

## EFFECTOS DE LA OBSTRUCCIÓN DEL FLUJO EN UNA TURBINA

**Alfred Fontanals<sup>a</sup>, Roger Pijoan<sup>a</sup>, Alfredo Guardo<sup>a</sup> y Miguel G. Coussirat<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Centre de Diagnòstic Industrial i Fluidodinàmica, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Av. Diagonal, 647, 08028 Barcelona, España. <http://www.upc.edu/cdif>*

<sup>b</sup>*Laboratorio Matemáticas Aplicadas (LAMA), Dpto. Electromecánica FRM, Universidad Tecnológica Nacional, Coronel Rodríguez 273, 5500 Mendoza, Argentina.*

**Palabras clave:** Interacción rotor-estator, Dinámica de fluidos computacional.

**Resumen.** El rendimiento de una turbina, está sujeto al comportamiento del flujo a través de las directrices del distribuidor y de los álabes del rodete. Para evitar que el flujo de agua procedente del embalse introduzca cuerpos sólidos en el interior de la turbina, las centrales disponen de elementos de contención de estos cuerpos como rejillas y mallas. Cuando alguno de estos elementos falla, es posible que se produzca una obstrucción en los canales del distribuidor o en los canales del rodete. Esta obstrucción produce una variación del flujo en la turbina que hace disminuir su rendimiento, así como un aumento de los niveles vibratorios del sistema. En este trabajo se compara mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), el comportamiento del flujo en una turbina Francis trabajando en condiciones normales de operación y cuando se produce una obstrucción en su interior. Se presentan las fluctuaciones de presión en el distribuidor y se determinarán las frecuencias características del fenómeno de interacción rotor –estator para ambos casos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las centrales hidráulicas tienen una gran importancia en los sistemas de generación de energía eléctrica. El agua contenida en el embalse superior es conducida por el conducto forzado hasta la turbina hidráulica y a su salida es conducida hasta el embalse inferior. El conducto forzado dispone de elementos como rejillas y rejillas que impiden que los cuerpos sólidos de grandes dimensiones puedan producir obstrucciones y desperfectos en la turbina. Cuando estos sistemas de protección fallan y algún objeto de grandes dimensiones se introduce en la turbina se puede producir la obstrucción de los canales del distribuidor y/o del rodete, produciéndose una disminución del rendimiento de la turbina, así como un desequilibrio en el rodete que puede generar un mayor desgaste de los rodamientos.

Poder determinar que se ha producido una obstrucción en el interior de la turbina no es una tarea fácil si no se han producido graves daños en su interior. Uno de los métodos empleados es la utilización de acelerómetros situados en los rodamientos (Egusquiza, et al. 2011), que permiten obtener las frecuencias características de la vibración. Otro modo de conocer si se producen variaciones en las características del flujo es monitorizar la presión en el interior de la turbina (Rodríguez, et al. 2014).

El flujo en turbomáquinas tiene una estructura compleja y un fenómeno que influye de manera importante el comportamiento de la máquina es la interacción rotor-estator (RSI). Según Dring, Joslyn et al. 1982 y Ardnt, Acosta et al. 1989, el RSI es debido a dos mecanismos diferentes: interacción potencial e interacción de la estela. La interacción potencial es producida por el paso de los álabes del rodete frente a las directrices del distribuidor y la interacción de la estela se genera por el desprendimiento de vórtices a la salida de los álabes, debido a las fluctuaciones de la capa límite sobre el álabe. Estos fenómenos producen fluctuaciones de presión debido a la naturaleza del flujo turbulento y no estacionario.

En el presente trabajo se ha realizado un estudio comparativo mediante Mecánica de Fluidos Computacional (CFD), de un modelo a escala de turbina Francis, trabajando sin ningún tipo de obstrucción y con la obstrucción parcial y total de un canal de las directrices.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Caso de estudio

El objeto de estudio es un modelo a escala de una turbina Francis con eje horizontal, Figura 1, y con un número específico, a partir de la Ec. (1),  $n_s=0.3439$ , donde  $\omega$  es la velocidad angular,  $Q$  el caudal,  $H$  la altura neta y  $g$  la constante de la gravedad. El rodete de la turbina tiene  $z_b=10$  álabes y la corona directriz dispone de  $z_v=6$  álabes orientables. Las condiciones de trabajo de la turbina corresponden a una velocidad de giro del rodete de  $N=1480$  rpm y un salto neto de  $H=3.986$  m.

