

Título del Proyecto de Investigación  
al que corresponde el Reporte Técnico:

Gestión y mantenimiento predictivo para el sistema de recirculación  
de aire en un horno de extrusión.

Tipo de financiamiento

Con financiamiento

Fecha de Inicio: 30/11/2021  
Fecha de Término: 30/11/2022

Tipo de Reporte

Parcial

Final

Autor (es) del reporte técnico:

M.C. Lidia Hortencia Rascón Madrigal  
M.C. Héctor Manuel Loya Caraveo  
Dr. Jose Manuel Mejía Muñoz  
Dr. Onofre Amador Morfín

# Gestión y mantenimiento predictivo para el sistema de recirculación de aire en un horno de extrusión.

## Resumen del reporte técnico en español (máximo 250 palabras)

Se presenta un sistema de gestión y mantenimiento preventivo para la recirculación del aire en un horno de extrusión basado en el análisis de vibración de un motor de 440 V A.C. La medida de vibración es analizada en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia de forma no invasiva. El sistema está integrado por un emisor y un receptor, el emisor está integrado por un sensor de vibración acelerómetro ADXL345, en la primera etapa y sensor industrial en la segunda etapa (debido a los tiempos de entrega), que miden y envía la medida de vibración en vrms, la cual es utilizada para medir la severidad de vibración teniendo como referencia múltiples normas ISO, también envía el espectro de frecuencias al receptor por medio del protocolo LoRa. El receptor está colocado a 70 m de distancia, éste colecta y almacena las lecturas de vibración. Los resultados en las pruebas realizadas durante las medidas en la empresa con distancias de 70 m de separación entre emisor y receptor mostraron buen desempeño, con pérdida de 4 paquetes de datos. Se concluye que es factible medir, registrar de manera inalámbrica la vibración a distancia de 70 m. En la segunda y tercera etapa se integra el sensor industrial para realizar la medición y en análisis de la señal, aun se trabaja en esta parte.

## Resumen del reporte técnico en inglés (máximo 250 palabras):

**Palabras clave:** Mantenimiento predictivo, análisis de vibración, Wireless, LoRa.

## Usuarios potenciales (del proyecto de investigación)

Empresa Grupo IMSSA.

## Reconocimientos

Agradecimientos a Grupo IMSSA, Ing. Anuar Emmanuel Ramírez Valenzuela.

## 1. Introducción

Una empresa local desea implementar un programa de mantenimiento predictivo con el fin de mantener los motores funcionando, evitar fallas y paros en la línea de producción que repercuten en gastos extra para la empresa, el sistema se desarrolla utilizando dos módulos con comunicación inalámbrica, uno emisor que registra la señal de vibración del motor, calcula el valor vrms y la transformada de Fourier, envía los datos de manera inalámbrica al receptor utilizando el protocolo de comunicación LoRa. El receptor recibe los datos y los envía a una computadora vía el puerto de comunicación RS232, los datos son almacenados en un archivo tipo \*.cvs o \*.txt. El sistema se ha desarrollado en tres etapas, debido a que se eligió utilizar un

sensor industrial cuyo tiempo de entrega fueron varios meses. La primera utilizó un sensor acelerómetro ADXL345, se calculó el valor vrms de la vibración en motores tanto de la UACJ como el motor de la empresa, se realizó el envío y recepción de datos mediante el protocolo LoRa. En la segunda etapa se utilizó en sensor industrial, para medir la señal de vibración, se cambió la placa de desarrollo que incluye el microcontrolador ESP32 por uno que integra el microcontrolador, el módulo de comunicación LoRa y una pantalla LCD en una placa de desarrollo, ya que en la etapa 1, fue complicado soldar la antena. En esta etapa se realizó el acondicionamiento de la señal y se realizó la lectura de los datos en el módulo emisor. La tercera etapa integra el módulo emisor y receptor incluyendo la comunicación LoRa y el registro de datos en archivos \*.csv o en la nube, así como las pruebas de cada módulo emisor - receptor. A la fecha se han realizado las etapas 1 y 2. El próximo semestre se trabajará en la etapa 3.

