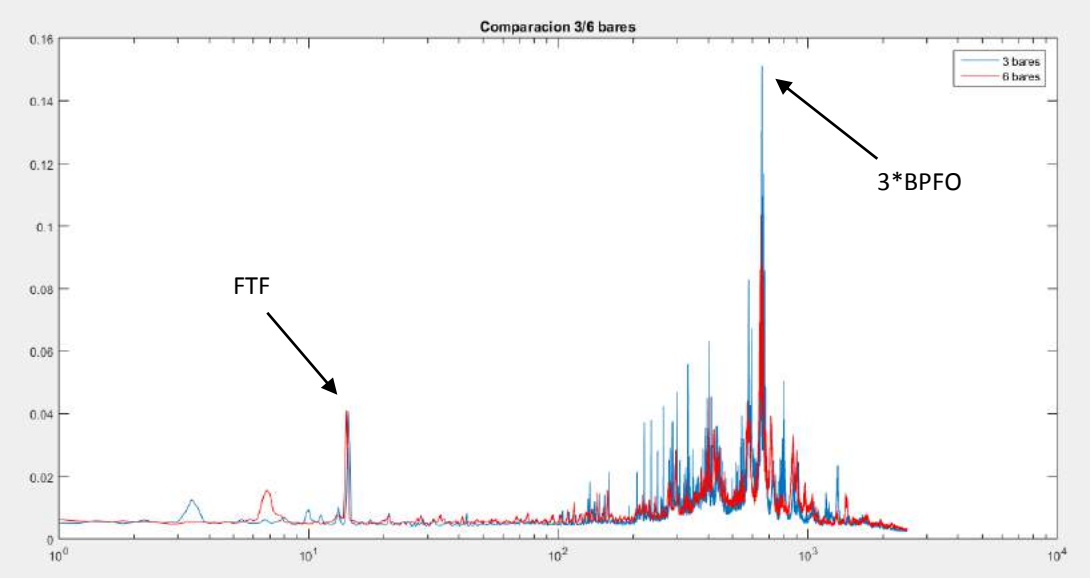


Figura 6.4.3.5. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (30 Hz).

Se observa en la gráfica que los picos, en general, coinciden en frecuencia para ambas presiones. Siendo las amplitudes de los obtenidos a 3 bares mayores que los obtenidos a 6 bares.

6.4.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro.

Para terminar con la comparación de las gráficas obtenidas para un rodamiento con defecto en pista exterior, se representan a continuación en la misma gráfica los espectros obtenidos para las diferentes frecuencias de giro una vez adimensionalizado el eje de frecuencia.

En primer lugar se representa la combinación de los espectros registrados a 3 bares de presión. Se puede comprobar que los picos a las tres frecuencias estudiadas coinciden. Esto reafirma que los picos obtenidos proceden de las vibraciones del rodamiento, y no de ruido.

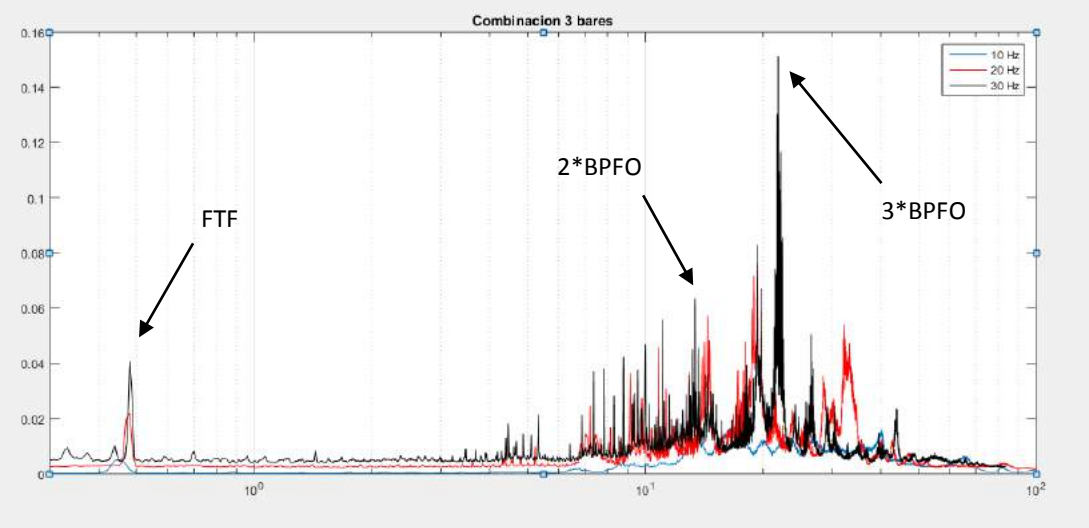


Figura 6.4.4.1. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (3 bares).

A continuación se muestra la combinación de los espectros registrados a 6 bares de presión. Al igual que en la gráfica anterior, se comprueba que los picos coinciden.

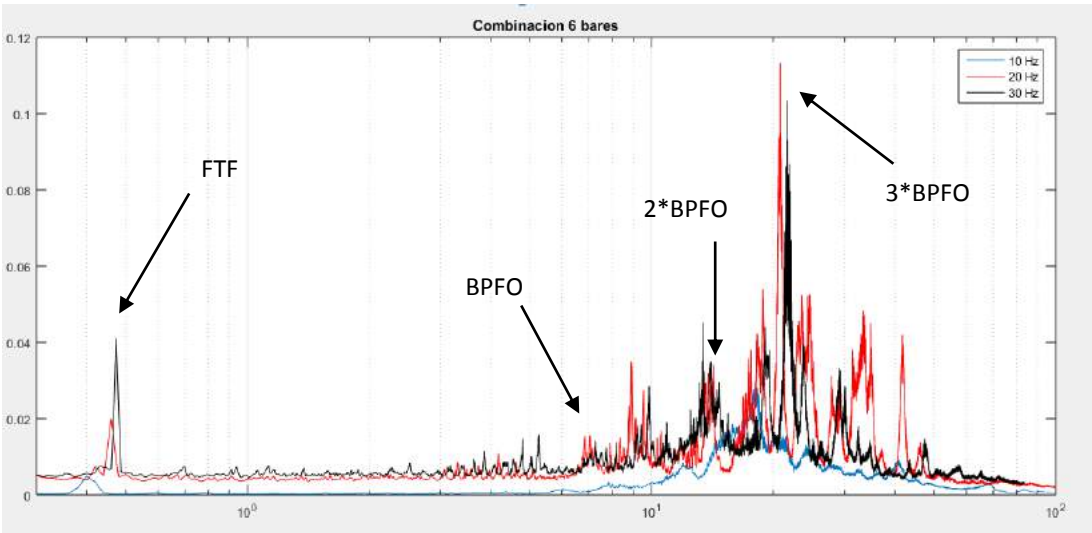


Figura 6.4.4.2. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (6 bares).

A continuación se va a representar una nueva gráfica en la que se combinan las tres frecuencias de giro estudiadas. En primer lugar se escalan las curvas con el pico de la FTF y, a continuación, se realiza la media de las tres curvas y se representa frente al eje de frecuencias adimensionalizado.

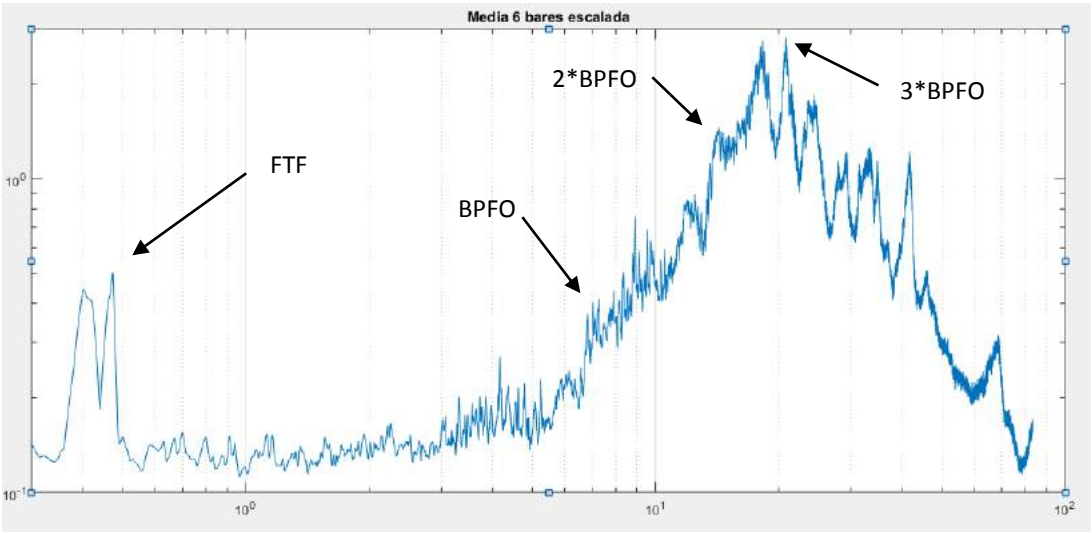


Figura 6.4.4.3. Media de las tres curvas escaladas (6 bares).

Se observan diversos picos a diferentes frecuencias que no se pueden identificar.

6.5. Rodamiento con defecto en pista interior.

El daño en la pista interior se realizó con ayuda de una muela abrasiva montada en una “Dremel”, que es una máquina multi-herramienta de alta velocidad. En las siguientes imágenes se puede ver dicho defecto.

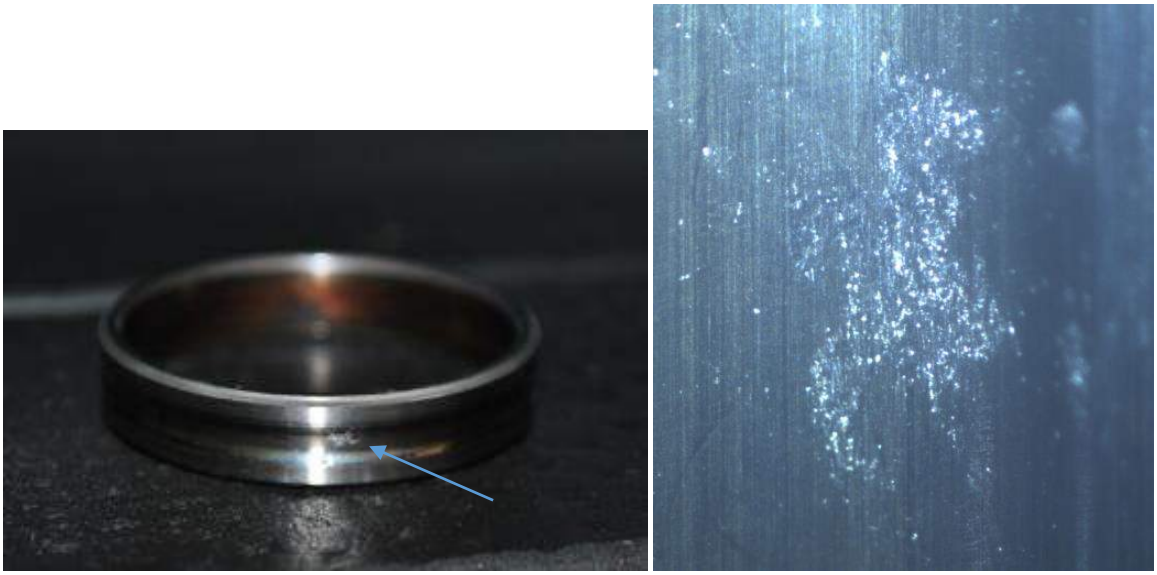


Figura 6.5.1. Defecto en pista interior.

6.5.1. Rodamiento con defecto en pista interior a 20 Hz.

A continuación se muestran los espectros obtenidos en los ensayos realizados con una presión aplicada de 6 bares.

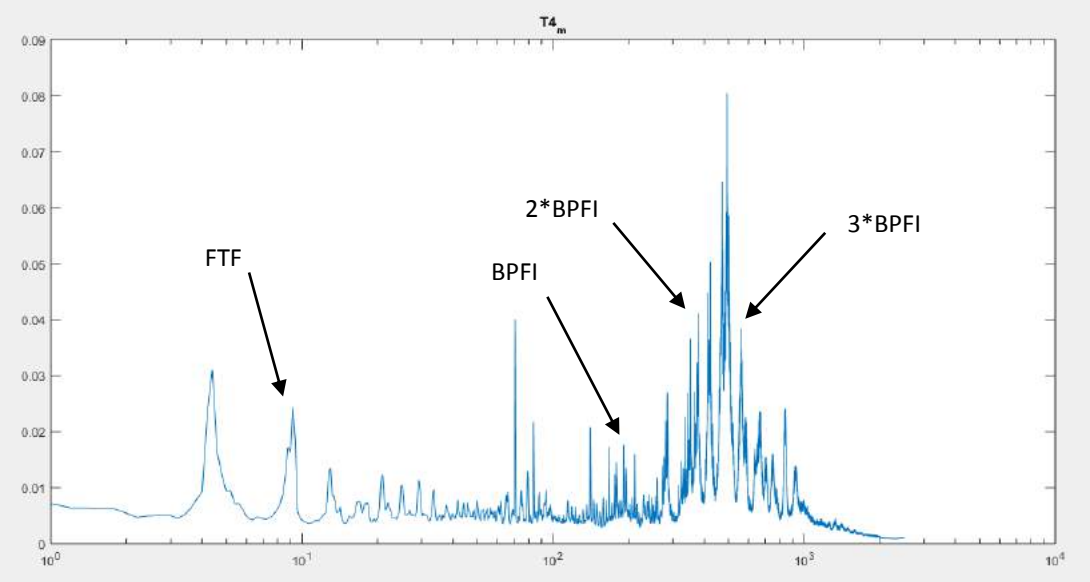


Figura 6.5.1.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (6 bares, 20 Hz).

Se veía anteriormente que el espectro típico de un rodamiento con defecto en la pista interior presentaba picos a la frecuencia BPFI (184.16 Hz para la actual frecuencia de giro) y sus armónicos modulados por bandas laterales.

En la gráfica anterior se señalan los siguientes puntos. BPFI (191.4, 0.0177), 2*BPFI (378.4, 0.04101) y 3*BPFI (563, 0.03845). También se observan picos a la frecuencia FTF y sus armónicos. Se ven picos a frecuencias no estudiadas. Destaca uno anterior a la frecuencia BPFI a 70.6 Hz. El pico máximo se da a 492.4 Hz.

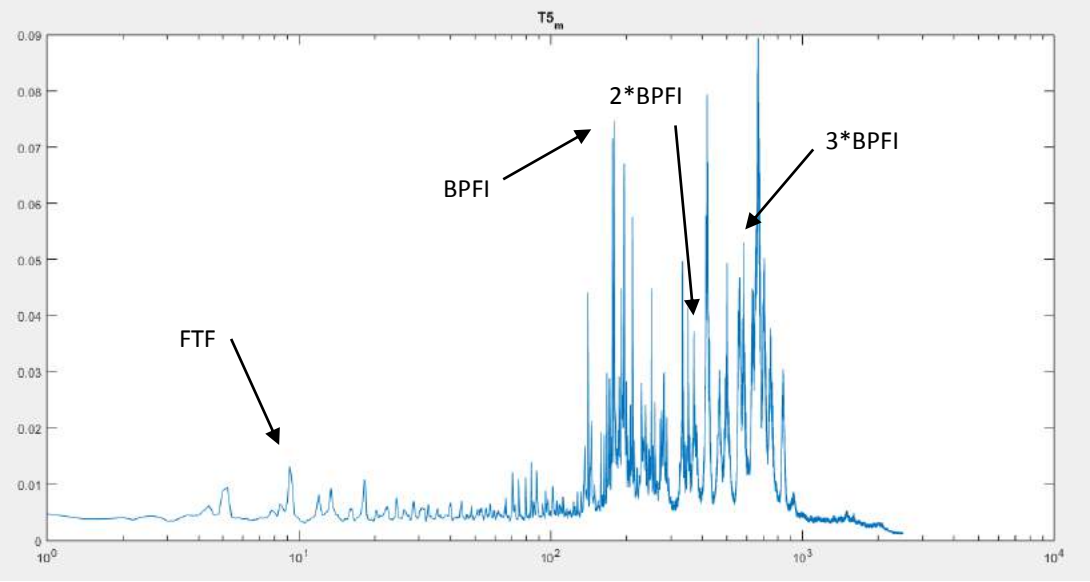


Figura 6.5.1.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (6 bares, 20 Hz).