$$n_s = \omega Q^{0.5} / (H g)^{0.75} \quad (1)$$

La frecuencia de giro del rodete es  $f_f=24.6$  Hz y la frecuencia de paso de los álabes del rodete es  $f_b=246.7$  Hz y la de las directrices  $f_v=148.0$  Hz y se determinan a partir de la Ec. (2), donde  $n$  es un entero.

$$\begin{aligned}
 f_f &= \frac{N}{60}, \\
 f_b &= n f_f z_b, \\
 f_v &= n f_f z_v.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

## 2.2. Procedimiento numérico

La simulación numérica no estacionaria se ha realizado mediante el programa comercial Ansys-Fluent 16.2, basado en el método de los volúmenes finitos, que resuelve simultáneamente la ecuación de conservación de la masa y de cantidad de movimiento del fluido. Se ha utilizado el modelo de turbulencia SST  $k-\omega$  (Menter, 1994). El acoplamiento presión-velocidad se ha realizado mediante un esquema SIMPLE (Patankar et al. 1972) con una discretización espacial y temporal de segundo orden. Las condiciones de contorno utilizadas para el análisis en CFD han sido: presión a la entrada correspondiente a un salto de 3.986 m, presión atmosférica a la salida y velocidad de giro del rodete de 1480 rpm. El salto de tiempo utilizado es de  $1.12613 \cdot 10^{-4}$  s, que corresponde a un movimiento de giro del rodete de un grado. Se han realizado dos mallas una de la zona sin movimiento de la turbina y otra del rodete, Figura 1, con el objetivo de permitir el movimiento de giro del rodete durante la simulación. Tras un estudio de convergencia de malla, se ha utilizado una malla con un total de 660644 elementos y la distancia de la primera celda cercana a la pared se ha definido con el criterio de  $y^+ = 5$ .

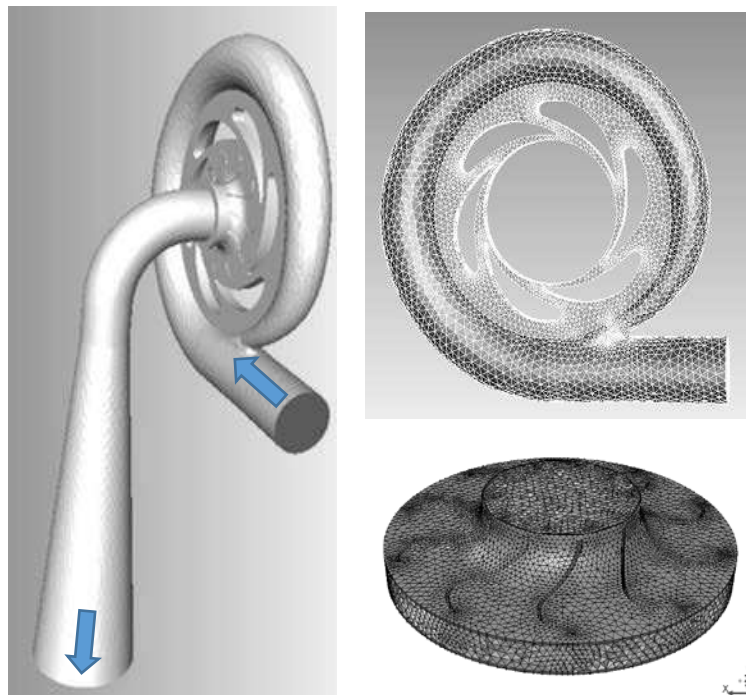


Figura 1: Izquierda: geometría de la turbina. Arriba: malla de la voluta. Abajo: malla del rodete

Para generar la obstrucción parcial se ha colocado en un canal del distribuidor un cilindro en posición normal al flujo (Figura 2), y donde el fluido puede circular por la parte superior e inferior del cilindro. En la obstrucción total se ha cerrado completamente el canal del distribuidor mediante dos paredes normales al flujo (Figura 3).

