PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2022

INFORME DEL PROYECTO REF. *SV-22-GIJON*-12

1. Datos del proyecto

Título: Detección y diagnosis en tiempo real de anomalías de funcionamiento de motores eléctricos en la industria del cemento mediante tecnologías IoT

Fechas inicial y final del proyecto: 1/2/2022 - 31/12/2022

Investigador/a Principal: Francisco José Suárez Alonso

Otros investigadores: Juan Carlos Granda Candás y Luis Magadán Cobo

Personal contratado: Juan Serrano Prieto

Fechas inicial y final de contratación: 4/7/2022 - 31/12/2022

Empresas o instituciones colaboradoras: Cementos Tudela Veguín

Redes sociales de investigadores y empresas (Linkedin, Twitter, Instagram):

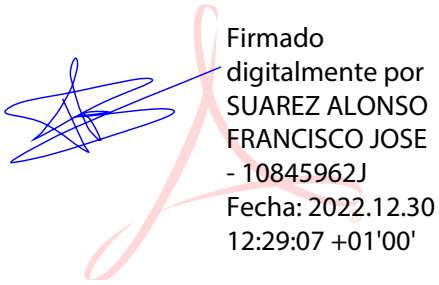
linkedin.com/in/fjsuarez-uniovi

linkedin.com/in/juancgranda

linkedin.com/in/luis-magadan-cobo

linkedin.com/in/juansp98

http://www.cementostudelaveguin.com/



Firmado digitalmente por SUAREZ ALONSO FRANCISCO JOSE - 10845962J
Fecha: 2022.12.30 12:29:07 +01'00'

2. Resumen Gráfico

.

3. Memoria descriptiva del proyecto

3.1 Resumen ejecutivo

El mantenimiento predictivo de equipos es una opción cada vez más utilizada como alternativa al simple mantenimiento reactivo (cuando los equipos fallan) o al mantenimiento preventivo (en períodos planificados), ya que supone un ahorro significativo en los costes de mantenimiento al optimizar la planificación de las operaciones necesarias. Un sistema de mantenimiento predictivo necesita disponer de una gran cantidad de datos obtenidos a partir de la monitorización de los equipos mediante sensores. Con estos datos se puede realizar directamente un análisis en tiempo real para detectar automáticamente anomalías en el funcionamiento de los equipos y alertar a los técnicos de mantenimiento. Una vez detectadas las anomalías pueden ser diagnosticadas en base a la información disponible y también, a más largo plazo, se pueden alimentar modelos de predicción de fallo (construidos a partir de todo el histórico de datos de los equipos y de los posibles fallos registrados) para poder así estimar el tiempo de vida útil restante de los equipos.

Este proyecto se ha realizado en colaboración con la fábrica de cemento de Aboño, perteneciente al grupo empresarial asturiano Tudela Veguín. En este tipo de industria se utiliza una gran cantidad de motores eléctricos como base del funcionamiento de trituradoras, molinos, cintas transportadoras,

hornos rotatorios, etc. La fábrica funciona en régimen 24x7 y el fallo imprevisto de alguno de estos motores puede suponer grandes pérdidas económicas.

Se ha desplegado un prototipo de sistema de monitorización en tiempo real de los niveles de vibración de dos motores eléctricos de la fábrica. Se han analizado los datos capturados tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia con objeto de detectar y diagnosticar anomalías de funcionamiento y reducir de esta forma los costes de mantenimiento gracias a una mejor planificación de dichas labores. Se ha conseguido generar un histórico de datos en la nube de varios meses que ha servido de base para la detección y diagnosis de anomalías y servirá en un futuro para alimentar modelos predictivos de fallo.

Los resultados obtenidos en el proyecto son prometedores. En el dominio del tiempo se ha conseguido detectar anomalías de funcionamiento directamente a partir de la visualización de las magnitudes de vibración, mientras que en el dominio de la frecuencia el análisis de la tendencia de amplitudes de frecuencias características ha permitido detectar también anomalías de funcionamiento a partir del histórico de datos almacenado. La diagnosis de las anomalías detectadas está aún en fase de investigación, pero se han preparado ya todos los datos necesarios para llevarla a cabo. Finalmente, destacar que se ha desarrollado una metodología de análisis directamente aplicable a otros motores de la fábrica (más críticos dentro del proceso de fabricación) que se van a empezar a monitorizar en un futuro inmediato.