Al igual que en el caso anterior, aparte de los picos a la BPFI (179, 0.0747) y sus armónicos, 2*BPFI (370.2, 0.03719) y 3*BPFI (584.6, 0.05303), se pueden observar picos a la frecuencia FTF y sus armónicos. De nuevo se vuelven a ver muchos picos que no se corresponden con ninguna frecuencia estudiada. Se destaca el pico anterior al de la frecuencia BPFI a 140.8 Hz. Hay otro a pico destacable entre las frecuencias 2*BPFI y 3*BPFI a 417.6 Hz. Y el máximo a 668.2 Hz.

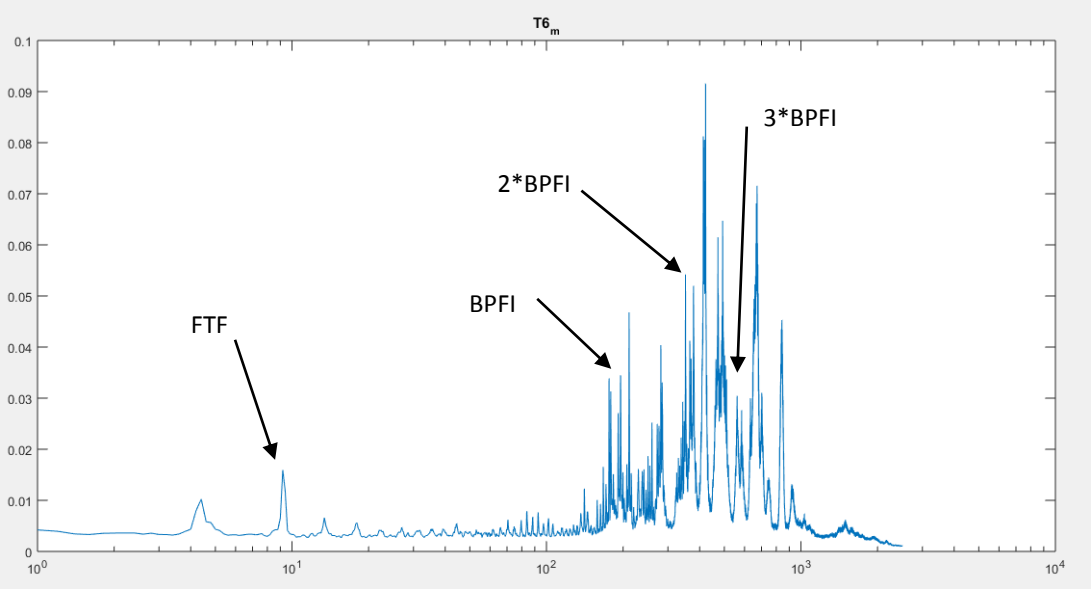


Figura 6.5.1.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (6 bares, 20 Hz).

En este caso se marcan los puntos a las frecuencias BPFI (195.6, 0.03445), 2*BPFI (378.4, 0.05199) y 3*BPFI (561.6, 0.03045). Se vuelven a dar diversos picos cuyas frecuencias no son las estudiadas. Antes del pico a la BPFI se ve uno a 141 Hz. Entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI se destacan dos picos a las frecuencias de 211.2 Hz y 281.6 Hz. El máximo se da entre las frecuencias 2*BPFI y 3*BPFI a 422 Hz.

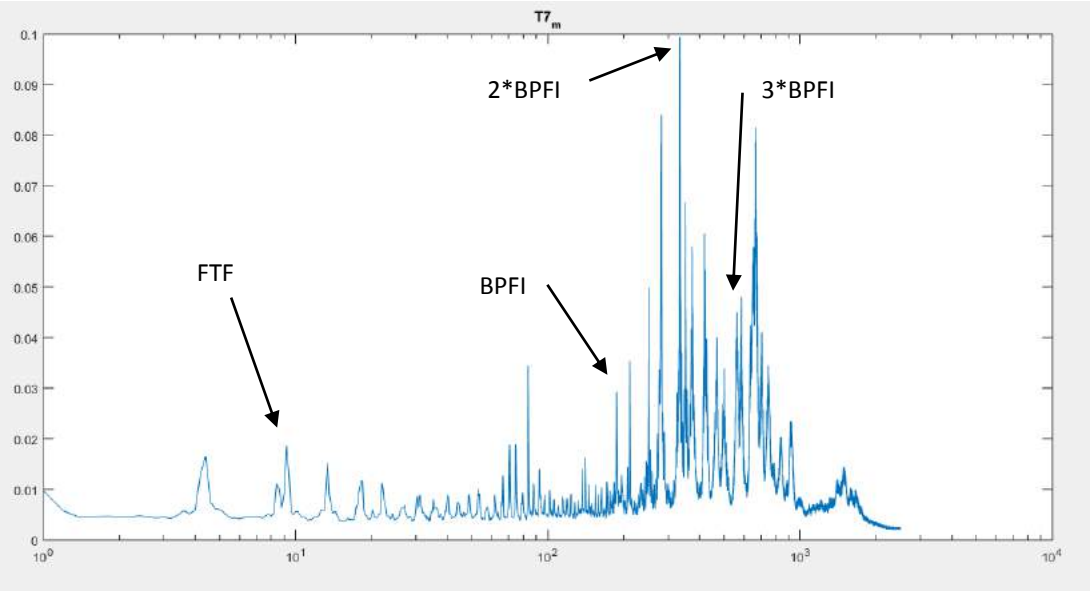


Figura 6.5.1.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (6 bares, 20 Hz).

En este último canal se distinguen los siguientes puntos. BPFI (187.2, 0.0293), 2*BPFI (351.8, 0.09945) y 3*BPFI (561.6, 0.045). De nuevo se ven picos a frecuencias no estudiadas. Se destaca un primer pico anterior a la BPFI a la frecuencia de 83.4 Hz y otro a 140.8 Hz. Entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI hay tres a las frecuencias de 187.2 Hz, 211.2 Hz y 250.6 Hz. Por último, entre las frecuencias 2*BPFI y 3*BPFI hay un pico a 417.6 Hz.

Se representa a continuación una gráfica comparativa entre los espectros obtenidos en el rodamiento en perfecto estado y el rodamiento con fallo en pista interior.

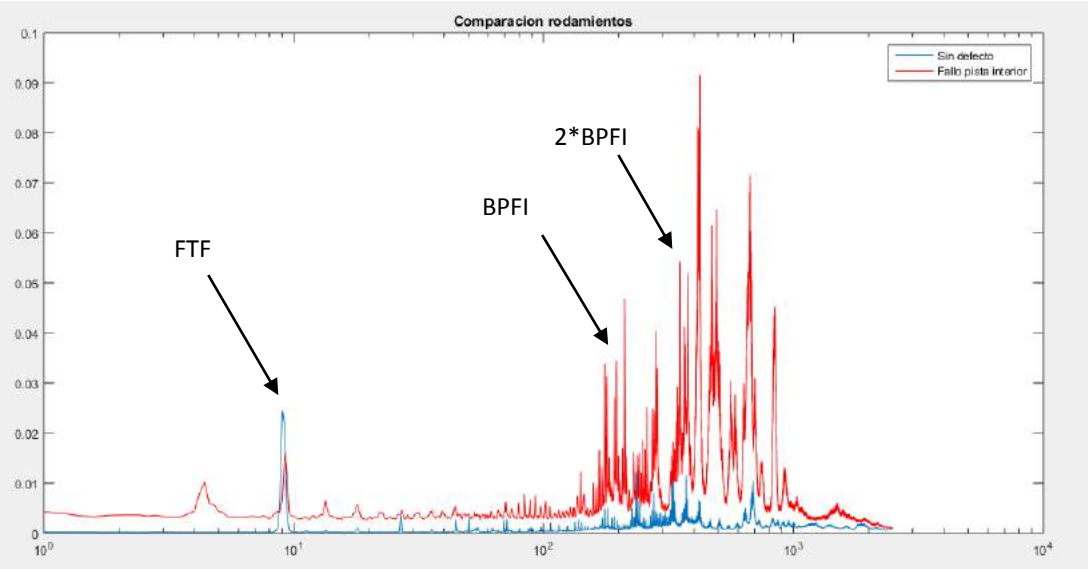


Figura 6.5.1.5. Comparación entre rodamientos sin fallo y con fallo en pista interna.

Se puede ver como coinciden en el primer pico cercano a la frecuencia FTF. La diferencia se observa, aparte de en las amplitudes, en que en la línea del rodamiento con defecto en pista interior se distinguen los picos a la frecuencia BPFI y sus armónicos.

Un análisis similar para los espectros obtenidos con una presión aplicada de 3 bares ofrece resultados similares. Se muestran a continuación una tabla y una gráfica comparativas.

	BPFI (184.16 Hz)		**2*BPFI (368.32 Hz)**		**3*BPFI (552.48)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(192.6, 0.01346)	(191.4, 0.0177)	(380.6, 0.05069)	(378.4, 0.04101)	(582.6, 0.03905)	(563, 0.03845)
T5_m	(184, 0.0438)	(179, 0.0747)	(361.4, 0.03995)	(370.2, 0.03719)	(577.6, 0.08981)	(584.6, 0.05303)
T6_m	(184, 0.02371)	(195.6, 0.03445)	(380, 0.07013)	(378.4, 0.05199)	(573, 0.03984)	(561.6, 0.03045)
T7_m	(192.6, 0.06223)	(187.2, 0.0293)	(361.4, 0.04274)	(351.8, 0.09945)	(577.6, 0.09393)	(561.6, 0.045)

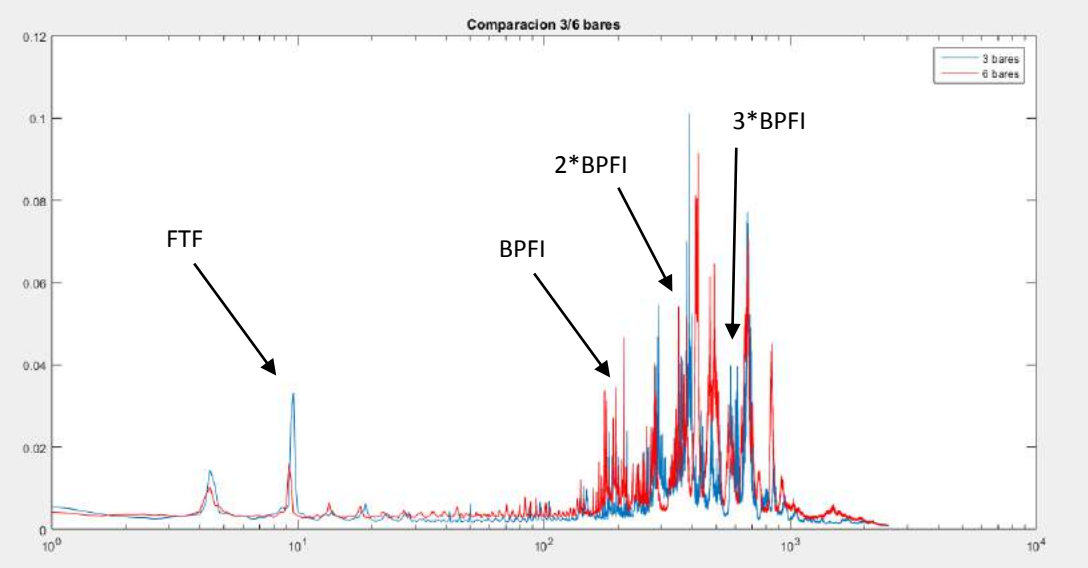


Figura 6.5.1.6. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (20 Hz).

Se puede ver que los picos coinciden, siendo las amplitudes de los espectros a 3 bares mayores que las obtenidas en los ensayos a 6 bares.

6.5.2. Rodamiento con defecto en pista interior a 10 Hz.

Se muestran a continuación los espectros obtenidos de los ensayos realizados con una frecuencia de 10 Hz y con una presión aplicada de 3 bares.

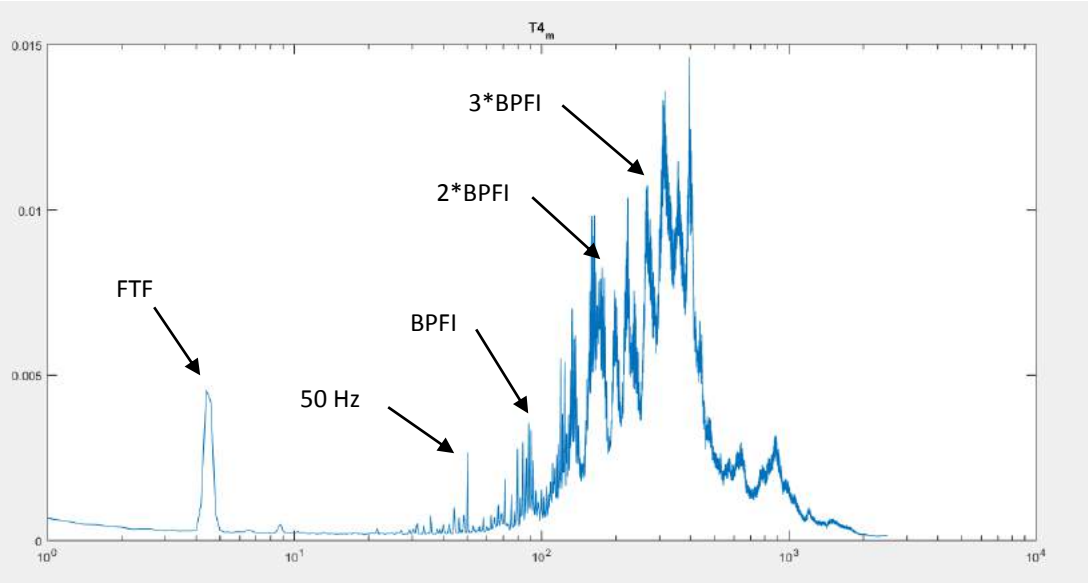


Figura 6.5.2.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 10 Hz).

En la gráfica anterior se observa un primer pico a la frecuencia FTF, así como un segundo pico a la frecuencia de la red (50 Hz). Se veía anteriormente que la frecuencia BPFI para esta frecuencia de giro es 92.08 Hz. Se marcan en la gráfica los siguientes puntos. BPFI (90.6, 0.003358), 2*BPFI (179.2, 0.008265) y 3*BPFI (267.6, 0.01074). También se ven picos a frecuencias no estudiadas. Se destacan dos entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI a 133 Hz y a 163 Hz. Entre las frecuencias 2*BPFI y 3*BPFI está el producido a 223.6 Hz y, por último, el máximo se encuentra a 396.2 Hz.