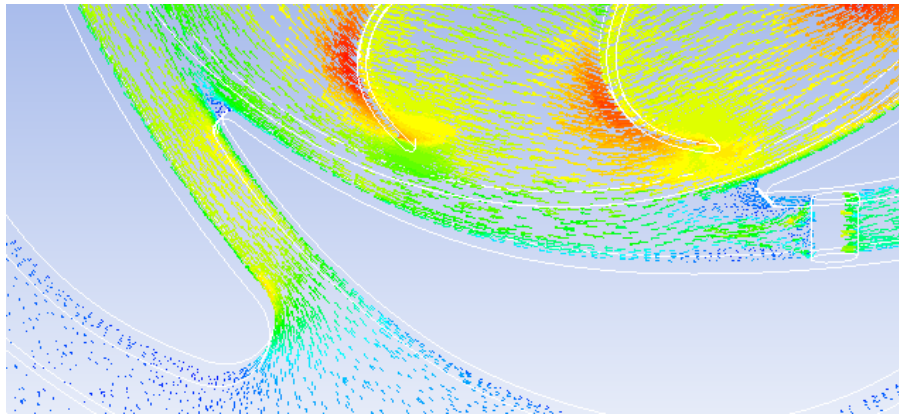


Figura 2. Vectores velocidad con la obstrucción parcial del canal B-G del difusor

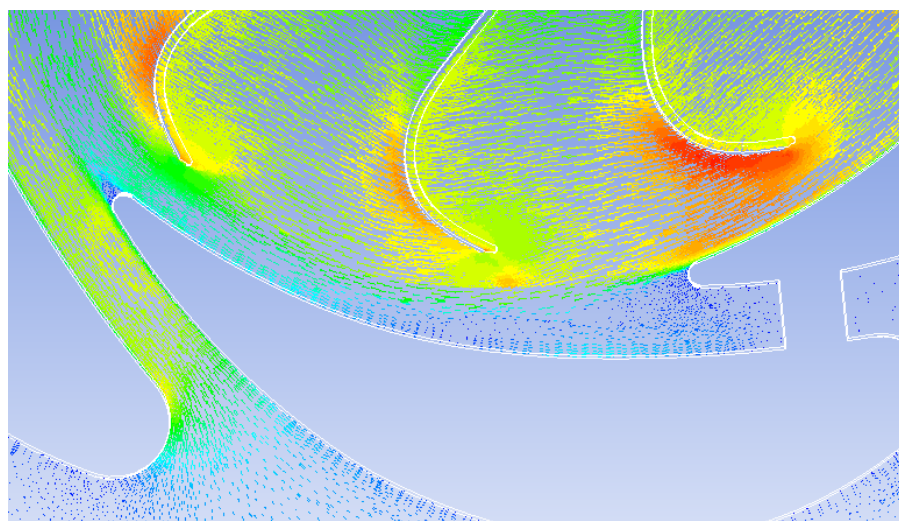


Figura 3. Vectores velocidad con la obstrucción total del canal B-G del difusor

Se han definido puntos para la obtención de la fluctuación de presión a la entrada y a la salida de los canales del distribuidor. En este trabajo se evaluará el comportamiento de la presión y se obtendrán sus frecuencias representativas mediante el uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), en los puntos B y G del canal del distribuidor, que se muestran en la [Figura 4](#).

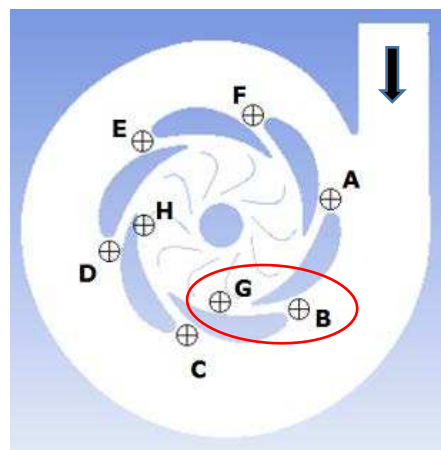


Figura 4. Puntos de monitorización de la presión en el canal del distribuidor

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la [Tabla 1](#) se muestra los resultados obtenidos en la turbina al trabajar sin y con obstrucción en el canal B-G del distribuidor. Se puede observar que la obstrucción provoca una disminución del caudal y de la potencia neta obtenida en la turbina.