## 2. Planteamiento

Grupo IMSSA en Ciudad Juárez, Chihuahua está interesada en incluir tecnología de medición y análisis en sus procesos de mantenimiento, uno de los puntos clave en la empresa es el mantenimiento oportuno de motores de 0.55 Kw, 1.26 A, 440 V A.C. Se desea implementar un programa de mantenimiento predictivo con el fin de mantener los motores funcionando al 100%, evitar fallas y paros en la línea de producción que repercuten en gastos extra. Al ocurrir una falla en el motor es necesario realizar la reparación o reemplazo de este, lo cual repercute en tiempo de inactividad en las líneas de producción, y en consecuencia, en el número de partes producidas. En la mayoría de las veces los tiempos de inactividad conllevan a pérdidas económicas en la industria. Esperar hasta el momento de la falla usualmente genera un compromiso financiero, en cambio, planificar la solución del problema antes de tiempo ayuda a ahorrar dinero y estrés.

### 2.1 Antecedentes

En la actualidad, el mantenimiento preventivo es uno de los métodos más utilizados [2], aun cuando después de estudios con sistemas y condiciones idénticos se llegó a demostrar que el tiempo que tarda en presentarse una falla en un sistema es diferente de uno a otro. Por tal motivo, el mantenimiento preventivo es efectivo, mas no óptimo [1].

Por otro lado, el mantenimiento predictivo ha sido aprovechado en los últimos años [3]. Este mantenimiento estudia las medidas que detectan el inicio de la degradación del mecanismo y, por tanto, permiten eliminar o controlar los originadores del problema antes de cada deterioro significativo de la condición del dispositivo [1]. El mantenimiento predictivo bien aplicado la mayoría de las veces, es más efectivo en los costos que un mantenimiento correctivo o un

mantenimiento preventivo [3]. Los siguientes ahorros son resultado del uso del mantenimiento predictivo [1]:

- 10 veces el retorno de la inversión.
- 25% al 30% de reducción de costos en mantenimiento.
- 70% al 75% Problemas solucionados.
- 35% al 45% de reducción en tiempo de inactividad.
- 20% al 25% de incremento en producción.

La parte difícil es que al inicializar un programa de mantenimiento predictivo no es económico. Tanto el equipo como la capacitación requerida para llevarlo a cabo es costoso [1].

Para 2011, cerca del 30% del equipo industrial, no se ve beneficiado por técnicas de mantenimiento predictivo. En su lugar, el mantenimiento preventivo o periódico es utilizado para detectar cualquier anomalía o componentes no funcionales. Al comparar el mantenimiento preventivo y el predictivo, se ha demostrado que ningún problema fue encontrado en el 70% de las revisiones periódicas, mientras que los porcentajes han alcanzado el 90% cuando se utilizan técnicas de mantenimiento predictivo. Esto sugiere que este último método puede incrementar la eficiencia del mantenimiento y, además, puede reducir la cantidad de fallas en sistemas industriales [4].

El análisis de vibraciones como una técnica de mantenimiento predictivo es un criterio importante para diagnosticar fallas en motores [2]. Debido a la capacidad para detectar las fallas principales como: desbalances, falta de alineamiento, excentricidad, rodantes defectuosos, casquillos defectuosos, partes flojas, roturas de barras en el rotor y fallas electromagnéticas [5]. El análisis de vibraciones estudia la frecuencia y magnitud de las vibraciones. Para determinar la severidad de las vibraciones se utilizan la norma ISO 2372 para la vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 revoluciones por segundo (rps) y 200 rps; la norma ISO 3945 para la medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas, con velocidades de operación entre 10 rps y 200 rps; la norma ISO 20816 para la evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas esta última sustituye a la norma ISO 10816 [5].

La vibración está presente tanto en maquinaria saludable como en maquinaria dañada. La detección de fallas se puede realizar cuando la deformación y el daño parcial permiten que las características complejas varíen a lo largo de la vida útil general de las máquinas y eventualmente eleven el grado de vibraciones [3].

## 2.2 Marco teórico

### 2.2.1 Norma ISO 2372

La norma ISO 2372, se centra únicamente en la severidad de la vibración mecánica de máquinas individuales, las cuales considera como aquellas ocurriendo en la superficie de la máquina, en los rodamientos o los puntos de montaje en un rango de frecuencia de entre 10 Hz y 1000 Hz. La evaluación de esta vibración toma en cuenta: Las características de la máquina, el estrés por vibración en la máquina, las características del instrumento de medición, los efectos de la vibración de la maquina en su ambiente [7].