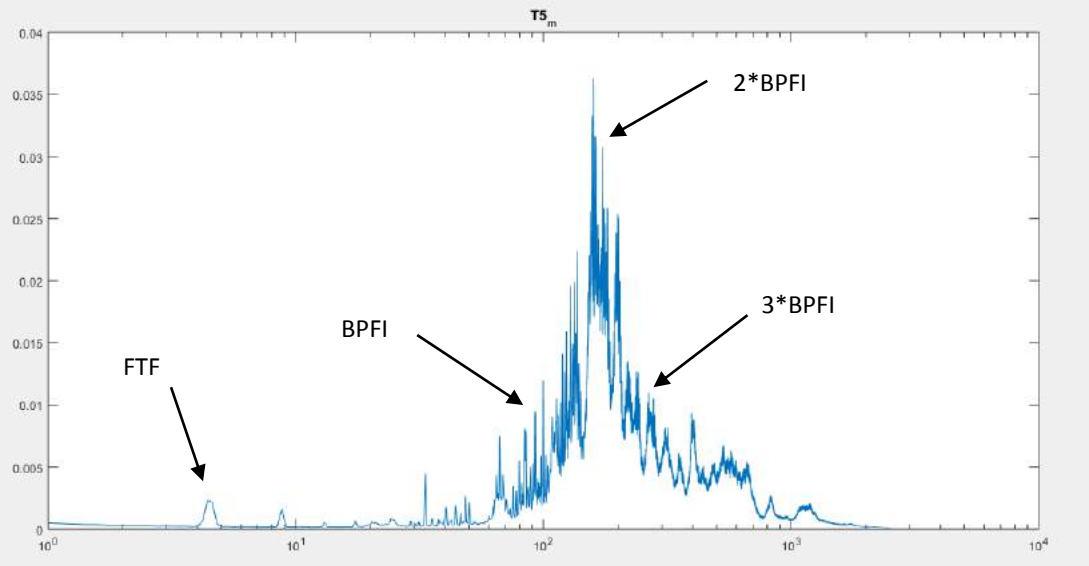


Figura 6.5.2.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 10 Hz).

Se marcan para este canal los siguientes puntos. BPFI (92.6, 0.009507), 2*BPFI (181, 0.03072) y 3*BPFI (278.6, 0.01057). Aparte de los puntos marcados se ven picos a frecuencias no estudiadas. El primer pico se da a 33.4 Hz, seguido de otro a 66.6 Hz. Entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI se encuentra el máximo a 159.2 Hz.

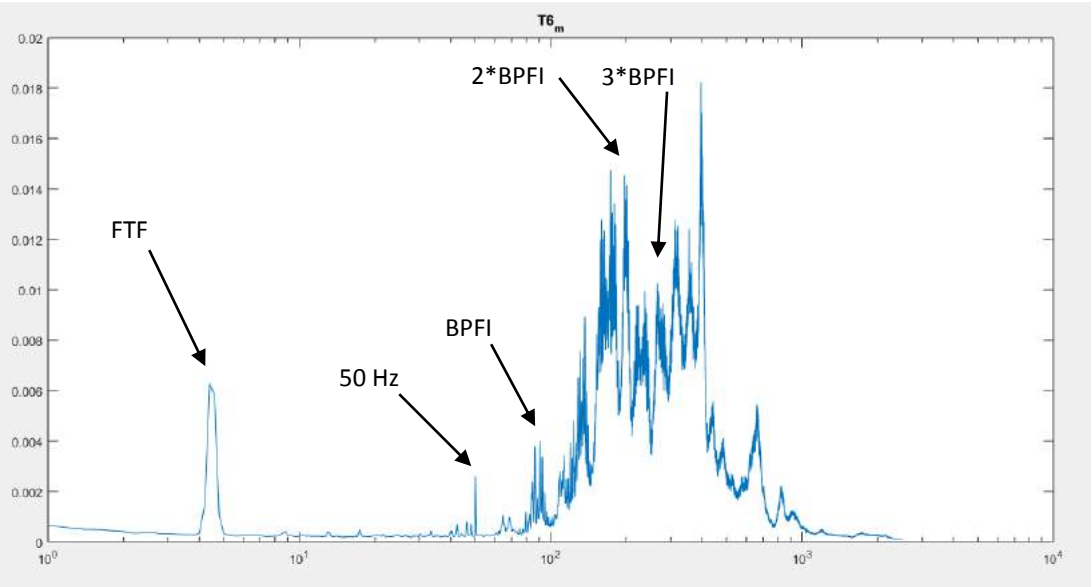


Figura 6.5.2.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 10 Hz).

En este caso los puntos marcados son BPFI (90.6, 0.004015), 2*BPFI (196.8, 0.01454) y 3*BPFI (265.6, 0.01025). También se observan picos a la frecuencia de la red y a la frecuencia FTF. Se pueden ver picos a frecuencias no estudiadas. Entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI hay uno a 136.8 Hz y otro a 173.4 Hz. Por último, el máximo se da a 396 Hz.

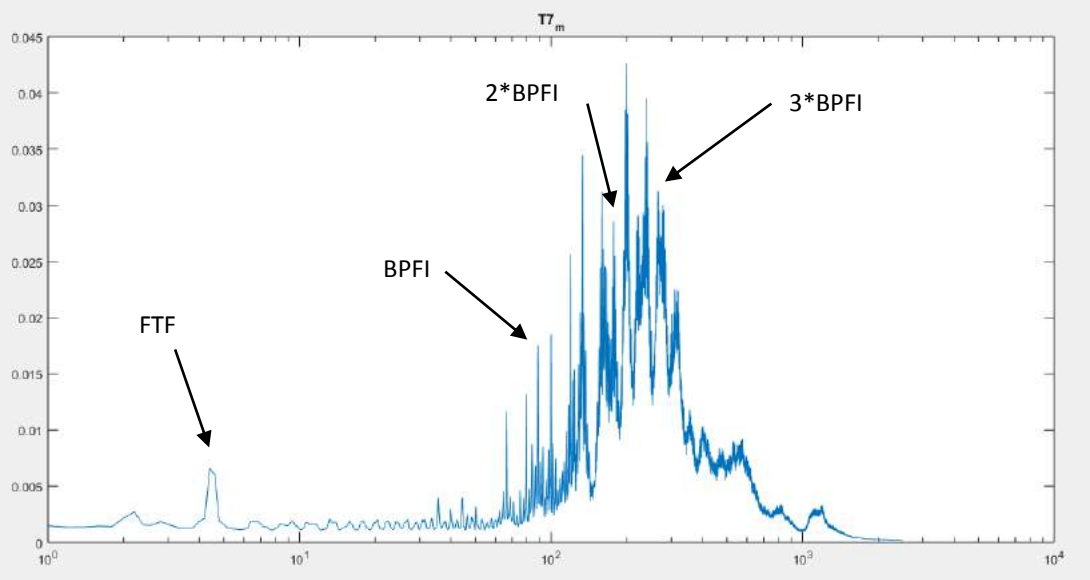


Figura 6.5.2.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 10 Hz).

En este último canal, se observan los siguientes picos. BPFI (92.6, 0.01749), 2*BPFI (177.2, 0.02858) y 3*BPFI (278.6, 0.03128). También se ven picos a frecuencias no estudiadas. Antes de la BPFI se presentan picos a 66.6 Hz y a 79.6 Hz. Entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI se destacan los picos a las frecuencias de 100 Hz y 133 Hz. Por último, entre las frecuencias 2*BPFI y 3*BPFI se encuentra el máximo a 199.2 Hz y otro pico destacable a 238.8 Hz.

A continuación se muestran una tabla y una gráfica comparativas de los espectros obtenidos de los ensayos realizados a 3 bares y a 6 bares de presión.

	BPFI (92.08 Hz)		**2*BPFI (184.16 Hz)**		**3*BPFI (276.24 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(90.6, 0.003358)	(81.4, 0.001036)	(179.2, 0.008265)	(183.6, 0.006311)	(267.6, 0.01074)	(274.8, 0.005182)
T5_m	(92.6, 0.009507)	(87.4, 0.007114)	(181, 0.03072)	(181.6, 0.05347)	(278.6, 0.01057)	(278, 0.009187)
T6_m	(90.6, 0.004015)	(96.2, 0.001168)	(196.8, 0.01454)	(186.6, 0.01915)	(265.6, 0.01025)	(275.4, 0.008483)
T7_m	(92.6, 0.01749)	(89.4, 0.005279)	(177.2, 0.02858)	(181.8, 0.01625)	(278.6, 0.03128)	(276.6, 0.01506)

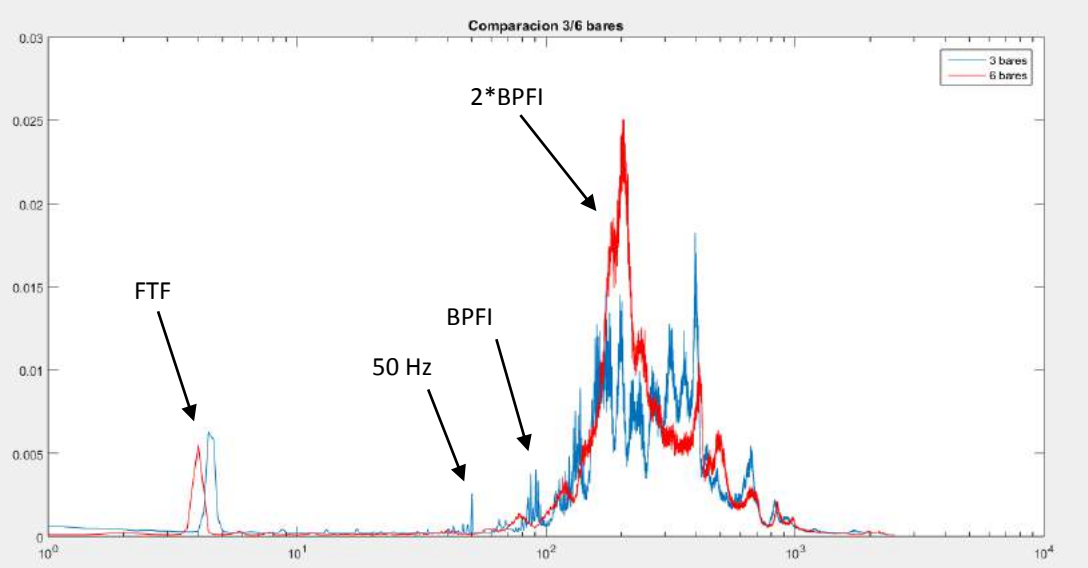


Figura 6.5.2.5. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (10 Hz).

Se puede observar el pico a la frecuencia FTF de ambas presiones muy cercano. Sin embargo, en el resto de frecuencias hay diferencias notables, presentando el espectro a 3 bares de presión más picos que el mismo a 6 bares. También se ve claramente el pico a la frecuencia de la red en el espectro a 3 bares.

6.5.3. Rodamiento con defecto en pista interior a 30 Hz.

Se representan en primer lugar los espectros de los ensayos realizados con una frecuencia de 30 Hz y una presión aplicada de 3 bares.

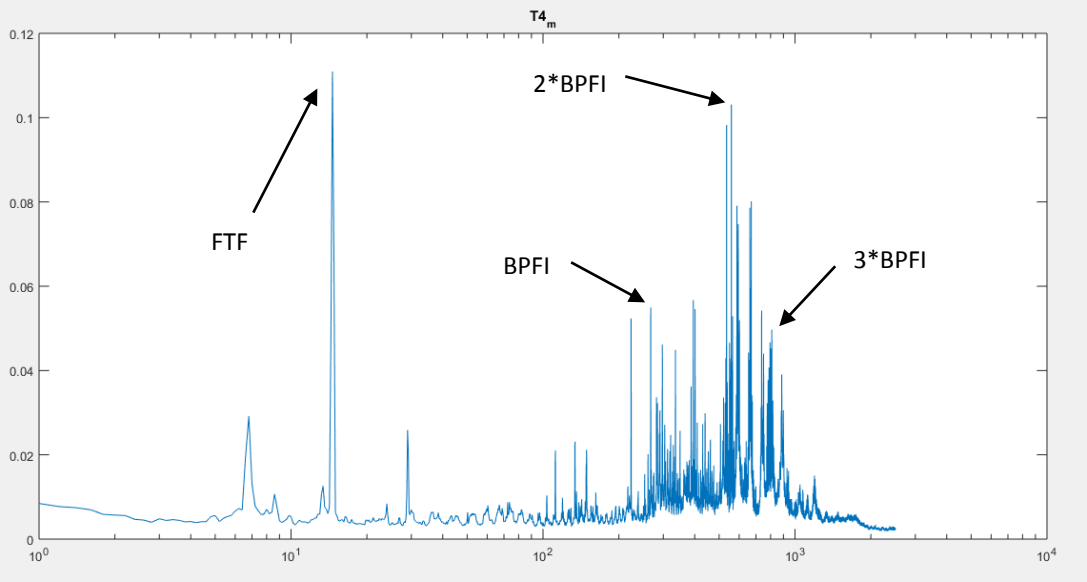


Figura 6.5.3.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 30 Hz).

Se veía anteriormente que la frecuencia BPFI para la actual frecuencia de giro es 276.24 Hz. Se marcan los siguientes puntos en la figura anterior. BPFI (267.6, 0.05497), 2*BPFI (559, 0.1031) y 3*BPFI (809.2, 0.0497). También se destaca el pico a la frecuencia FTF. Hay que señalar también picos a frecuencias no estudiadas. Antes de la frecuencia BPFI se observan picos a las frecuencias de 133.8 Hz y 223.6 Hz. Entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI se destaca el producido a 394.8 Hz. Por último, entre 2*BPFI y 3*BPFI se encuentra otro a 670.6 Hz.

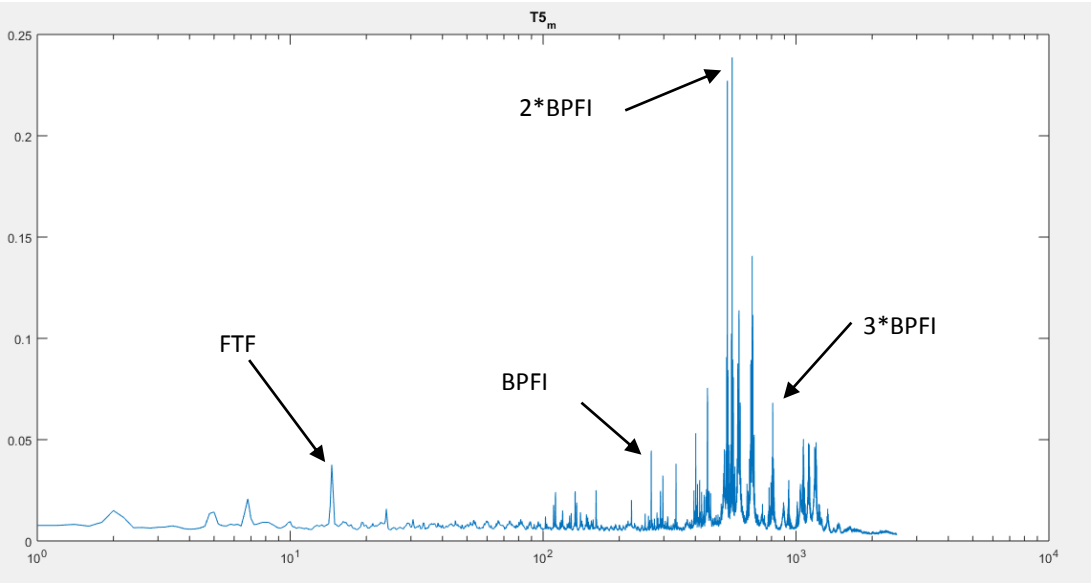


Figura 6.5.3.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 30 Hz).

Se puede ver en la gráfica anterior el pico a la frecuencia FTF, así como los siguientes puntos marcados. BPFI (267.6, 0.04457), 2*BPFI (559, 0.2387) y 3*BPFI (809.2, 0.06814). Además de los puntos señalados hay otros a frecuencias no estudiadas. Para frecuencias inferiores a la BPFI se dan picos a las siguientes frecuencias: 112 Hz, 133.8 Hz, 162 Hz y 223.6 Hz. Para frecuencias comprendidas entre BPFI y 2*BPFI se dan picos a las frecuencias de 335.4 Hz y 446.6 Hz. Por último, entre 2*BPFI y 3*BPFI se destaca un pico a 670.6 Hz.