Obstrucción	Altura neta (m)	Caudal (kg/s)	Potencia neta (W)	Potencia relativa
Sin	3.986	1.204	47.10	1.00
Parcial	3.986	1.121	43.84	0.93
Total	3.986	1.007	39.40	0.83

Tabla 1. Disminución de potencia a distintas condiciones de trabajo

Se observan en la [Figura 2](#) y [Figura 3](#), variaciones en las condiciones de flujo en el canal B-G del distribuidor debido a las obstrucciones y que repercuten en el comportamiento de la turbina.

La [Figura 5](#) muestra la variación de la presión y las frecuencias representativas obtenidas con el algoritmo FFT, en el punto B situado a la entrada del canal del distribuidor, para tres condiciones de trabajo distintas de la turbina: sin obstrucción, con obstrucción parcial y obstrucción total del canal B-G del distribuidor. Todos los casos estudiados presentan la frecuencia de giro del rodete  $f_f = 24.6$  Hz y la de paso de los álabes del rodete  $f_b = 246.7$  Hz y sus armónicos. El aumento del tamaño de la obstrucción provoca que aumente el valor medio de la presión en el punto B, debido a la disminución del flujo en el canal y que disminuya la amplitud de la fluctuación de presión, tal como se observa en la disminución del valor de la frecuencia característica de paso de los álabes del rodete de  $f_v = 246.7$  Hz.

En el punto G situado a la salida del canal B-G del distribuidor, [Figura 6](#). Se observa que con el aumento de la obstrucción no se producen cambios significativos en el valor medio de la presión, pero si se produce un aumento significativo del valor de su amplitud, tal como se aprecia en la frecuencia característica de paso de los álabes del rodete de  $f_v = 246.7$  Hz y sus armónicos. [Egusquiza, et al. 2011](#), cuando medían experimentalmente las vibraciones en los rodamientos del eje de una turbina durante una obstrucción del distribuidor, también observaron un aumento de la amplitud de la señal provocado por las pulsaciones de presión a la frecuencia de paso de los álabes,  $f_b$ , y cuando la obstrucción fue retirada la amplitud volvió a los valores característicos previos a la obstrucción.

### 4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio comparativo mediante CFD del comportamiento de un modelo a escala de una turbina Francis, trabajando sin ningún tipo de obstrucción y con una obstrucción en un canal del distribuidor. Para ello se han obtenido la fluctuación de presión en dos puntos situados a la entrada y a la salida del canal del distribuidor y se ha empleado la FFT para obtener sus frecuencias características.

Los resultados obtenidos muestran que la presencia de una obstrucción en un canal del distribuidor de la turbina provoca una disminución del caudal y de la potencia de la turbina. La fluctuación de presión en el punto B, situado a la entrada del canal del distribuidor, cuando se produce una obstrucción muestra un aumento del valor medio de la presión y una disminución