3.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

1. Despliegue de un sistema de monitorización y visualización en tiempo real de motores eléctricos en la factoría mediante sensores inteligentes inalámbricos de bajo coste: 100% conseguido. Se ha desplegado un prototipo completo para monitorizar dos motores y los datos recogidos se muestran a través de un dashboard desarrollado para que los técnicos de mantenimiento de la planta tengan acceso.

2. Explotación temprana de los resultados de la monitorización de los motores mediante la detección de anomalías de funcionamiento y la generación de las correspondientes alertas como ayuda a la toma de decisiones por parte de los técnicos de mantenimiento: 75% conseguido. Se han detectado anomalías en uno de los motores y generado alarmas.

3 Diagnosis de las anomalías de funcionamiento detectadas: 50% conseguido. Se han generado todas las gráficas de tendencia que servirán de base para la diagnosis.

4. Construcción de un histórico de datos de monitorización en la nube: 100% conseguido. Se ha generado un histórico con 4 meses de datos.

3.3 Tareas realizadas

1. Selección de los motores a monitorizar

La selección se realizó en colaboración con el responsable de mantenimiento eléctrico de la fábrica entre aquellos motores que no tenían ya un seguimiento de su nivel de vibraciones. Los datos monitorizados han sido principalmente magnitudes de vibración y componentes del espectro de frecuencia de dichas vibraciones (frecuencias relevantes y sus amplitudes correspondientes).

2. Despliegue del sistema de monitorización en la fábrica

Se desplegaron sensores en motores, gateways y un interfaz 4G que permite la comunicación de los gateways con el exterior como parte de un prototipo.

3. Visualización de los datos monitorizados

Se enviaron los datos relevantes desde los gateways hacia la nube y se almacenaron allí como histórico. Para la visualización de datos se ha desarrollado un dashboard web mediante la herramienta Grafana.

4. Detección de anomalías de funcionamiento

La detección de anomalías se ha hecho en base al análisis de series temporales de los datos monitorizados mediante scripts en Python. También se han tenido en cuenta las recomendaciones de la norma internacional ISO 20816 [1].

5. Diagnosis de las anomalías de funcionamiento detectadas

La diagnosis se ha llevado a cabo a partir de la literatura científica y normas internacionales como la ISO 17359 y la ISO 13373 [2-6].

6. Documentación y difusión de los resultados

- Se esta elaborando una propuesta de artículo para congreso/revista internacional.

3.4 Resultados obtenidos

A continuación se resumen los resultados obtenidos en relación a los objetivos planteados:

1. Despliegue de un sistema de monitorización

En el resumen gráfico del proyecto se muestra el despliegue realizado en las dos zonas de la fábrica correspondientes a los motores seleccionados, motores que impulsan ventiladores de rechazo encargados de retornar a los molinos aquellos trozos de material que superan un tamaño mínimo. Se montaron sensores de vibración encima del rodamiento delantero de cada motor, los cuales se comunican de forma inalámbrica con gateways situados en su proximidad. Los gateways, que proporcionan comunicación con la nube, están integrados en una red mallada, de modo que solo uno de ellos necesita establecer comunicación con el exterior mediante una interfaz 4G.

2. Visualización en tiempo real

En las figuras 1 y 2 se muestra el monitor de vibración de cada uno de los motores durante una semana. Se indica el nivel de vibración en velocidad (mm/s) para cada uno de los 3 ejes (axial, radial horizontal y radial vertical) junto con los umbrales de seguridad definidos en la noma ISO 20816 [1].