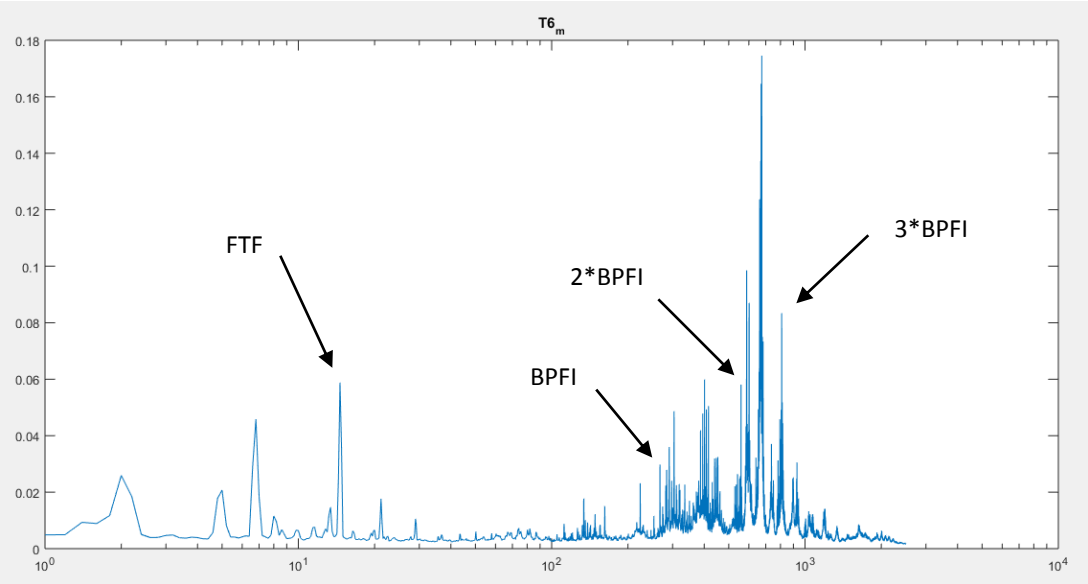


Figura 6.5.3.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 30 Hz).

Se señalan los siguientes puntos. BPFI (267.6, 0.02977), 2*BPFI (559, 0.05806) y 3*BPFI (809.2, 0.08336). Al igual que en los demás canales, se observa el pico a la frecuencia FTF. Nuevamente se observan picos a frecuencias no estudiadas. A frecuencias inferiores a la BPFI se destacan dos picos a las frecuencias de 134 Hz y 223.6 Hz. Entre la BPFI y 2*BPFI se ven otros dos picos a 304.2 Hz y 401.4 Hz. Por último, el máximo se encuentra entre las frecuencias 2*BPFI y 3*BPFI a los 675.4 Hz.

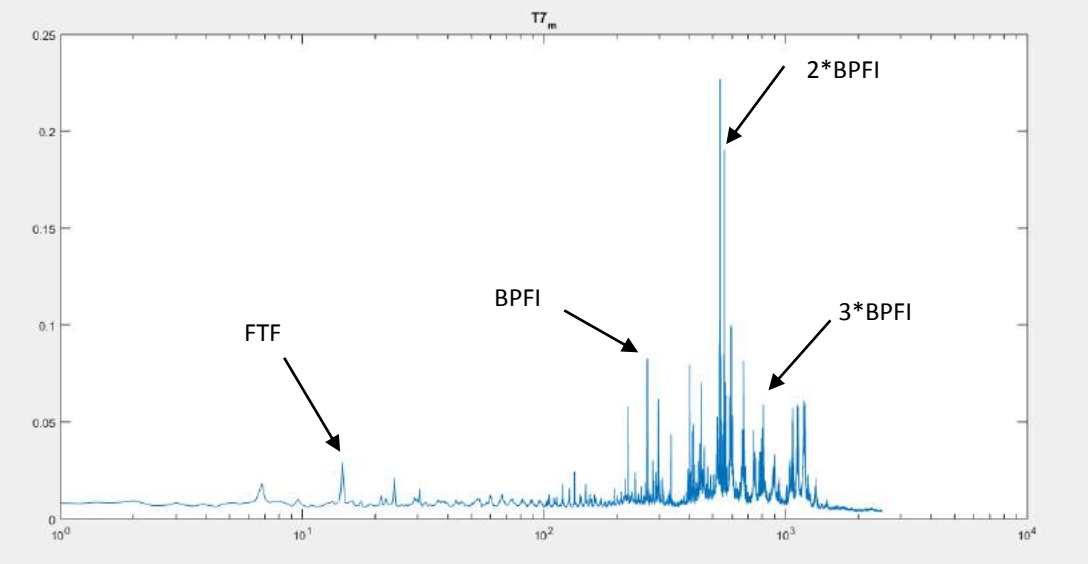


Figura 6.5.3.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 30 Hz).

En este último canal se vuelve a ver claramente el pico a la frecuencia FTF, así como los puntos marcados. BPFI (267.6, 0.0827), 2*BPFI (558.8, 0.1905) y 3*BPFI (809.2, 0.05897). Se observan picos a frecuencias no estudiadas. Picos anteriores a la BPFI se encuentran a los 133.8 Hz y 223.6 Hz. Entre las frecuencias BPFI y 2*BPFI se encuentra el máximo a la frecuencia de 535.2 Hz y otro pico a los 401.4 Hz.

Se realiza un análisis similar para los ensayos realizados con una presión aplicada de 6 bares. A continuación se muestran una tabla y una gráfica comparativas.

	BPFI (276.24 Hz)		**2*BPFI (552.48 Hz)**		**3*BPFI (828.72 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(267.6, 0.05497)	(261.6, 0.02272)	(559, 0.1031)	(549.2, 0.06393)	(809.2, 0.0497)	(783.2, 0.06858)
T5_m	(267.6, 0.04457)	(275.2, 0.02722)	(559, 0.2387)	(549.2, 0.06872)	(809.2, 0.06814)	(783.2, 0.07262)
T6_m	(267.6, 0.02977)	(279.2, 0.02613)	(559, 0.05806)	(549.2, 0.02709)	(809.2, 0.08336)	(783.2, 0.02108)
T7_m	(267.6, 0.0827)	(261.2, 0.04911)	(558.8, 0.1905)	(549.2, 0.06618)	(809.2, 0.05897)	(783.2, 0.06069)

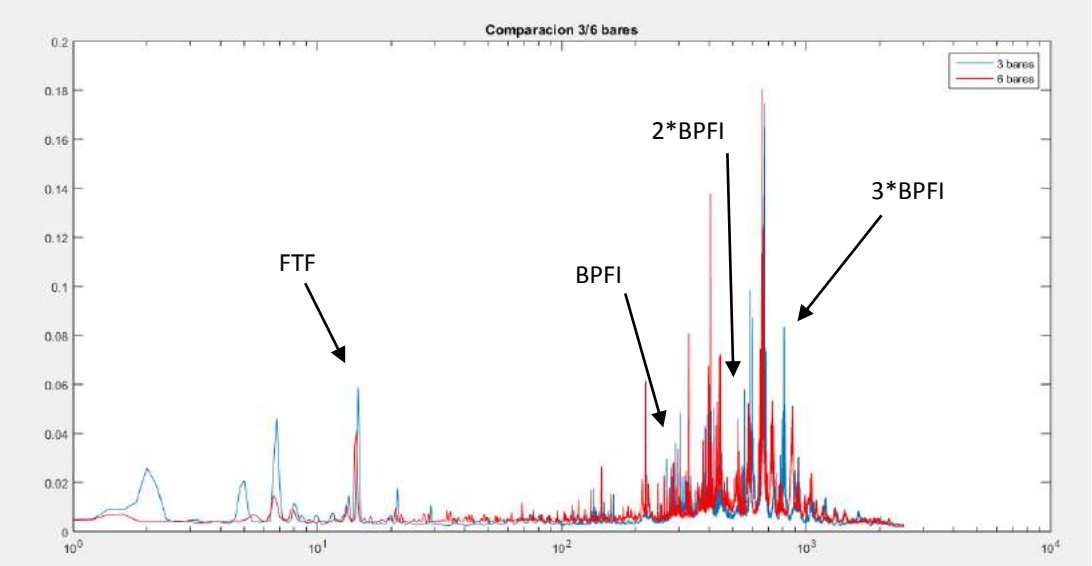


Figura 6.5.3.5. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (30 Hz).

Se observa que, para esta frecuencia de giro, los espectros para ambas presiones son muy similares, coincidiendo los picos en frecuencia.

6.5.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro.

Para terminar con la comparación de las gráficas obtenidas para un rodamiento con defecto en pista interior, se representan a continuación en la misma gráfica los espectros obtenidos para las diferentes frecuencias de giro una vez adimensionalizado el eje de frecuencia.

En primer lugar se representa la combinación de los espectros registrados a 3 bares de presión. Se puede comprobar que los picos a las tres frecuencias estudiadas coinciden. Esto reafirma que los picos obtenidos proceden de las vibraciones del rodamiento, y no de ruido.

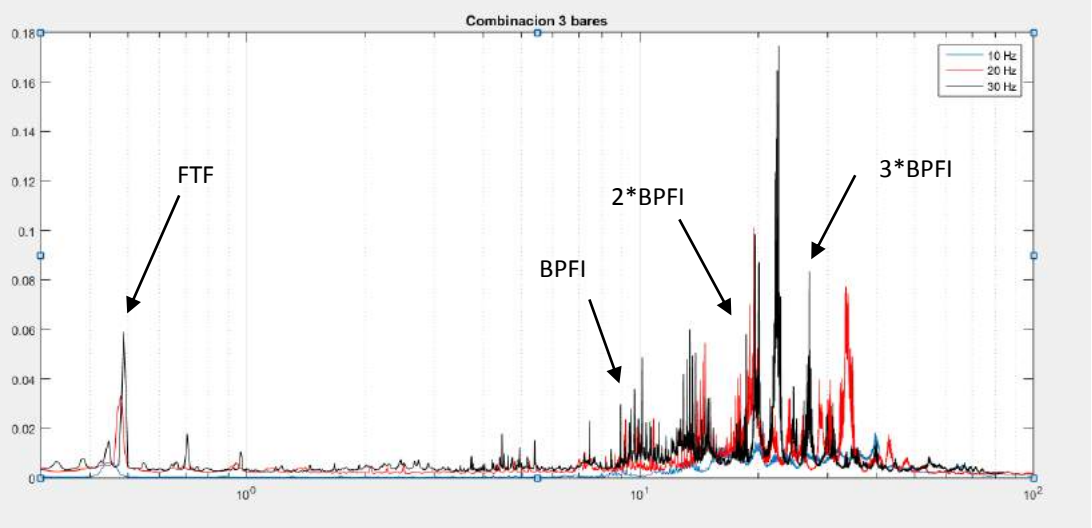


Figura 6.5.4.1. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (3 bares).

A continuación se muestra la combinación de los espectros registrados a 6 bares de presión. Al igual que en la gráfica anterior, se comprueba que los picos coinciden.

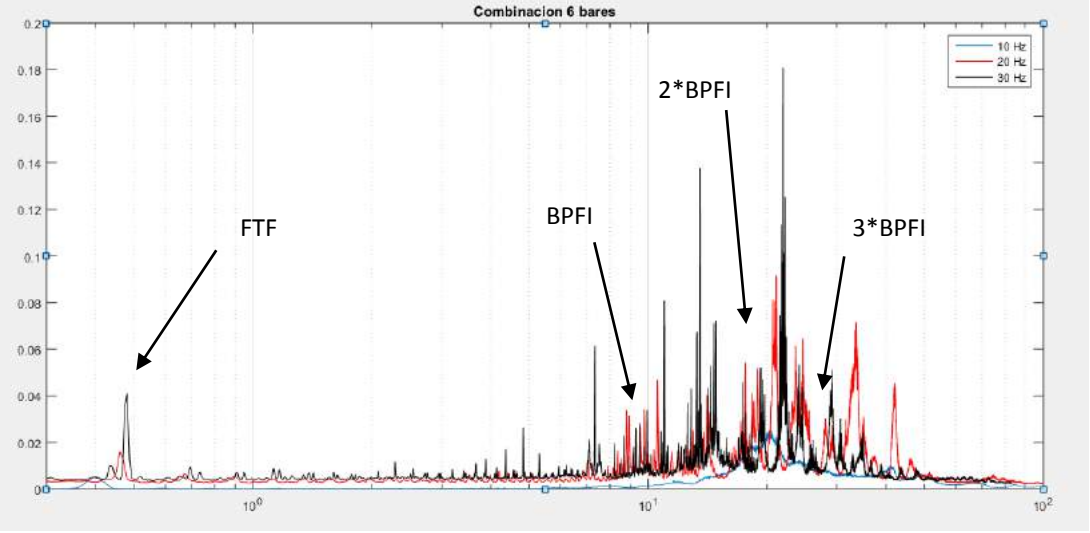


Figura 6.5.4.2. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (6 bares).

A continuación se va a representar una nueva gráfica en la que se combinan las tres frecuencias de giro estudiadas. En primer lugar se escalan las curvas con el pico de la FTF y, a continuación, se realiza la media de las tres curvas y se representa frente al eje de frecuencias adimensionalizado.

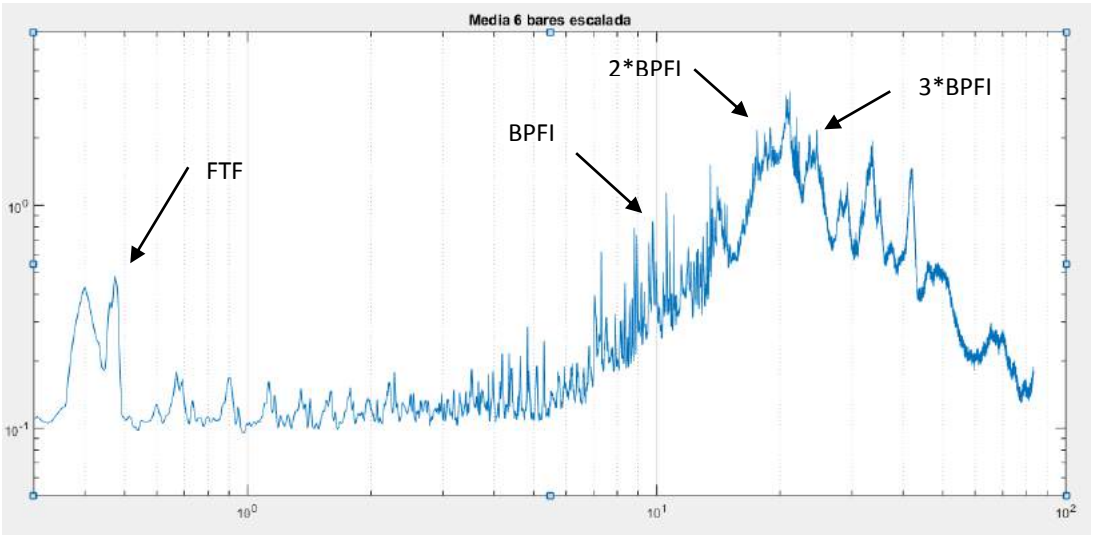


Figura 6.5.4.3. Media de las tres curvas escaladas (6 bares).

Se observan diversos picos a diferentes frecuencias que no se pueden identificar.

6.6. Rodamiento con defecto en bola.

En esta ocasión, el daño en la bola se intentó realizar con ayuda de una muela abrasiva montada en una “Dremel”, al igual que en la pista interior. Pero debido al lubricante y a la geometría de las bolas, resultó imposible. Finalmente, se realizó golpeando una bola con un punzón. El resultado se puede ver en las siguientes imágenes.

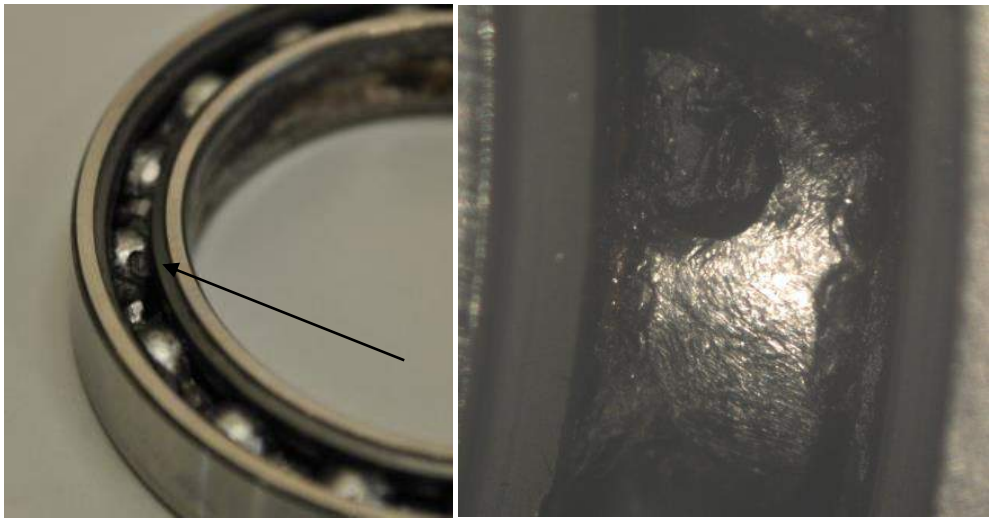


Figura 6.6.1. Defecto en bola.