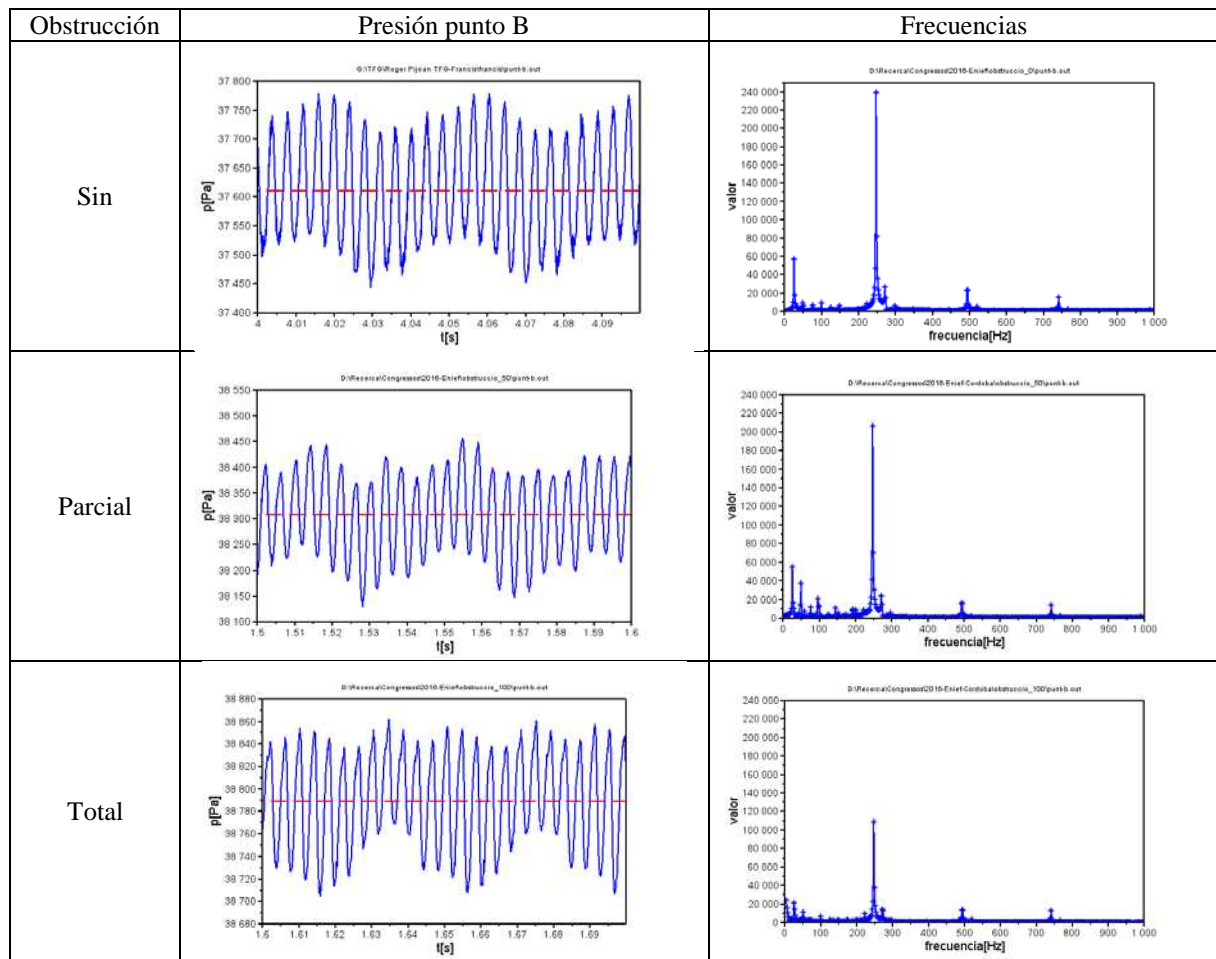


Figura 5: Presión y frecuencias representativas en el punto B, para distintas condiciones de trabajo

de la amplitud de la frecuencia de paso de los álabes del rodete,  $f_b$ . Mientras que en el punto G, situado a la salida del canal del distribuidor, con la presencia de una obstrucción no se produce un cambio significativo en el valor medio de la presión, pero si un aumento de la amplitud de la frecuencia de paso de los álabes del rodete,  $f_b$ . La variación en el comportamiento de la fluctuación de presión en el canal del distribuidor de la turbina, cuando se producen variaciones en el flujo debido a una obstrucción, puede ser un buen indicador del estado de funcionamiento de una turbina.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda del Ministerio de Economía y Competitividad de España (DPI2012-36264)