La norma establece los parámetros de severidad de vibraciones en motores mediante el parámetro de la velocidad RMS clasificando los motores en 4 tipos y valorando su severidad por normal, admisible, límite, no permisible [7]. Aun cuando existen normas con parámetros de severidad de vibraciones más actualizadas, esta norma es la vigente para motores de 15 KW, el motor que se analiza en este proyecto es de 0.55 KW.

### 2.2.2 Norma ISO 20816-1:2016

La norma ISO 20816-1:2016 establece condiciones generales y procesos para la medición y evaluación de la vibración usando mediciones realizadas en partes rotativas y no rotativas de máquinas [6]. Estos criterios se realizan con el propósito principal de asegurar un funcionamiento confiable, seguro y a largo plazo de la máquina. Esta norma publicada en 2016 estandariza rangos de frecuencia en máquinas, tipos de medición, parámetros de medición, puntos de medición, así como criterios para la evaluación de la vibración en máquinas que culminan con rangos, alarmas que instan a tomar acciones de mantenimiento.

### 2.2.3 Norma ISO 5348:2021

Este documento las propiedades técnicas de los diferentes métodos para montar transductores de vibración y describe prácticas recomendables al momento de montar estos transductores [9]. Entre los montajes que se describen en esta norma se encuentran los montajes con pernos, adhesivo, imanes, sonda, anclajes de cuña, montaje rápido, entre otros.

### 2.2.4 Norma ISO 2954:2012

En esta norma se especifican los requerimientos que son necesarios para los instrumentos de medición con el fin de detectar severidad de vibración en máquinas [10]. Se especifican los rangos de frecuencia necesarios del sensor por medio de fórmulas y la sensibilidad por medio de tablas que indican el valor en decibeles (dB).

### 2.2.5 Tablas de severidad de vibración ADASH

La empresa ADASH es una empresa fabricante de analizadores de vibración y monitoreo de condición en máquinas rotativas [8]. Ellos proporcionan estándares que, aunque no sustituyen ninguna norma ISO que actualmente sea vigente, si tienen un enfoque actualizado para definir límites de severidad de vibración el cual se basa no en la potencia de los motores si no en la velocidad de RPM que tenga la máquina. Es importante recalcar que no solamente existen

límites para el parámetro de vibración en velocidad como lo hacen las normas ISO, si no también lo hace para el parámetro de aceleración.

### **2.2.6 Sensores de vibración**

Los sensores de vibración permiten convertir la señal de vibración en una señal eléctrica o digital si el sensor es capaz de enviar los datos por un protocolo serial. La forma principal de funcionar es reflejar el cambio estático y el comportamiento dinámico de la estructura midiendo el movimiento de la masa de inercia [11] los sensores más comunes para realizar este trabajo son el acelerómetro de vibraciones y el sensor de velocidad.

### **2.2.7 Sensor de aceleración**

Los sensores de aceleración son ampliamente usados debido a que al tener el parámetro de la aceleración, se puede obtener la velocidad y el desplazamiento. Usualmente hay dos tipos de acelerómetros piezoeléctricos y capacitivos, los primeros permiten ver las características dinámicas, pero no se pueden medir las cantidades físicas estáticas, en cambio los capacitivos se utilizan en la medición de características estáticas. Los sensores piezoeléctricos de aceleración son usados ampliamente en la prevención de fallas en maquinaria [11]. Las principales características de un sensor según la norma ISO 2954:2012 son: rango de frecuencia y sensibilidad [10].

## **3. Objetivos (general y específicos)**

### **Objetivo general**

Desarrollar un sistema de mantenimiento predictivo para la recirculación de aire en un horno de extrusión a fin de que el motor trabaje de manera interrumpida durante la jornada laboral.

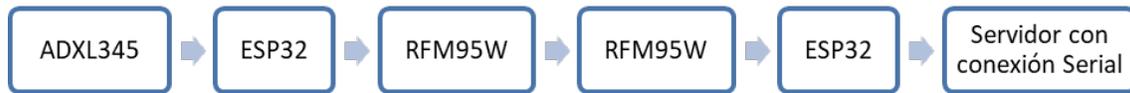
### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar el sistema de medida de vibración en el motor que recircula el aire en el horno de extrusión.
2. Instalar el sensor de vibración en el motor después de hacer las adecuaciones necesarias.
3. Registrar la señal de vibración en velocidad para el motor de 440 V C.A. del sistema de recirculación de aire.
4. Analizar la señal de vibración en velocidad para un motor de corriente continua de 440 V A.C. para generar una alerta cuando se detecte una posible falla.