6.6.1. Rodamiento con defecto en bola a 20 Hz.

A continuación se muestran los espectros obtenidos en los ensayos realizados con una presión aplicada de 3 bares.

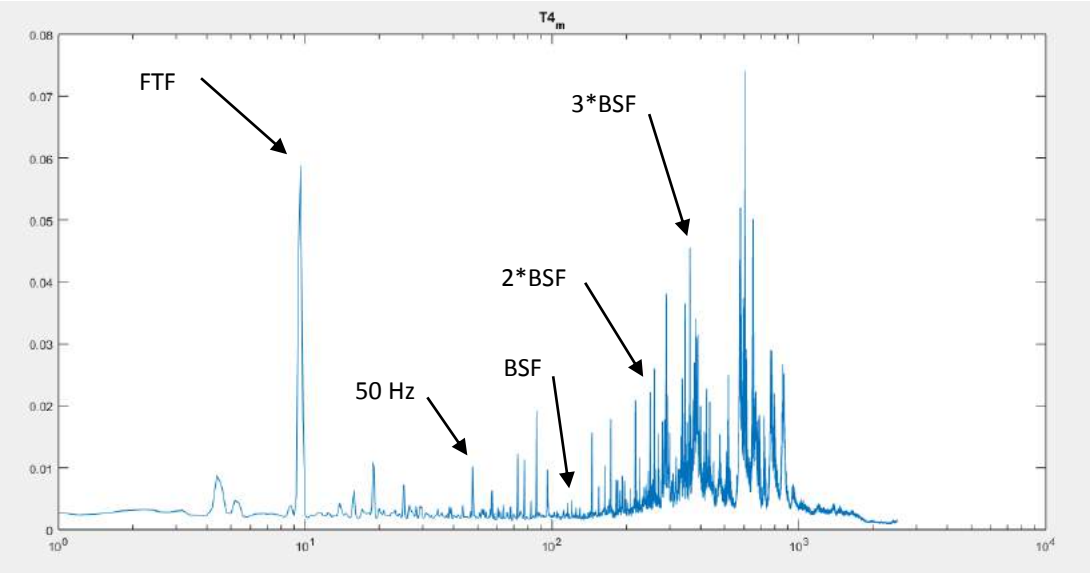


Figura 6.6.1.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 20 Hz).

Anteriormente se veía que la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes (BSF) para la actual frecuencia de giro es 119.25 Hz. También se veía que el espectro típico de un rodamiento con defecto en un elemento rodante presenta picos a la frecuencia BSF y sus armónicos modulados por bandas laterales.

En la figura anterior se puede apreciar un primer pico a la frecuencia FTF. También se señalan los siguientes puntos. BSF (120.2, 0.004685), 2*BSF (250.2, 0.02219) y 3* BSF (362.8, 0.04544). Se observan picos a frecuencias no estudiadas. Entre los 50 Hz y la frecuencia BSF se destaca uno a 86.6 Hz. Entre las frecuencias BSF y 2*BSF se aprecian tres a 145.2 Hz, 173 Hz y 217.8 Hz. Por último, entre la 2*BSF y la 3*BSF se ve uno a 290.2 Hz. El máximo se da a los 605.4 Hz.

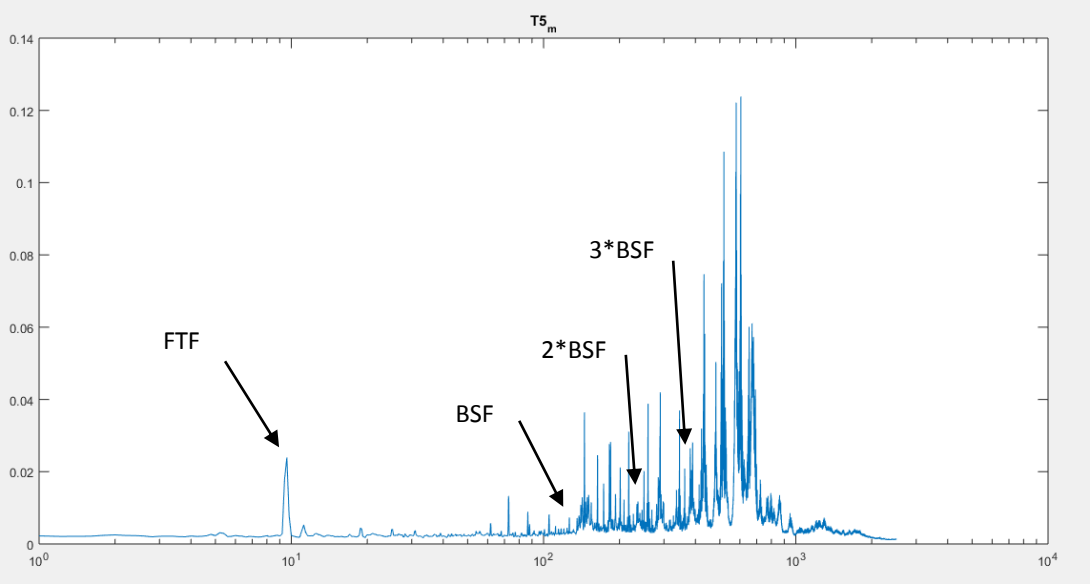


Figura 6.6.1.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 20 Hz).

En este caso se ve un pico a la frecuencia FTF y se señalan los siguientes puntos. BSF (126.6, 0.007271), 2*BSF (236.8, 0.01177) y 3*BSF (362.8, 0.02087). De nuevo se ven picos a frecuencias distintas a las estudiadas. El primero destacable se da a la frecuencia de 72.6 Hz. Entre las frecuencias BSF y 2*BSF hay varios. Se destaca el producido a 145.2 Hz. Entre las frecuencias 2*BSF y 3*BSF el mayor pico se da a 290.2 Hz. Finalmente, el máximo se da a 605.4 Hz.

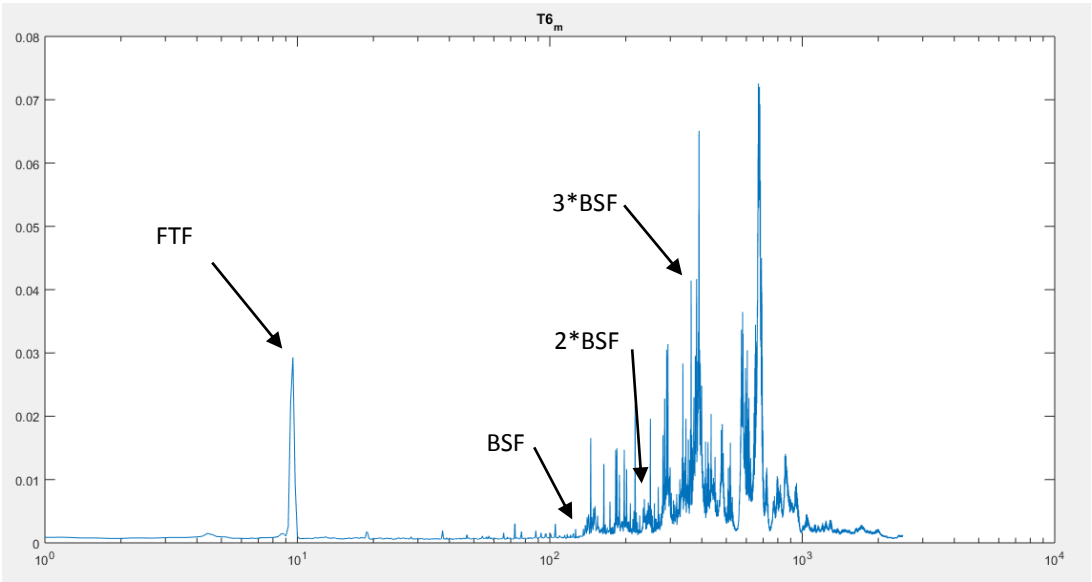


Figura 6.6.1.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 20 Hz).

La gráfica de este canal presenta un pico a la frecuencia FTF. Se marcan los siguientes puntos. BSF (126.6, 0.002144), 2*BSF (236.8, 0.006932) y 3*BSF (362.8, 0.04142). Se observan picos a frecuencias no

estudiadas. Dos primeros picos se dan a las frecuencias de 72.6 Hz y de 105.2 Hz. Entre las frecuencias BSF y 2*BSF se destaca el pico a la frecuencia de 145.2 Hz. Entre las frecuencias 2*BSF y 3*BSF el mayor pico se da a 293.6 Hz. Por último, el máximo se da a 670.6 Hz.

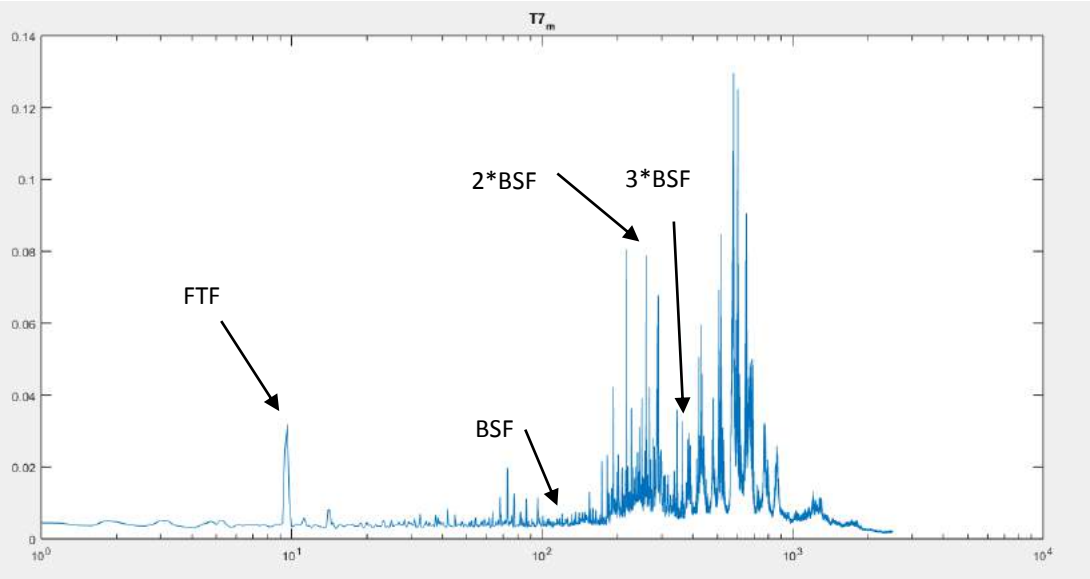


Figura 6.6.1.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 20 Hz).

Esta última gráfica vuelve a presentar un pico a la frecuencia FTF. Se señalan los siguientes puntos. BSF (120.4, 0.007031), 2*BSF (250.2, 0.07881) y 3*BSF (362.8, 0.03271). Nuevamente se dan picos a frecuencias distintas a las estudiadas. El primero destacable se da a 72.6 Hz. Entre las frecuencias BSF y 2*BSF se destacan los picos a las frecuencias de154.4 Hz y 217.8 Hz. El máximo se da a la frecuencia de 580.4 Hz.

Se representa a continuación una gráfica comparativa entre los espectros obtenidos en el rodamiento en perfecto estado y el rodamiento con fallo en bola.

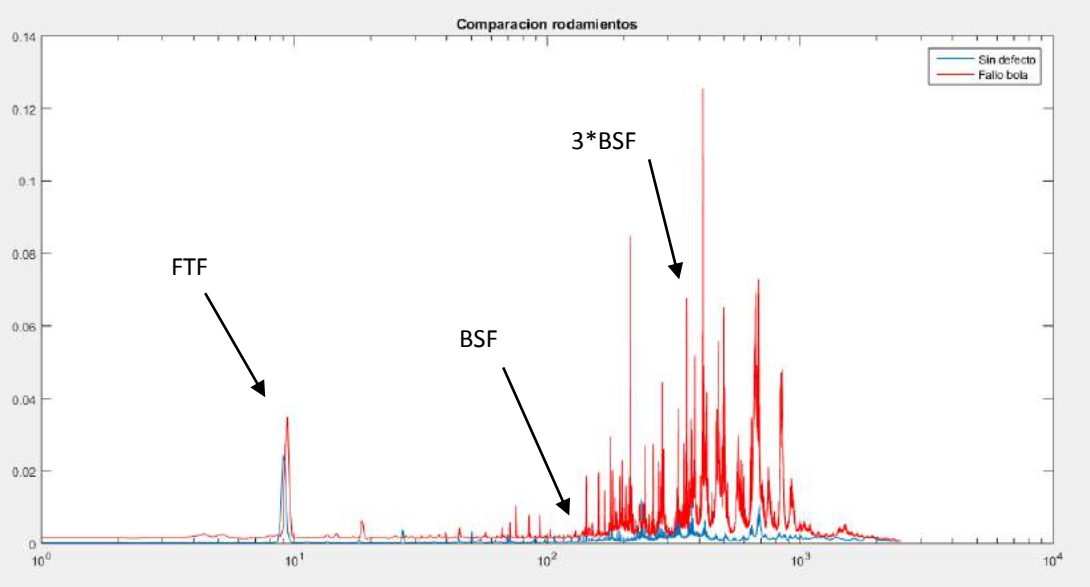


Figura 6.6.1.5. Comparación entre rodamientos sin fallo y con fallo en bola.

Se puede ver como coinciden en el primer pico cercano a la frecuencia FTF. La diferencia se observa, aparte de en las amplitudes, en que en la línea del rodamiento con defecto en bola se distinguen los picos a la frecuencia BSF y sus armónicos.

Se realiza un análisis similar para los espectros obtenidos de los ensayos realizados con 6 bares de presión aplicada. A continuación se muestran una tabla y una gráfica comparativas.

	BSF (119.25 Hz)		**2*BSF (238.5 Hz)**		**3*BSF (357.75 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(120.2, 0.004685)	(121.2, 0.003119)	(250.2, 0.02219)	(232.2, 0.004788)	(362.8, 0.04544)	(355.8, 0.06518)
T5_m	(126.6, 0.007271)	(129.4, 0.01086)	(236.8, 0.01177)	(232, 0.02084)	(362.8, 0.02087)	(355.8, 0.05359)
T6_m	(126.6, 0.002144)	(129.2, 0.003575)	(236.8, 0.006932)	(232.2, 0.01109)	(362.8, 0.04142)	(355.8, 0.06763)
T7_m	(120.4, 0.007031)	(124, 0.008469)	(250.2, 0.07881)	(232.2, 0.00771)	(362.8, 0.03271)	(355.8, 0.09701)

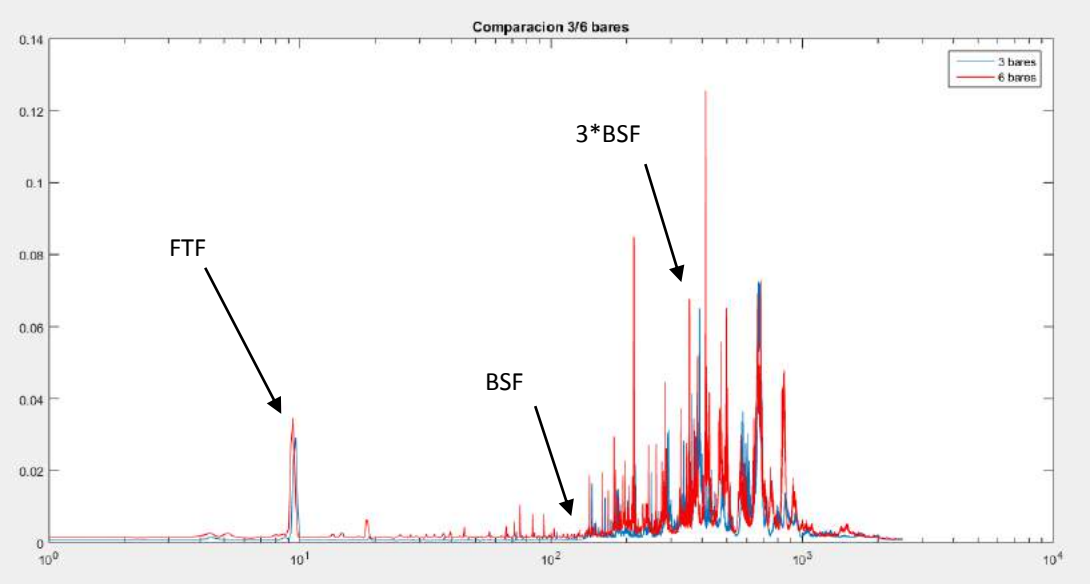


Figura 6.6.1.6. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (20 Hz).