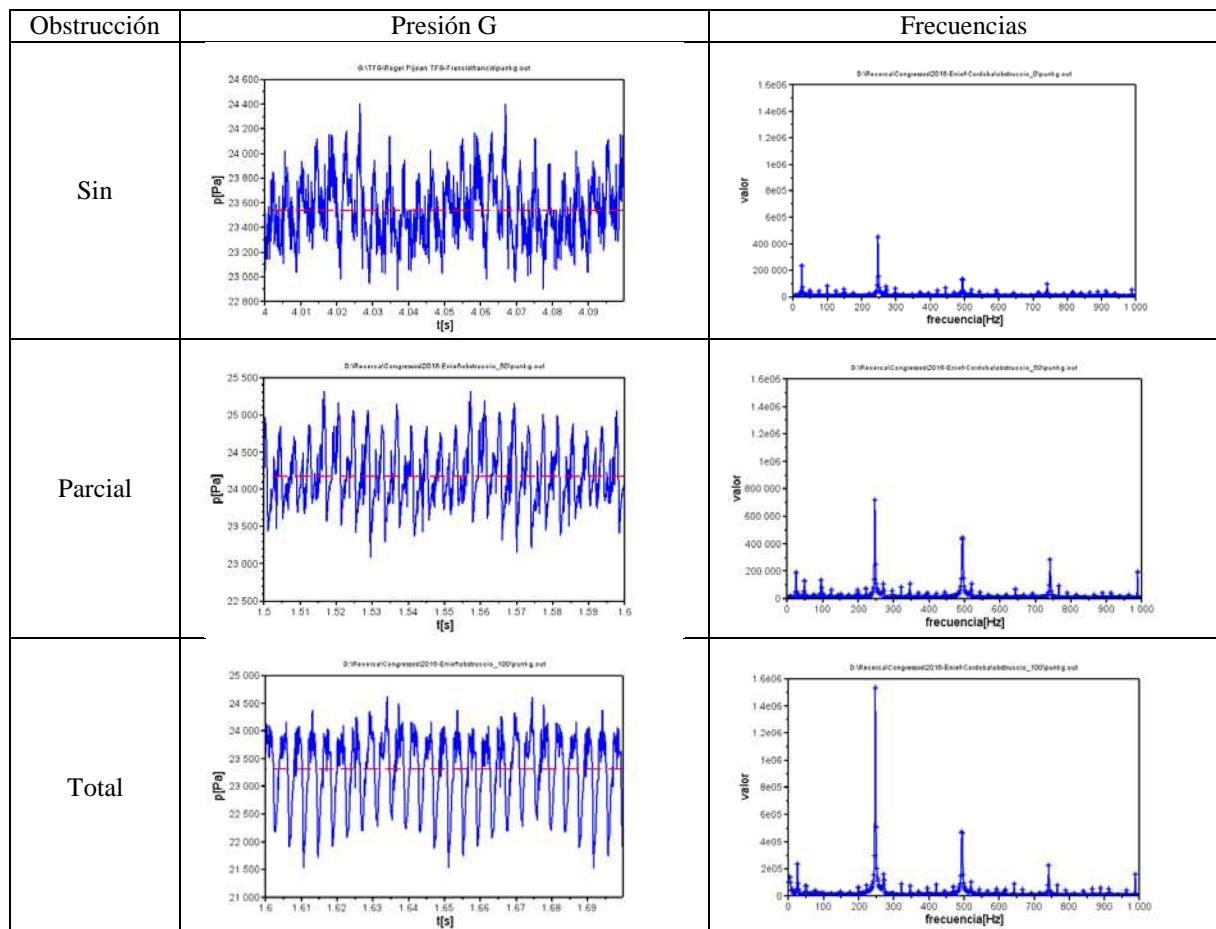


Figura 6: Presión y frecuencias representativas en el punto G, para distintas condiciones de trabajo

## REFERENCIAS

- Ardnt, Acosta, Brennen, Caughey, Experimental investigation of Rotor-Stator Interaction in a centrifugal pump with several vaned diffusers, *Journal of Turbomachinery*, 112 98-108, 1990.
- Dring, Joslyn, Hardin, Wagner H. Turbine Rotor-Stator Interaction, *Journal Eng. for Power*, 104:729-742, 1982.
- Egusquiza, E., Valero, C., Estévez, A., Guardo and A., Coussirat, M., Failures due to ingested bodies in hydraulic turbines. *Engineering Failure Analysis*, 18, 464-473, 2011.
- Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605, 1994.
- Patankar, S.V. and Spalding, D.B. , A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 15(10), 1787-1806, 1972.
- Rodríguez, C., Mateos-Prieto, B. and Egusquiza, E., Monitoring of Rotor-Stator Interaction in Pump-Turbine Using Vibrations Measured with On-Board Sensors Rotating with Shaf. *Hindawi Publishing Corporation. Shock and Vibration*. Article ID 276796, 8 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/276796>, 2014.