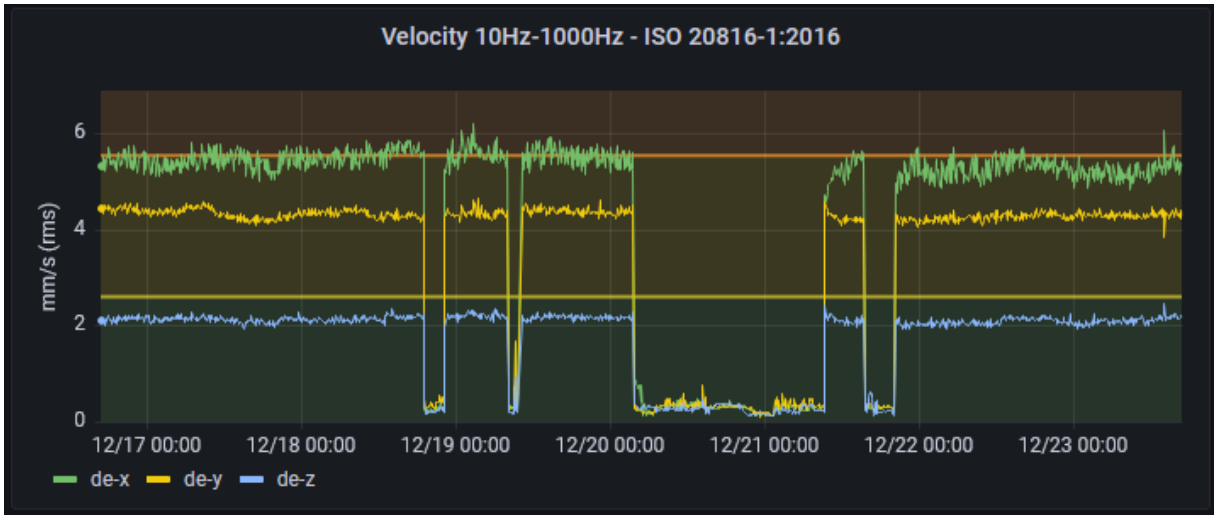


Figura 1 · Monitor del motor 1.

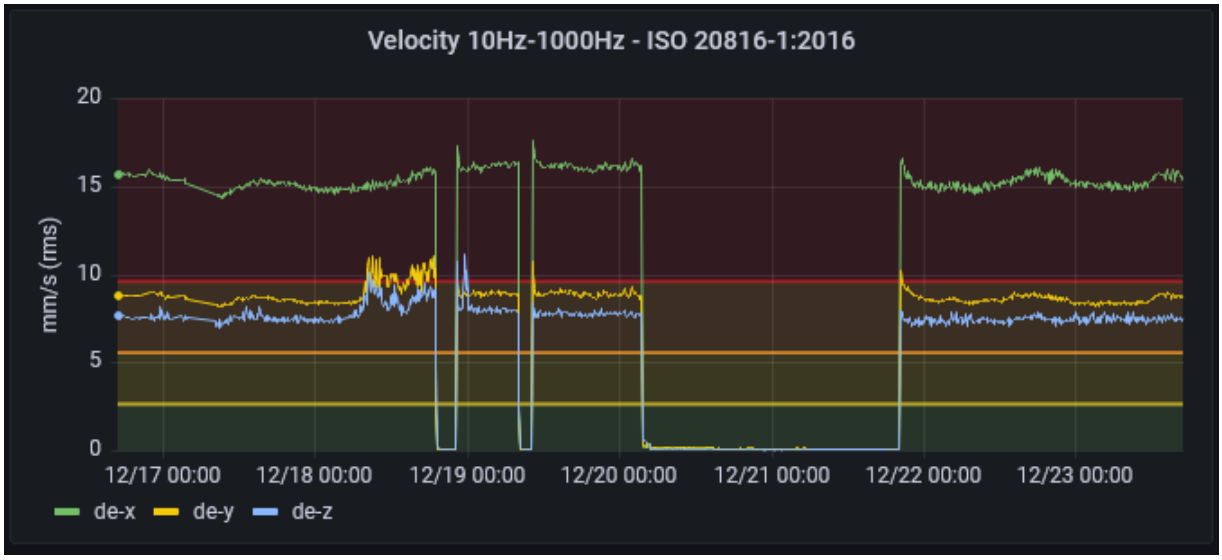


Figura 2 · Monitor del motor 2.

3. Detección de anomalías de funcionamiento

La detección de anomalías de funcionamiento se realiza tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, a partir del análisis de tendencia en las series temporales de la variables monitorizadas.

Al comparar las figuras 1 y 2 se aprecia un nivel de vibración en el eje X (radial) bastante más elevado en el motor 2 respecto al motor 1, superando además el umbral de seguridad indicado por la norma ISO 20816. Esta anomalía de funcionamiento detectada por el sistema generó la correspondiente alerta para los técnicos de mantenimiento de la planta. De hecho, este motor 2 en una fase mucho más avanzada dentro de su ciclo de mantenimiento preventivo de 40000 horas (90% del ciclo) que el motor 1 (40% del ciclo).

En el caso del dominio de la frecuencia las variables utilizadas son las amplitudes de los espectros de frecuencia resultantes de aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a conjuntos de muestras de vibraciones correspondientes a varios segundos de operación del motor. En la figura 3 se muestra un espectro correspondiente al eje X de uno de los motores.