## **4. Metodología**

En este trabajo se presenta el esquema general de la metodología donde se detallan las etapas implementadas en el desarrollo del proyecto, mismo que está integrado por un emisor, cuya función es registrar los valores de vibración del motor y calcular: el valor vrms y el espectro de frecuencias de la señal de vibración, para después enviarlos de forma inalámbrica por el

protocolo LoRa al receptor. El receptor, su función es recibir mediante el RFM95W las señales enviadas, dirigirlas a la computadora vía protocolo de comunicación RS232 y almacenarlas en un archivo \*.csv para ser procesadas por el departamento de informática. A continuación, se puede ver en la Figura 1 el diagrama de general del sistema completo utilizado en este proyecto.



**Figura 1** Diagrama de bloques sistema completo del proyecto.

### **Circuito emisor**

En primera instancia, se decidió utilizar el sensor CTC LP204, el cual cuenta con una salida dual de vibración y temperatura, el parámetro de temperatura es un indicador del buen funcionamiento del motor, ya que, al haber una falla, es probable que se incremente la temperatura. Lamentablemente el sensor los tiempos de entrega del sensor fueron varios meses, razón por la cual, se decidió utilizar el sensor acelerómetro ADXL 345. El uso de este sensor se integra en las etapas 2 y 3 del proyecto que están aún en desarrollo. La prioridad era elegir un sensor con un rango de frecuencia de 10 Hz a 1 KHz [13], en esta decisión también se consideró el presupuesto de la empresa IMSSA. La norma ISO 2954:2012. brinda importantes guías para la selección de instrumentos de medición para estimar la severidad de vibración.

En la primera etapa, para poder avanzar en el proyecto mientras se surtía en otro sensor, se adquirió el sensor ADXL 345 de la empresa *Analog Devices Inc.*, entre sus características importantes se encuentran: la alta resolución de 13 bits del ADC, la sensibilidad programada por el usuario de  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  y  $\pm 16g$ , frecuencia máxima de muestreo de 3,200 Hz la cual permite adquirir los cambios más rápidos en la aceleración de la vibración y su protocolo de comunicación SPI que permite el envío de una gran cantidad de datos.

### **Procesamiento de la señal**

Después de la adquisición de los datos, se realizó la programación del microcontrolador en el lenguaje C++, para después integrar la señal de aceleración que proviene del sensor ADXL 345 y así obtener el parámetro de velocidad y procesar las señales obtenidas de dos formas:

- 1) Calcular componente RMS de aceleración y velocidad, con el fin de realizar un análisis de severidad de vibración para la predicción de posibles fallas en el motor.
- 2) Transformar la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) con el fin de brindar las herramientas necesarias para implementar el análisis de frecuencias de vibración para la predicción y clasificación de posibles fallas en el motor.

### Envío de datos de forma inalámbrica, emisor y receptor

El módulo LoRa que se utilizó en este proyecto es el transceptor RFM95W, el cual cuenta con conectividad serial por medio del protocolo SPI y fue escogido por ser compatible con la librería *LoRa de Sandeep Mistry* para proyectos programados en C++ [23]. La comunicación tiene como objetivo enviar los datos adquiridos y procesados inalámbricamente hasta los servidores de la empresa IMSSA. Para realizar este paso, se instala el transceptor de envío en el microcontrolador ESP32 que adquiere y procesa la señal y otro en el microcontrolador ESP32 (figura 2) que recibe la señal para posteriormente enviar la información a la base de datos de la empresa IMSSA por medio de un servidor con conexión Serial.

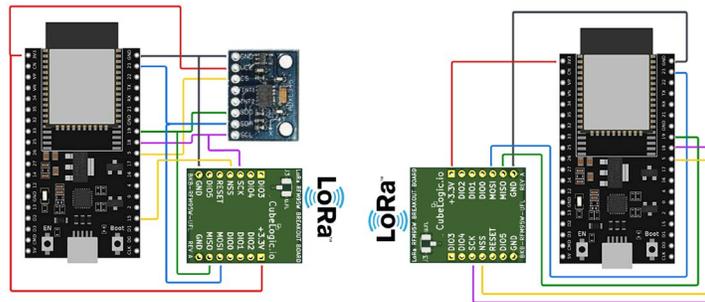


Figura 2 Comunicación LoRa, envío inalámbrico de datos.