Se puede observar que los picos coinciden para ambas presiones. Cabe destacar que en esta ocasión las amplitudes son mayores para los ensayos realizados con 6 bares de presión, esto puede deberse a que los ensayos a dicha presión son los últimas en realizarse y el daño puede ser mayor.

6.6.2. Rodamiento con defecto en bola a 10Hz.

Los espectros obtenidos en los ensayos realizados con una frecuencia de giro de 10 Hz y con una presión aplicada de 3 bares se estudian a continuación.

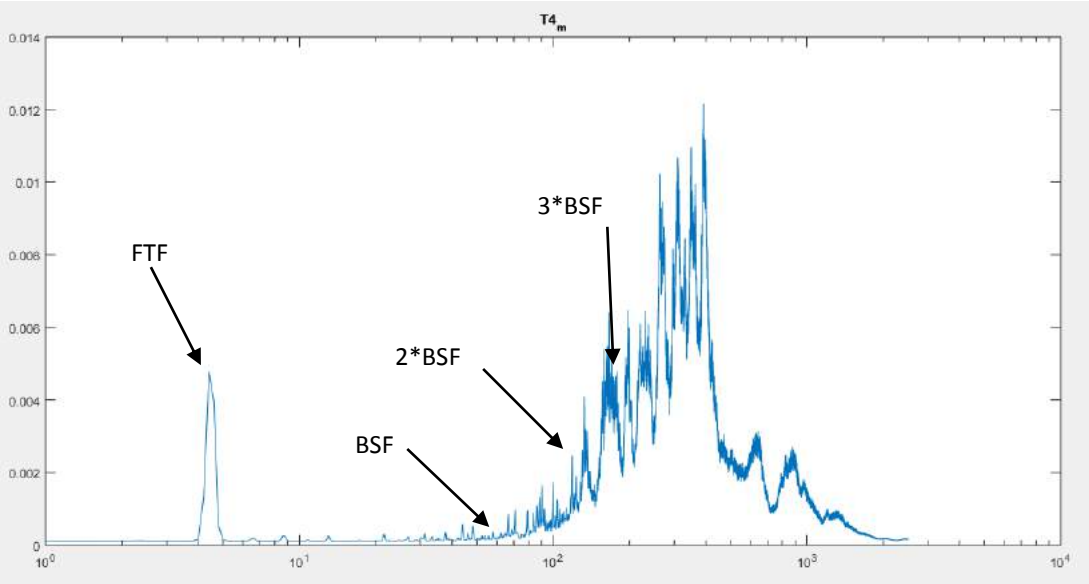


Figura 6.6.2.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 10 Hz).

Se veía anteriormente que la frecuencia BSF para la actual velocidad de giro es 59.63 Hz. En este primer canal se marcan los siguientes puntos. BSF (58, 0.0003716), 2*BSF (118.8, 0.002424) y 3*BSF (178.8, 0.004796). También se observa un pico a la frecuencia FTF para esta frecuencia de giro. Se destacan los siguientes picos para frecuencias no estudiadas. Entre la BSF y la 2*BSF hay dos a las frecuencias de 70.8 Hz y 90.4 Hz. Otros dos picos entre las frecuencias 2*BSF y 3*BSF se dan a los 132.8 Hz y 166.2 Hz. El máximo se da para los 392.6 Hz.

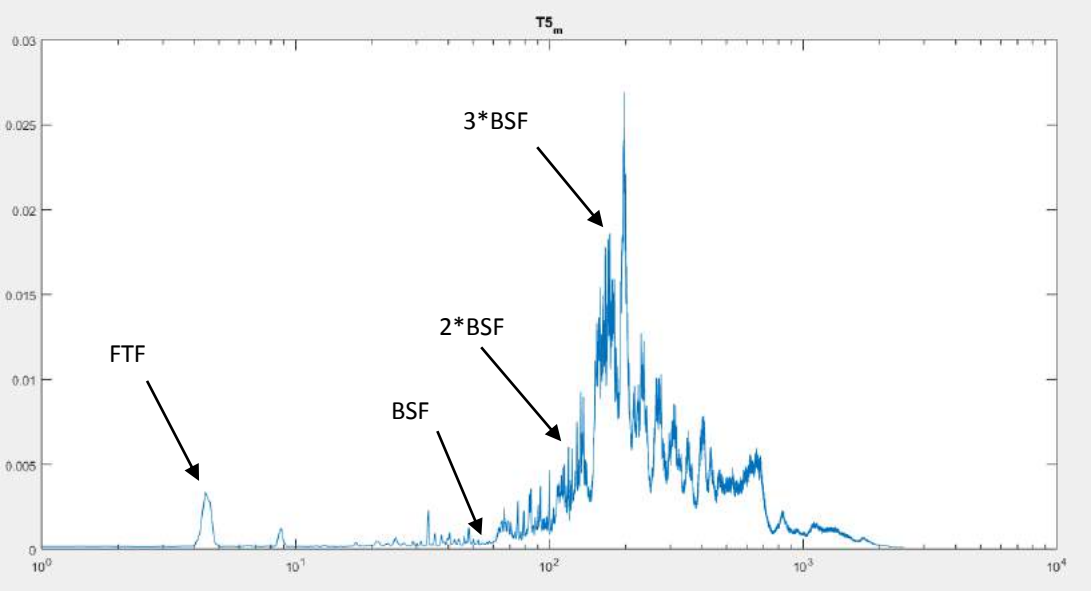


Figura 6.6.2.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 10 Hz).

En el canal 5 se ve un pico a la FTF y se señalan los siguientes puntos. BSF (58, 0.004733), 2*BSF (118.8, 0.006004) y 3*BSF (172.8, 0.01861). Se dan picos a frecuencias no estudiadas. El primero destacable se da a 33.4 Hz. Además, entre las frecuencias BSF y 2*BSF se dan picos a las siguientes frecuencias: 66.6 Hz y 84.6 Hz. Entre 2*BSF y 3*BSF se da uno a 133 Hz. Y finalmente, el máximo se da a los 197.4 Hz.

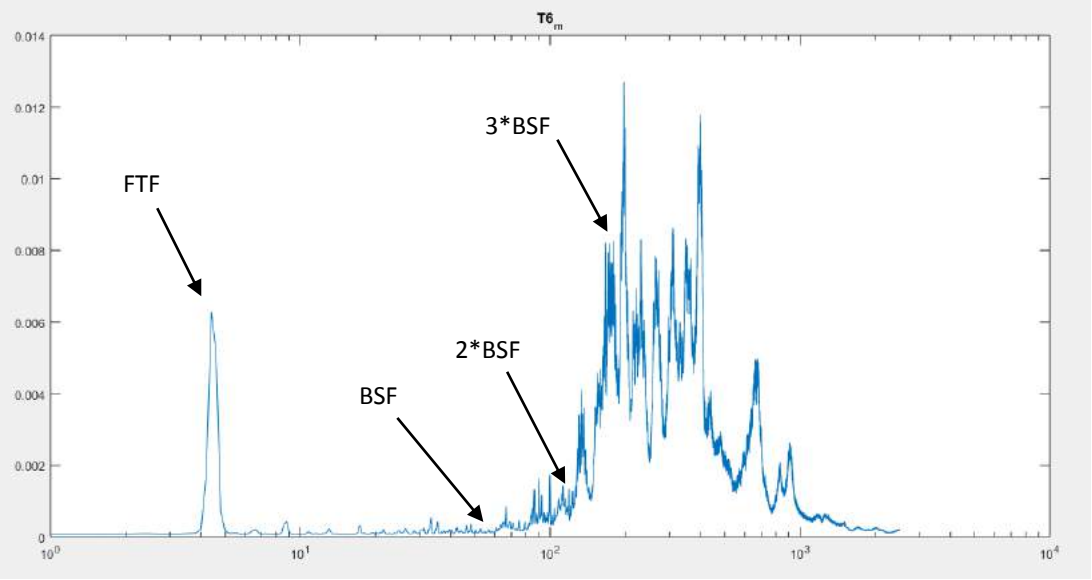


Figura 6.6.2.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 10 Hz).

En el canal 6 se marcan los siguientes puntos cercanos a la frecuencia BSF y sus armónicos. BSF (56.6, 0.000191), 2*BSF (119, 0.001341) y 3*BSF (178.8, 0.008257). Al igual que en los canales anteriores, se ve un pico a la frecuencia FTF. Nuevamente se dan picos a frecuencias no estudiadas. El primero se da a

33.4 Hz. Entre las frecuencias BSF y 2*BSF se destacan los producidos a 66.6 Hz y a 90.4 Hz. Entre 2*BSF y 3*BSF hay uno a 133 Hz. Por último el máximo se da a 197.4 Hz.

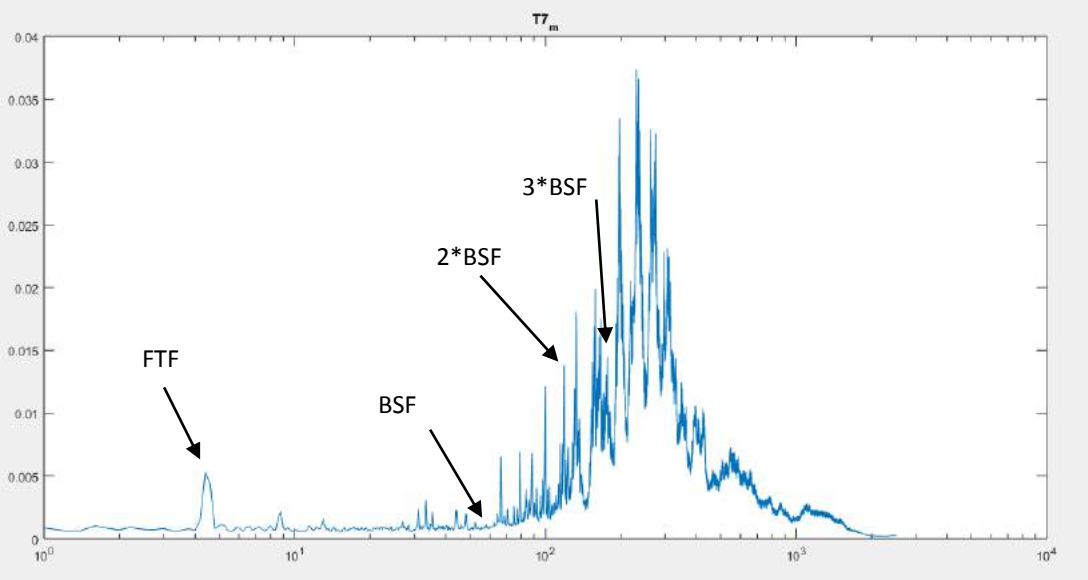


Figura 6.6.2.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 10 Hz).

En este último canal se señalan los siguientes puntos. BSF (58, 0.001119), 2*BSF (118.8, 0.01384) y 3*BSF (176.8, 0.01451). También se aprecia el pico a la frecuencia FTF. En este caso también se dan picos a frecuencias no estudiadas. A frecuencias inferiores a la BSF se ve un pico a 33.4 Hz modulado por bandas laterales. Entre las frecuencias BSF y 2*BSF se ven picos a las siguientes frecuencias: 66.6 Hz, 79.2 Hz y 88.4 Hz. Para frecuencias comprendidas entre 2*BSF y 3*BSF se dan dos picos a 132.8 Hz y a 158.6 Hz. Finalmente, el máximo se produce a los 230.6 Hz.

Se realiza un análisis análogo para los espectros obtenidos en los ensayos sometidos a 6 bares de presión. A continuación se muestran una tabla y una gráfica comparativas.

	BSF (59.63 Hz)		**2*BSF (119.25 Hz)**		**3*BSF (178.88 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(58, 0.0003716)	(59.6, 0.0001769)	(118.8, 0.002424)	(120, 0.001383)	(178.8, 0.004796)	(181.8, 0.004798)
T5_m	(58, 0.004733)	(60.2, 0.001785)	(118.8, 0.006004)	(120.4, 0.006155)	(172.8, 0.01861)	(181.6, 0.03067)
T6_m	(56.6, 0.000191)	(60.2, 0.000432)	(119, 0.001341)	(120.4, 0.002205)	(178.8, 0.008257)	(181.6, 0.01224)
T7_m	(58, 0.001119)	(60.2, 0.002564)	(118.8, 0.01384)	(120.2, 0.007027)	(176.8, 0.01451)	(178.2, 0.01291)

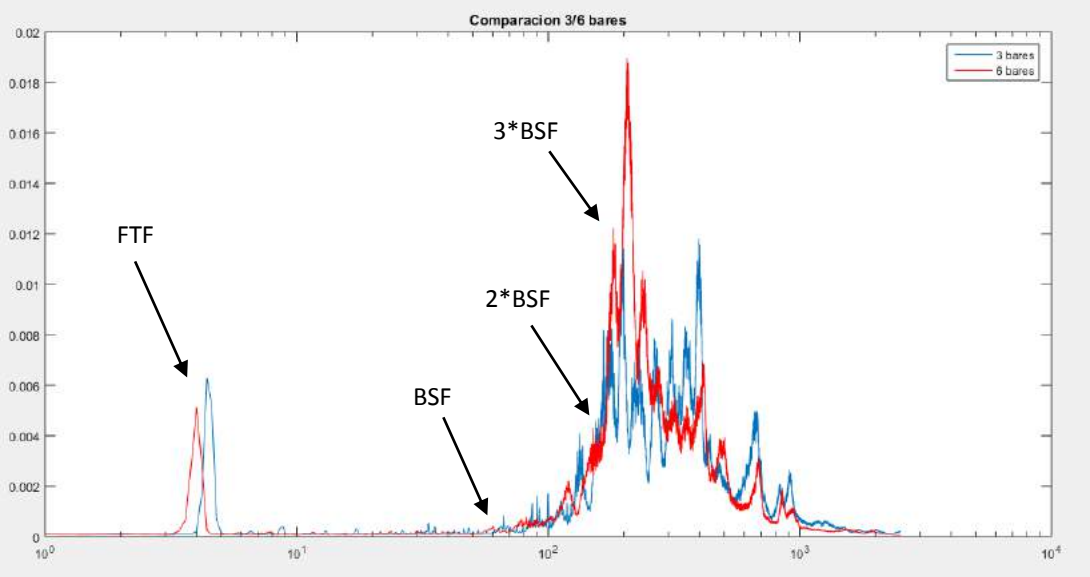


Figura 6.6.2.5. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (10 Hz).

Se puede ver el primer pico para ambas presiones a la frecuencia FTF. También se observa que las amplitudes de los espectros a 3 bares son mayores, por lo general, que las de los espectros a 6 bares.

6.6.3. Rodamiento con defecto en bola a 30 Hz.

Se van a representar a continuación los espectros obtenidos en los ensayos realizados a 30 Hz y con una presión de 3 bares.