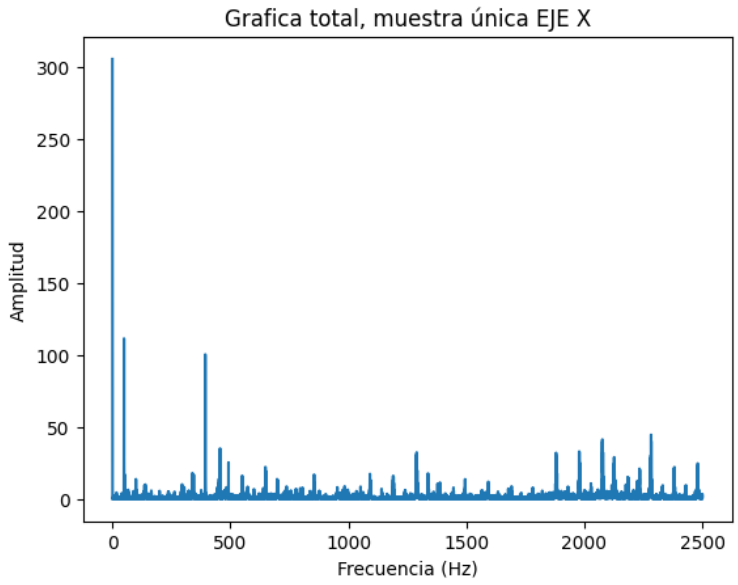


Figura 3 · Espectro de frecuencia.

Generando espectros de forma continua se puede analizar la tendencia de las amplitudes de ciertas frecuencias características y así es posible detectar la aparición temprana de fallos de funcionamiento asociados a dichas frecuencias. En la figura 4 se muestra la evolución creciente (durante 4 meses) de la amplitud de la frecuencia de rotación (RF) del motor 2 en el eje X (radial), debida a que el motor se encuentra como ya se mencionó en una fase bastante avanzada dentro de su ciclo de mantenimiento preventivo (90% del ciclo de 40000 horas). Estamos actualmente tratando de determinar el umbral de amplitud a partir del cual generar la correspondiente alerta de anomalía de funcionamiento.

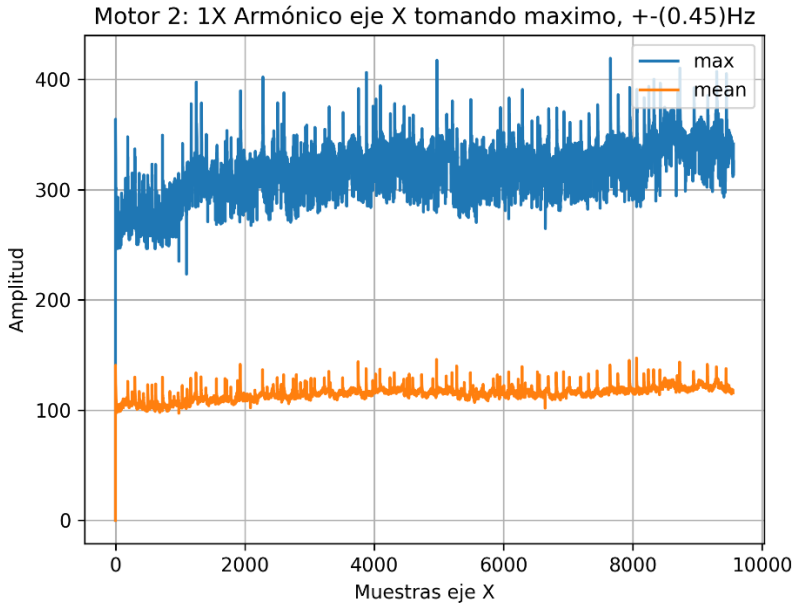


Figura 4 · Tendencia de amplitud de frecuencia característica.

4. Diagnosis de anomalías de funcionamiento

El análisis de tendencias de las amplitudes correspondientes a frecuencias características asociadas a posibles fallos de funcionamiento es la base de la diagnosis llevada a cabo. Se han analizado las tendencias de las amplitudes correspondientes a frecuencias características tanto del motor como del ventilador que actúa como carga y de los rodamientos, al ser estos una de la principales causas de fallos en los motores. A continuación se indican dichas frecuencias características:

- Frecuencia de rotación del motor (RF) y sus primeros múltiplos (1X/2X/3X).
- Frecuencia de rotación de las aspas (8) del ventilador (VPF) y sus primeros múltiplos.
- Frecuencia característica de la carrera interna del rodamiento (BPFI) y sus primeros múltiplos.
- Frecuencia característica de la carrera externa del rodamiento (BPFO) y sus primeros múltiplos.
- Frecuencia característica de la bola del rodamiento (BSF) y sus primeros múltiplos.
- Frecuencia característica de la jaula del rodamiento (FTF) y sus primeros múltiplos.