### Pruebas de adquisición de datos

Se realizaron las conexiones del sensor ADXL345 y el ESP32, se implementó el algoritmo para la adquisición de las lecturas de aceleración correspondiente a la vibración del sensor. La primera serie de pruebas que se realizaron para verificar la adquisición de los datos consistieron en:

- 1) Realizar movimientos vibratorios controlados sobre el sensor ADXL 345, durante más de un segundo y registrar los datos en un archivo. Posteriormente, graficar los datos y verificar de manera visual su relación con los movimientos a los que fue sometido.
- 2) Adquirir por más de un segundo los datos del sensor ADXL 345, mientras se realizan pequeños golpes cerca de la base del acelerómetro, posteriormente graficar los datos adquiridos y compararlos con el número de golpes emitidos sobre la mesa para cada una de las pruebas.

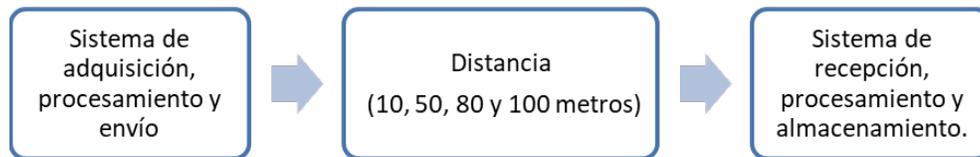
Para el ensamblar el sensor en la mesa en donde se realizaron las pruebas se utilizó cinta adhesiva de doble cara para ayudar al sensor a adquirir información en un lugar estable como se muestra en la Figura 3 aun cuando no se sabe con certeza cuanto afecte la cinta adhesiva al desempeño del sensor, en las primeras pruebas parece ser poco invasivo con los resultados.



Figura 3 Ensamble de sensor ADXL 345 en mesa de pruebas.

### Protocolo de prueba. Prueba de distancia LoRa

Las pruebas de implementación del envío y recepción de datos se realizaron con el sistema de la Figura 4 en la empresa IMSSA para verificar que toda la información adquirida, procesada y enviada fuera la correcta, se realizaron pruebas de distancia, en donde se alejó el sistema de envío del sistema de recepción por distancias de 10 m, 50 m, 80 m y 100 m, siendo este último el lugar en donde se conectó el sistema al servidor para su instalación permanente y se registraron el número de paquetes que llegaron correctamente a almacenarse en el servidor de la empresa IMSSA.



**Figura 4** Diagrama de bloques para prueba de distancia.

El total de paquetes que se esperan son 512, 256 paquetes con 16 datos cada uno pertenecientes a la información en el dominio del tiempo y 256 paquetes con 8 datos cada uno pertenecientes al dominio de la frecuencia.

### Análisis y validación de la señal según los parámetros de la norma ISO 2372

Recordando que las referencias principales de rangos de severidad en motores en este proyecto son la norma ISO 2372 y la tabla de severidad de vibración proporcionada por el fabricante ADASH, se estipula que el valor RMS en aceleración del motor no debe pasar los 0.75g mientras que el valor RMS de la velocidad en el motor no debe de pasar los 1.8 mm/s. Esto es tomando en cuenta que el motor de la empresa IMSSA tiene una potencia de 0.55Kw. Con el archivo de datos adquiridos por el protocolo LoRa almacenado en el servidor, se calcula la integral y el RMS de aceleración y velocidad tal como se describió en los numerales 3.6.1 y 3.6.2 de este documento, estos datos adquiridos en el servidor junto con notificaciones de estado del motor de acuerdo a los rangos máximos de RMS en aceleración así como de velocidad se almacenan en un archivo llamado vRMS.csv el cual genera un nuevo renglón cada ocasión en que se envía un nuevo conjunto de paquetes obteniendo así un historial de lecturas. Por medio del análisis de los datos obtenidos, podemos clasificar el valor RMS tanto de aceleración como de velocidad y estudiar las posibles fallas que pudiera presentar el motor en un futuro de acuerdo con su tendencia.

### Prueba final

Como prueba final se instaló el sensor cerca de los rodamientos en el motor de laboratorio, se adquirió la señal en el tiempo, se calculó la FFT de la señal, y por último, se integró y cálculo el valor RMS de aceleración y velocidad, los resultados se analizaron en tres aspectos: 1) la

amplitud de vibración en el dominio del tiempo, 2) la forma en que se comportaba el espectro de frecuencias y 3) sus valores RMS en aceleración y en velocidad. Posteriormente, se realizó la misma prueba en el motor de la empresa IMSSA comparando las diferencias entre los dos motores y llegando a conclusiones del proyecto.