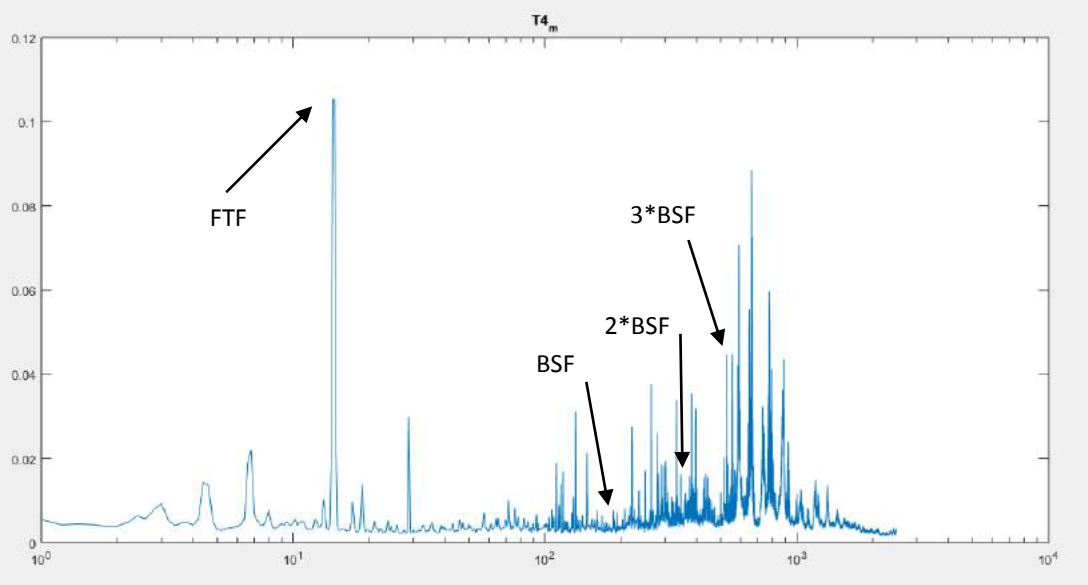


Figura 6.6.3.1. Representación de la media de los 10 espectros del canal 4 (3 bares, 30 Hz).

Se veía que la frecuencia BSF a la actual frecuencia de giro es 178.88 Hz. En la gráfica anterior se observa un máximo a la frecuencia FTF y se señalan los siguientes puntos. BSF (186.8, 0.007617), 2*BSF (347.2, 0.01621) y 3*BSF (529.4, 0.04461). Se ven picos para frecuencias no estudiadas. Para frecuencias inferiores a la BSF destaca el producido a 132.4 Hz además del que se da a 71.6 Hz. Entre BSF y 2*BSF se dan picos a las siguientes frecuencias: 222 Hz, 264.8 Hz y 333 Hz. A frecuencias entre 2*BSF y 3*BSF se ve un pico a 436 Hz.

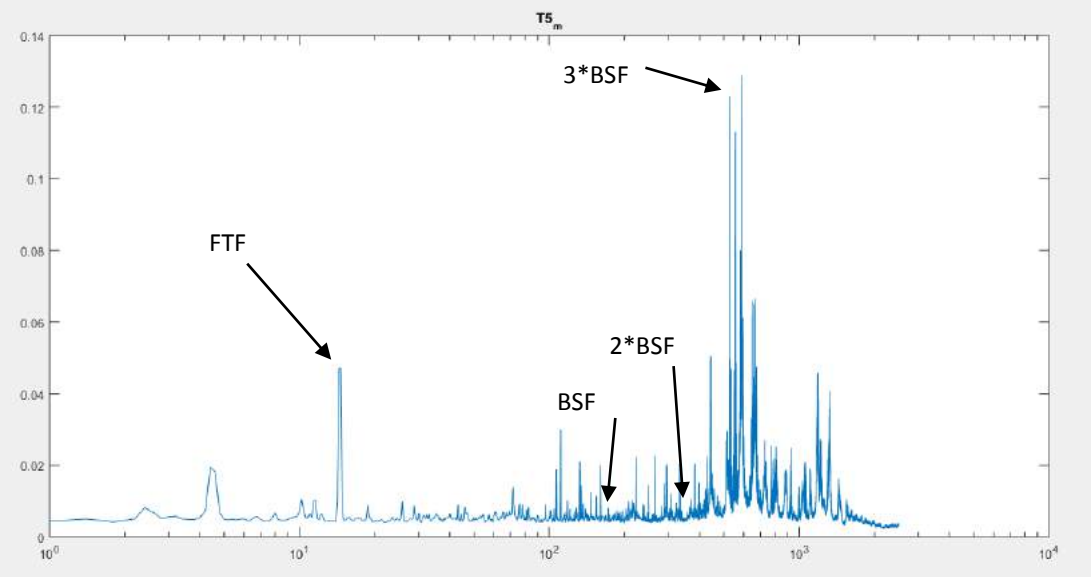


Figura 6.6.3.2. Representación de la media de los 10 espectros del canal 5 (3 bares, 30 Hz).

En el canal 5 se vuelve a destacar un pico a la frecuencia FTF. Se marcan los siguientes puntos próximos a la frecuencia BSF y sus armónicos. BSF (172.4, 0.008064), 2*BSF (358.6, 0.007019) y 3*BSF (529.4, 0.1231). De nuevo se dan picos a frecuencias no estudiadas. Para frecuencias inferiores a la BSF se ven los picos a las siguientes frecuencias: 71.6 Hz, 111.2 Hz y 132.4 Hz. Entre BSF y 2*BSF destaca el pico a 222 Hz. Finalmente, entre las frecuencias 2*BSF y 3*BSF se da uno a 444 Hz.

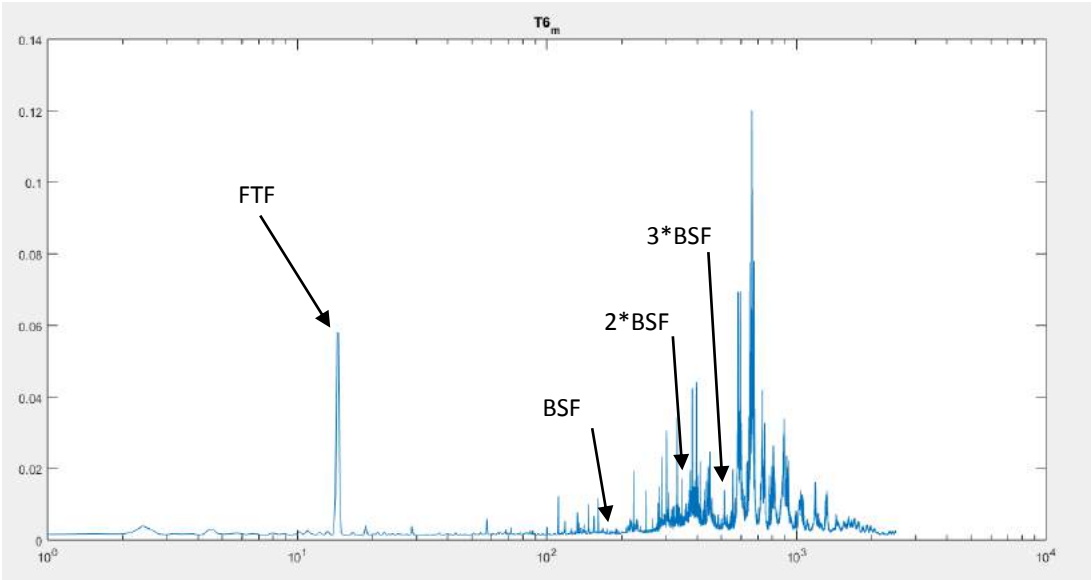


Figura 6.6.3.3. Representación de la media de los 10 espectros del canal 6 (3 bares, 30 Hz).

En el canal 6 se señalan los puntos próximos a la BSF y sus armónicos. BSF (175, 0.003254), 2*BSF (347.4, 0.01714) y 3*BSF (528.8, 0.01402). También se destaca el pico a la frecuencia FTF. Nuevamente se dan picos a frecuencias distintas a las estudiadas. Un primer pico a 111 Hz precede a la frecuencia

BSF. En el intervalo entre las frecuencias BSF y 2*BSF se destaca el pico a 222 Hz, y entre las frecuencias 2*BSF y 3*BSF los picos dados a 397 Hz y a 449 Hz. Finalmente, el máximo se da a los 661.6 Hz.

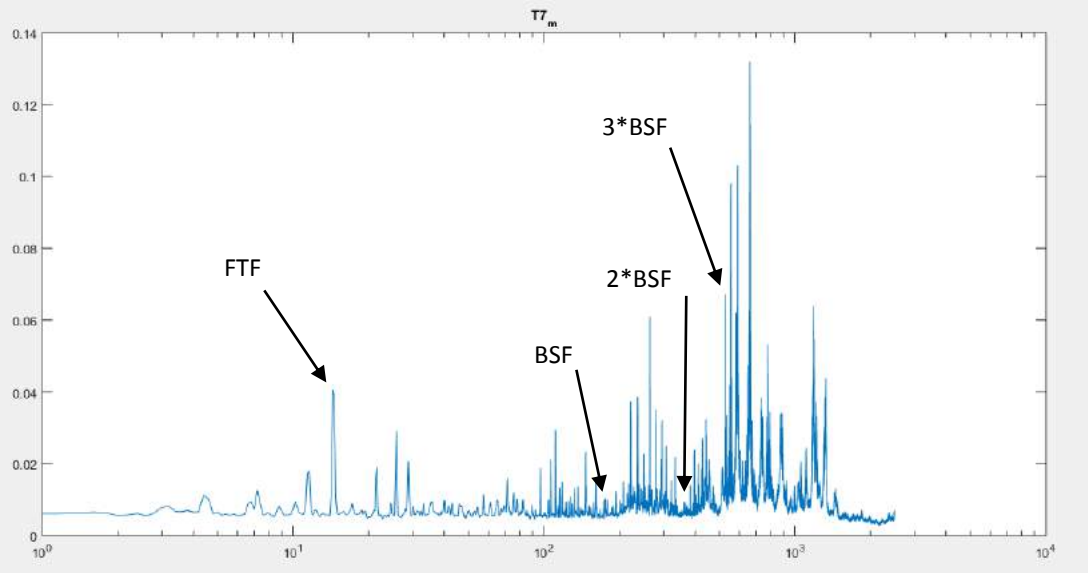


Figura 6.6.3.4. Representación de la media de los 10 espectros del canal 7 (3 bares, 30 Hz).

En la gráfica anterior, correspondiente al último canal, se marcan los siguientes puntos. BSF (179.2, 0.01015), 2*BSF (361.8, 0.009436) y 3*BSF (529.4, 0.06723). Como en los casos anteriores, se observa un pico a la frecuencia FTF. Se ven también picos a frecuencias distintas a las estudiadas. En frecuencias inferiores a la BSF se destacan dos picos a 71.6 Hz y a 111.2 Hz. Entre las frecuencias BSF y 2*BSF se da uno a 264.8 Hz. Entre 2*BSF y 3*BSF hay un pico a 442.4 Hz. Finalmente, el máximo se encuentra en los 661.6 Hz.

Se hace un análisis similar para los ensayos realizados con una presión aplicada de 6 bares y se muestran a continuación una tabla y una gráfica comparativas.

	BSF (178.88 Hz)		**2*BSF (357.76 Hz)**		**3*BSF (536.64 Hz)**	
	3 bares	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**	**3 bares**	**6 bares**
T4_m	(186.8, 0.007617)	(174.4, 0.006414)	(347.2, 0.01621)	(361.6, 0.01063)	(529.4, 0.04461)	(540.6, 0.02115)
T5_m	(172.4, 0.008064)	(179.2, 0.009017)	(358.6, 0.007019)	(352, 0.005857)	(529.4, 0.1231)	(526.2, 0.06959)
T6_m	(175, 0.003254)	(174.4, 0.007019)	(347.4, 0.01714)	(362.2, 0.013)	(528.8, 0.01402)	(526.2, 0.02437)
T7_m	(179.2, 0.01015)	(172.8, 0.007823)	(361.8, 0.009436)	(353.6, 0.01275)	(529.4, 0.06723)	(526.2, 0.05329)

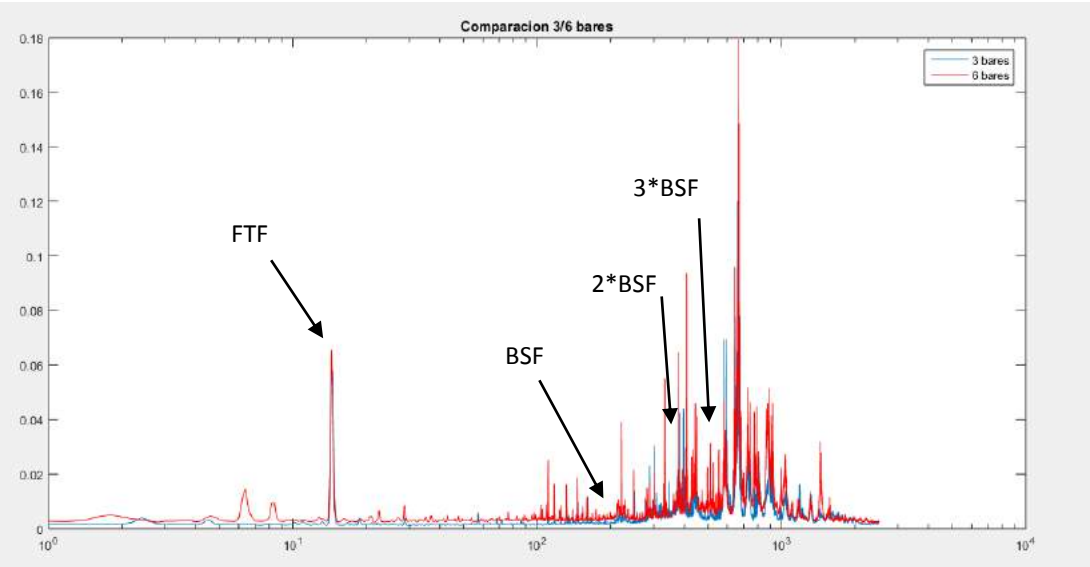


Figura 6.6.3.5. Comparación de los espectros obtenidos a las dos presiones estudiadas (30 Hz).

Se puede comprobar que los picos a ambas presiones coinciden en frecuencia. Cabe destacar que las amplitudes de los ensayos realizados a 6 bares son mayores que las mismas a 3 bares, esto puede deberse a que los ensayos bajo estas condiciones (30 Hz, 6 bares) son los últimas en realizarse y el daño, así como los niveles de vibración, pueden ser mayores.

6.6.4. Combinación de gráficas a distinta frecuencia de giro.

Para terminar con la comparación de las gráficas obtenidas para un rodamiento con defecto en bola, se representan a continuación en la misma gráfica los espectros obtenidos para las diferentes frecuencias de giro una vez adimensionalizado el eje de frecuencia.

En primer lugar se representa la combinación de los espectros registrados a 3 bares de presión. Se puede comprobar que los picos a las tres frecuencias estudiadas coinciden. Esto reafirma que los picos obtenidos proceden de las vibraciones del rodamiento, y no de ruido.