Todas las gráficas de tendencia generadas han sido recopiladas en un documentos anexo en formato PDF accesible a través del siguiente enlace: 2022_IUTA_GraficasAnalisisMotores.pdf.

Por otra parte, y para no depender exclusivamente del conjunto de datos proporcionado por estos motores, el equipo de investigación ha trabajado en paralelo en la diagnosis de anomalías haciendo uso de datasets públicos.

5. Construcción de un histórico de datos de monitorización

Se han generado históricos de datos de monitorización de 4 meses de duración (septiembre a diciembre de 2022) para cada uno de los motores en los que se incluyen las aceleraciones de los 3 ejes del motor, realizando capturas cada 8 minutos. En las figuras 5 y 6 se muestran todos los datos de vibración capturados durante dicho período, que han sido utilizados para la generación de las gráficas de tendencia comentadas en el apartado anterior. A pesar de que la fábrica funciona en régimen 24x7 se puede apreciar que los motores monitorizados no siempre están en funcionamiento.

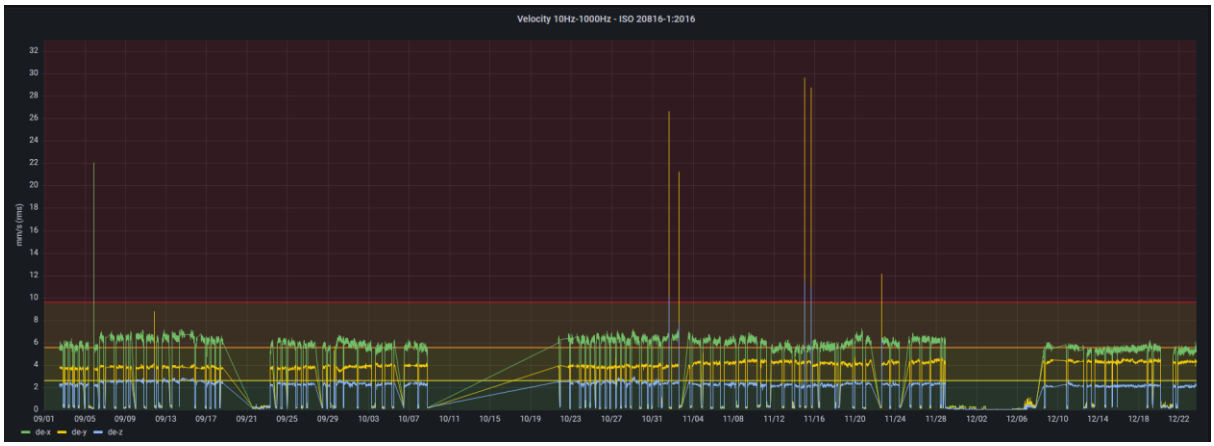


Figura 5 · Histórico de datos del motor 1.

Figura 6 · Histórico de datos del motor 2.

3.5 Trabajos o necesidades futuras

Gracias a la satisfacción de la empresa con el trabajo realizado se va a seguir colaborando con ella mediante la firma de un contrato de investigación durante 2023 que proporcionará financiación para la compra de nuevos equipos. En el contexto del mismo se analizarán nuevos motores de la fábrica de carácter más crítico dentro del proceso de fabricación, utilizando para ello la metodología desarrollada.

3.6 Divulgación de los resultados

Una vez se completen los resultados del proyecto se va a preparar una propuesta de artículo para la revista Mobile Networks and Applications (MONET) de la editorial Springer.

4. Memoria económica

4.1 Gastos:

Concepto	**Gasto**
Personal	1698 €
Fungibles (sensores y gateways)	250 €
Desplazamientos	52 €
TOTAL GASTOS	2000 €

4.2 Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora	**Concepto**	**Ingreso**
Ayuda IUTA	Becario	1698 €
Financiación propia	Fungibles	250 €
Financiación propia	Desplazamientos	52 €
TOTAL INGRESOS		2000 €

5. Bibliografía

1. *Norma ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines.*
2. *Norma ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines.*
3. *Norma ISO 13373-1:2002. Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring. Part 1: General Procedures.*
4. *Norma ISO 13373-2:2016. Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring. Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data.*
5. *Norma ISO 13373-3:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring. Part 3: Guidelines for vibration diagnosis.*
6. *Norma ISO 13373-9:2017. Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring. Part 9: Diagnostic techniques for electric motors.*