## 5. Instituciones, organismos o empresas de los sectores social, público o productivo participantes (Si aplica)

El proyecto está financiado por la empresa Grupo IMSA, quien aporta en especie los sensores, los microcontroladores. El responsable por parte de la empresa es el maestro Sergio Lujan Maldonado.

## 6. Resultados

Los resultados obtenidos en este proyecto se escriben en el mismo orden que la metodología. Cada una de las pruebas se realizó tomando 4096 muestras a una frecuencia de muestreo de 3000 Hz, además, se configuró la sensibilidad del sensor en +/- 4g.

### 4.2.1 Prueba al realizar movimientos vibratorios controlados

Los resultados en las pruebas de adquisición de la señal fueron favorables, al adquirir por más de un segundo los datos del sensor al ser sometido a diferentes movimientos controlados que se le aplicaban, se obtuvieron las gráficas que se observan en la Figura 5 y Figura 6.

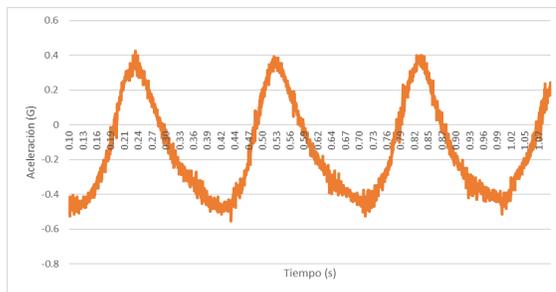


Figura 5 Tres movimientos por segundo.

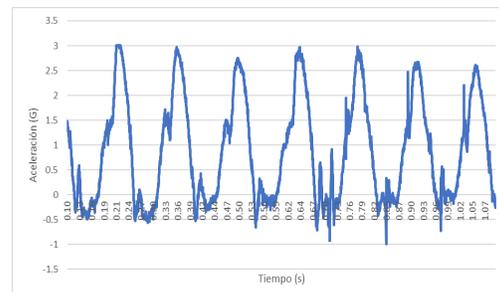
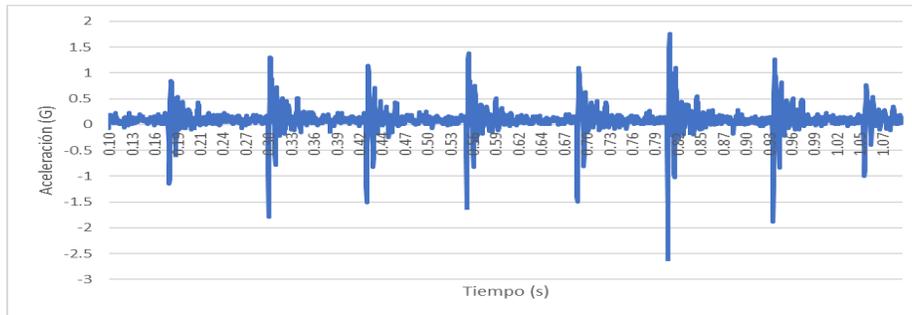


Figura 6 Siete movimientos por segundo.

### 4.2.2 Prueba al golpear cerca del sensor

En la siguiente prueba se dieron golpes a una mesa sobre la que se encontraba el sensor ADXL 345 y al generar ocho golpes (Figura 7) y doce golpes por segundo, con estas pruebas se llega a la certeza que el sensor adquiere los datos correctamente, se recuerda que el algoritmo para el sensor se programó para que el ADXL 345 tenga una sensibilidad en +/-4g por lo cual, si algún movimiento es mayor a esta amplitud el sensor va a saturar la señal y no podrá leer correctamente la información. En la práctica, con el motor, se espera que las vibraciones no excedan los 4g ya que si lo exceden están muy por arriba de los parámetros saludables de severidad de vibración.