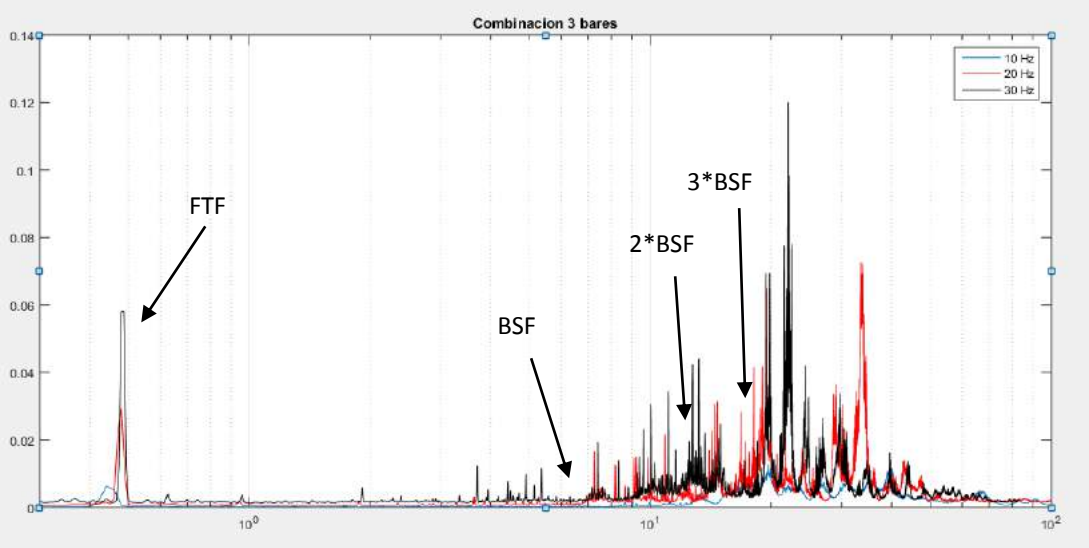


Figura 6.6.4.1. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (3 bares).

A continuación se muestra la combinación de los espectros registrados a 6 bares de presión. Al igual que en la gráfica anterior, se comprueba que los picos coinciden.

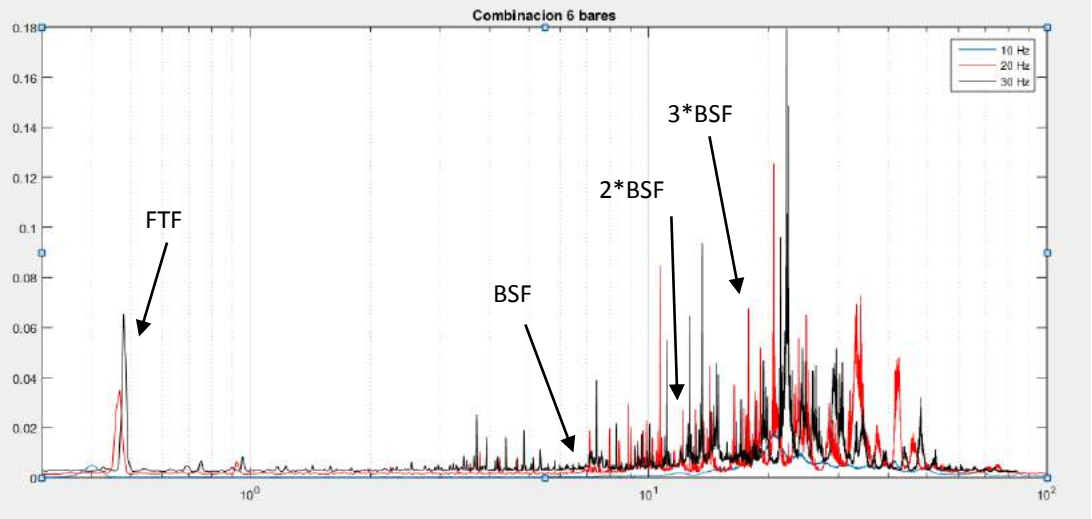


Figura 6.6.4.2. Combinación de los espectros obtenidos a las diferentes frecuencias de giro (6 bares).

A continuación se va a representar una nueva gráfica en la que se combinan las tres frecuencias de giro estudiadas. En primer lugar se escalan las curvas con el pico de la FTF y, a continuación, se realiza la media de las tres curvas y se representa frente al eje de frecuencias adimensionalizado.

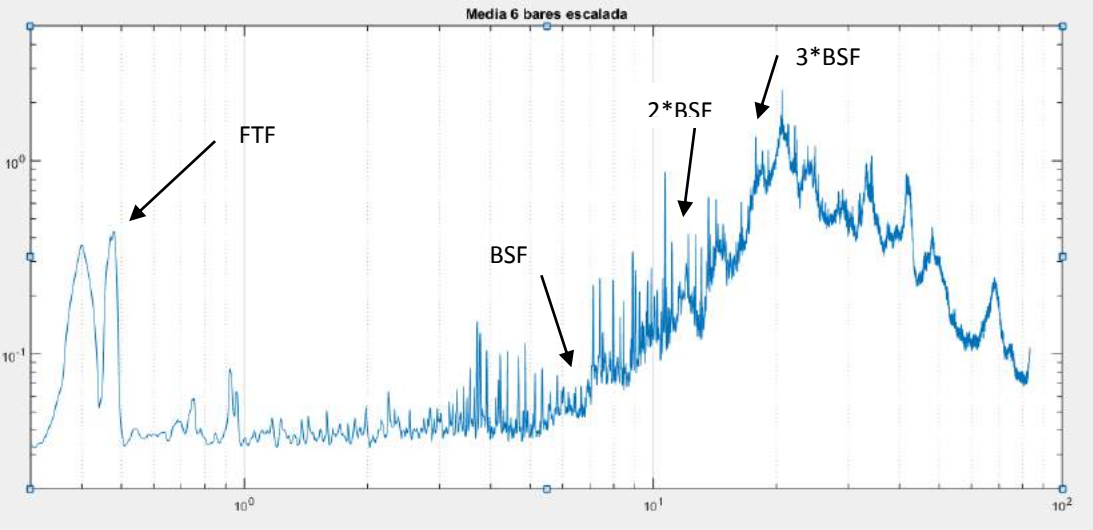


Figura 6.6.4.3. Media de las tres curvas escaladas (6 bares).

Se observan diversos picos a diferentes frecuencias que no se pueden identificar.

El objetivo del proyecto era comparar las señales vibratorias extraídas de los rodamientos con y sin defecto para diferentes cargas y velocidades de giro. Una vez estudiados todos los casos mediante la comparación de las amplitudes obtenidas por la transformada de Fourier, se obtienen las siguientes conclusiones.

- Se ha comprobado que para un rodamiento en perfecto estado se pueden ver picos a la frecuencia de la red y sus armónicos. También se observan picos cercanos a la FTF y sus armónicos para todas las frecuencias de giro estudiadas.

- Para los ensayos realizados con rodamientos que presentaban un fallo en la pista exterior se comprueba que a la frecuencia de giro de 20 Hz dicho defecto se reconoce mejor en los espectros de los canales 4 y 6, que son las direcciones perpendiculares al eje de giro del rodamiento. A la frecuencia de giro de 30 Hz, sin embargo, donde mejor se reconoce el fallo es en los espectros de los canales 5 y 7, que comparten la misma dirección que el eje de giro.

- En el caso de los ensayos realizados al rodamiento con fallo en la pista interior, donde resulta más fácil reconocer el defecto es en los espectros obtenidos con una frecuencia de 30 Hz. En este caso en los canales 4 y 5 es donde mejor se ve. Dichos canales corresponden a las dos direcciones del acelerómetro colocado verticalmente. (Figura 4.4.2)

- Una vez estudiados los espectros obtenidos del rodamiento con defecto en una bola, se comprueba que la dirección en la que mejor se detecta dicho fallo es la del canal 4, que corresponde a la dirección vertical y perpendicular al eje de giro (Figura 4.4.2). En cuanto a la velocidad de giro, donde peor se detecta dicho fallo es a 10 Hz.

- Con los resultados obtenidos, se puede decir que ambos acelerómetros son necesarios, siendo las direcciones perpendiculares al eje de giro (canales 5 y 7) donde mayores amplitudes se obtienen en los casos en los que el rodamiento tiene un defecto. En el caso del rodamiento sano, las amplitudes son mayores para la dirección del eje de giro (canales 4 y 6).

- Respecto a la amplitud y en función de todos los casos estudiados se puede decir, en líneas generales, que para una carga menor hay más amplitud en los picos de frecuencia.

- En cuanto a la comparación realizada en función de la frecuencia de giro de los rodamientos, se observa que a 30 Hz se obtienen mayores amplitudes, en segundo lugar están las señales de 20 Hz y por último se encuentran las amplitudes obtenidas a 10 Hz. Es decir, a medida que aumenta la velocidad de giro de los rodamientos, la amplitud mostrada por la transformada de Fourier es mayor.

- En la mayoría de los casos estudiados ha sido posible identificar para ambas cargas aplicadas la frecuencia de defecto correspondiente al rodamiento analizado, ya sea con la propia frecuencia de defecto o con un armónico de ésta.

- En el rodamiento sano se observan picos a la FTF y sus armónicos cuando deberían salir picos a la frecuencia de giro y sus armónicos. En los demás casos ocurre lo mismo. La teoría dice que se deberían ver, aparte de los picos de sus frecuencias típicas de deterioro, otros a la frecuencia de giro y sus armónicos, y vuelve a pasar que los que se ven son a la FTF y sus armónicos.

- En todos los casos hay un gran contenido en frecuencia por encima de 200 Hz. Esto puede deberse a los acelerómetros empleados. Para comprobarlo se deberían repetir los ensayos utilizando otros acelerómetros más adecuados, por ejemplo, acelerómetros piezoeléctricos.

- En todas las gráficas representadas se observan picos a frecuencias no identificadas. Se ha comentado una a una, pero es destacable que para cada caso, en los cuatro canales dichas frecuencias coinciden o son muy similares.

A la vista de los resultados y las conclusiones obtenidas en este proyecto, el futuro desarrollo del estudio de las vibraciones en rodamientos defectuosos enmarcado en el mantenimiento predictivo son las siguientes.

- En cuanto al sistema experimental, se podrían probar nuevos tipos de rodamientos donde los defectos estén controlados, ya que los ensayados en este proyecto fueron realizados en el laboratorio y se pudieron dañar otras partes del rodamiento debido al tamaño de los mismos.

- Todos los rodamientos estudiados eran iguales, se podría hacer un estudio para rodamientos de diferente tamaño siempre que sean compatibles con el banco de ensayos utilizado.

- En cuanto al banco de ensayos, se puede hacer un nuevo diseño del eje, ya que la extracción de los rodamientos ensayados es muy complicada y lleva mucho tiempo.

- Como mejora en el banco de ensayos, aparte del diseño del eje, se puede incorporar un ventilador para el motor, ya que en este proyecto se ha utilizado uno convencional para refrigerarlo.

- También sería conveniente añadirle sistemas de protección, ya que actualmente no cumple los requisitos de seguridad establecidos.

Inmaculada Pérez Ibáñez, *"Desarrollo de una herramienta para detectar fallos en rodamientos defectuosos"*, Proyecto Fin de Carrera, ETSI Sevilla, 2002.

David Domínguez Sanjuán, *"Diseño y construcción de un banco de ensayos para rodamientos"*, Proyecto Fin de Carrera, ETSI Sevilla, 2006.

Tedric A. Harris, Michael N. Kotzalas, *"Essential Concepts of Bearing Technology"* y *"Advanced Concepts of Bearing Technology"*.

Tedric A. Harris, *"Rolling Bearing Analysis"*.

Johannes Brändlein, Paul Eschmann, Ludwig Hasbargen, Karl Weigand, *"Ball and Roller Bearings. Theory, Design and Application"*.

Sinais. Ingeniería de mantenimiento. www.sinais.es

SKF, www.skf.com

Analog Devices, www.analog.com

Se muestra a continuación el código Matlab utilizado para el procesado de los datos obtenidos en los ensayos.

```
clear all
close all
clc

load('T_10.mat')
load('T_9.mat')
load('T_8.mat')
load('T_7.mat')
load('T_6.mat')
load('T_5.mat')
load('T_4.mat')
load('T_3.mat')
load('T_2.mat')
load('T_1.mat')

n=length(T_1);

for i=1:n


T0(i)=(T_1(i,1)+T_2(i,1)+T_3(i,1)+T_4(i,1)+T_5(i,1)+T_6(i,1)+T_7(i,1)+
T_8(i,1)+T_9(i,1)+T_10(i,1))/10;

T1(i)=(T_1(i,2)+T_2(i,2)+T_3(i,2)+T_4(i,2)+T_5(i,2)+T_6(i,2)+T_7(i,2)+
T_8(i,2)+T_9(i,2)+T_10(i,2))/10;

T2(i)=(T_1(i,3)+T_2(i,3)+T_3(i,3)+T_4(i,3)+T_5(i,3)+T_6(i,3)+T_7(i,3)+
T_8(i,3)+T_9(i,3)+T_10(i,3))/10;

T3(i)=(T_1(i,4)+T_2(i,4)+T_3(i,4)+T_4(i,4)+T_5(i,4)+T_6(i,4)+T_7(i,4)+
T_8(i,4)+T_9(i,4)+T_10(i,4))/10;

T4(i)=(T_1(i,5)+T_2(i,5)+T_3(i,5)+T_4(i,5)+T_5(i,5)+T_6(i,5)+T_7(i,5)+
T_8(i,5)+T_9(i,5)+T_10(i,5))/10;

T5(i)=(T_1(i,6)+T_2(i,6)+T_3(i,6)+T_4(i,6)+T_5(i,6)+T_6(i,6)+T_7(i,6)+
T_8(i,6)+T_9(i,6)+T_10(i,6))/10;

T6(i)=(T_1(i,7)+T_2(i,7)+T_3(i,7)+T_4(i,7)+T_5(i,7)+T_6(i,7)+T_7(i,7)+
T_8(i,7)+T_9(i,7)+T_10(i,7))/10;

T7(i)=(T_1(i,8)+T_2(i,8)+T_3(i,8)+T_4(i,8)+T_5(i,8)+T_6(i,8)+T_7(i,8)+
T_8(i,8)+T_9(i,8)+T_10(i,8))/10;

end

w=1:0.2:2500;

T1_m=zeros(1,12496);T2_m=zeros(1,12496);T3_m=zeros(1,12496);T4_m=zeros
(1,12496);T5_m=zeros(1,12496);T6_m=zeros(1,12496);T7_m=zeros(1,12496);
T0_m=zeros(1,12496);

delta=12500;
```

```
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T0_plot=T0(i_start:i_end);
    semilogx (w,T0_plot)
    title('T0')
    hold on
    T0_m=T0_m+T0_plot;

end

figure
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T1_plot=T1(i_start:i_end);
    semilogx (w,T1_plot)
    title('T1')
    hold on
    T1_m=T1_m+T1_plot;

end

figure
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T2_plot=T2(i_start:i_end);
    semilogx (w,T2_plot)
    title('T2')
    hold on
    T2_m=T2_m+T2_plot;

end

figure
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T3_plot=T3(i_start:i_end);
    semilogx (w,T3_plot)
    title('T3')
    hold on
    T3_m=T3_m+T3_plot;
end

figure
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T4_plot=T4(i_start:i_end);
    semilogx (w,T4_plot)
    title('T4')
```

```
    hold on
    T4_m=T4_m+T4_plot;

end

figure
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T5_plot=T5(i_start:i_end);
    semilogx (w,T5_plot)
    title('T5')
    hold on
    T5_m=T5_m+T5_plot;

end

figure
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T6_plot=T6(i_start:i_end);
    semilogx (w,T6_plot)
    title('T6')
    hold on
    T6_m=T6_m+T6_plot;

end

figure
for i=1:delta:n

    i_start=i+4;
    i_end=i+delta-1;
    T7_plot=T7(i_start:i_end);
    semilogx (w,T7_plot)
    title('T7')
    hold on
    T7_m=T7_m+T7_plot;

end

figure
T0_m=T0_m/10;semilogx (w,T0_m)
title('T0_m')
figure
T1_m=T1_m/10;semilogx (w,T1_m)
title('T1_m')
figure
T2_m=T2_m/10;semilogx (w,T2_m)
title('T2_m')
figure
T3_m=T3_m/10;semilogx (w,T3_m)
title('T3_m')
figure
T4_m=T4_m/10;semilogx (w,T4_m)
title('T4_m')
```

```
figure
T5_m=T5_m/10;semilogx (w,T5_m)
title('T5_m')
figure
T6_m=T6_m/10;semilogx (w,T6_m)
title('T6_m')
figure
T7_m=T7_m/10;semilogx (w,T7_m)
title('T7_m')
```