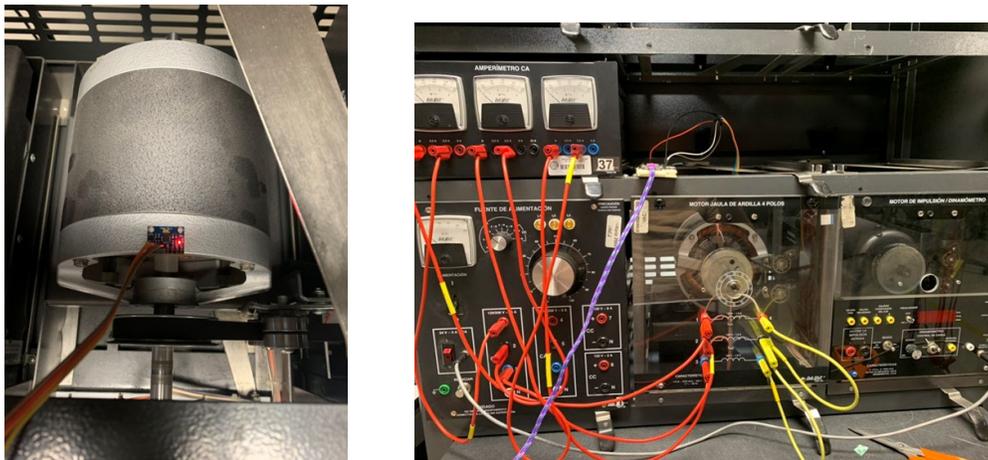


**Figura 7** Ocho golpes por segundo.

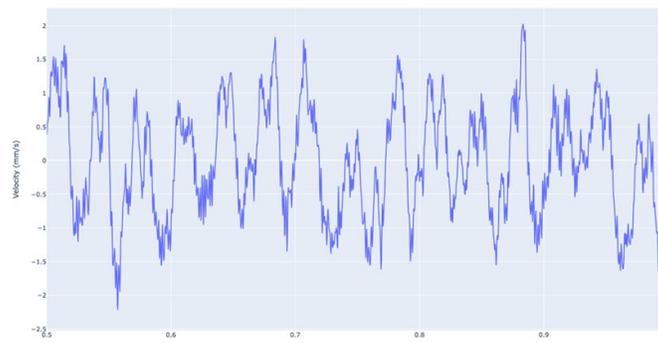
### 4.3 Procesamiento de la señal

#### 4.3.1 Validación de integración de señal

Al procesar los datos de aceleración que adquiere el sensor ADXL 345 ensamblado a un motor de laboratorio (véase Figura 8) que trabaja a 0.175Kw y con una velocidad de 1670 rpm se obtiene en primer lugar la gráfica de la velocidad, la cual se presenta en la Figura 9.



**Figura 8** Motor de laboratorio y sensor ADXL345.



**Figura 9** Grafica de velocidad de motor de laboratorio.

Como se observa la señal de aceleración fue integrada correctamente al ver que es una señal periódica estable, la señal fue filtrada ventaneada y después integrada. A partir de esta señal, el cálculo de su componente RMS se adquiere a continuación y se presenta en la Tabla 1, en esta

se observan 6 diferentes momentos en que se adquirieron datos, se integró la señal y, por último, se calculó el valor RMS para aceleración, así como para velocidad.

Tabla 1 Valores RMS de motor de laboratorio.

Time	RMS (g)	RMS (mm/s)
8:51:40 a.m.	0.089190507	0.81508231
9:04:15 a.m.	0.092945424	0.954761199
9:06:01 a.m.	0.088726155	0.929283963

Con estas validaciones queda calculada la integral de la señal y su posterior cálculo de valores RMS, estos en las últimas pruebas son guías para generar los rangos y límites de severidad de vibración en el motor a analizar en la empresa IMSSA.

#### 4.3.2 Validación del algoritmo para calcular la FFT

Con el fin de validar el algoritmo para calcular la FFT, se adquiere una señal senoidal, proveniente de un generador de señales, por una entrada analógica del microcontrolador ESP32. La Figura 10 muestra el espectro de frecuencia una onda senoidal de 2 Hz, de 100 Hz y 1000 Hz las cuales cobran importancia al ser frecuencias medias que se estarán adquiriendo del motor y por último, una onda senoidal de 1500Hz.

#### Envío de datos de forma inalámbrica. Prueba de distancia LoRa

Se realizaron pruebas para verificar el envío y recepción de datos por medio del protocolo LoRa en la empresa, el conjunto de datos adquiridos se dividieron en un total de 256 paquetes y los datos procesados también se dividieron en otros 256 paquetes más, los cuales se enviaron desde el sistema de adquisición, procesamiento y envío hacia el sistema de recepción, procesamiento y almacenamiento, el envío de datos se realizó a diferentes distancias, las distancias documentadas son 10 m, 50 m, 80 m y 100 m, siendo esta última la distancia en donde se conectó el sistema al servidor para su instalación permanente. Una imagen del sistema receptor de la información se puede apreciar en la Figura 11.

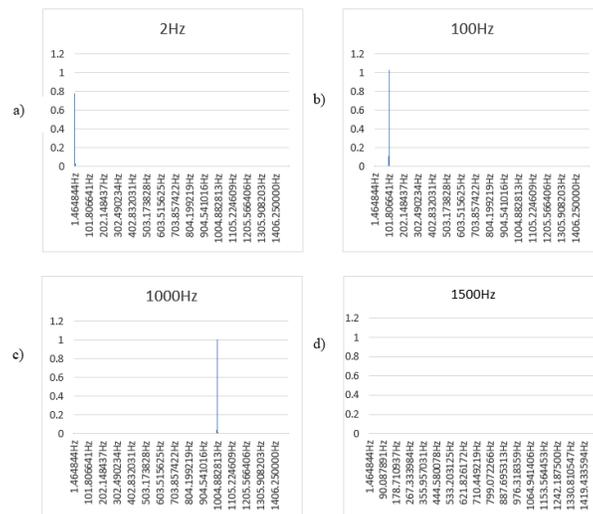


Figura 10. Espectro de frecuencia para señales de 2 Hz, 100 Hz, 1000 Hz y 1500 Hz.



**Figura 11** Sistema receptor LoRa.

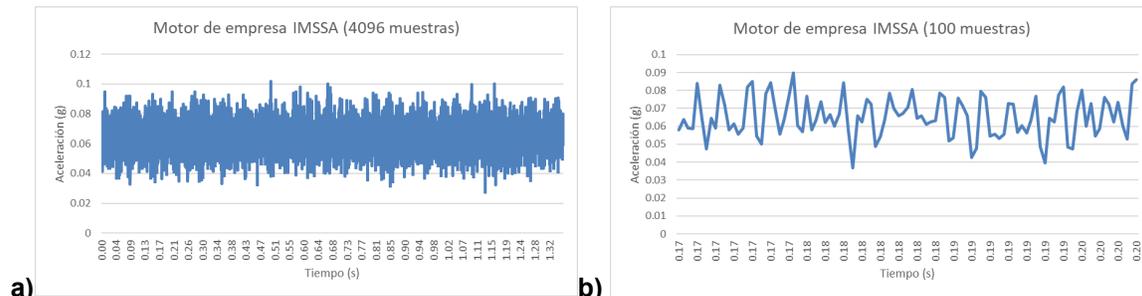
Como resultado de las pruebas de distancia que se realizaron, se obtiene la Tabla 2 en la que se representan los paquetes de adquisición que se recibieron utilizando el protocolo LoRa. Como se puede analizar en la tabla, aun con la distancia que existe entre el sistema que envía y el que recibe, los paquetes que se pierden son relativamente pocos en comparación con la gran cantidad de información que se envía, esto hace que los datos que no llegan al microcontrolador receptor no sean relevantes para los cálculos y posterior análisis de errores. Ya que, aunque se pierdan tres paquetes (el máximo de paquetes que se perdieron en las pruebas) se pueden generar las gráficas correctamente, es decir, la gráfica contiene 4048 muestras en lugar de 4096 debido a la pérdida de datos.

Tabla 2 Número de paquetes recibidos a distancia mediante LoRa.

Distancia	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
10 metros	256	256	256
50 metros	255	255	256
80 metros	256	256	256
100 metros	253	256	255

#### 4.5.1 Resultados de prueba final en motor de laboratorio

Los resultados que se obtuvieron en el motor de laboratorio se pueden visualizar en la Figura 12a) con la gráfica de aceleración en el dominio del tiempo con 4096 muestras adquiridas, en la Figura 12b) se hace un acercamiento al visualizar solo 100 muestras, en estas graficas se observa que la vibración es periódica y tiene una amplitud desde +0.7g hasta -0.5g, aun cuando aún no se obtiene el cálculo de RMS en aceleración y velocidad a primera vista tiene una amplitud saludable lo cual se verifica después del cálculo de los valores RMS de vibración



**Figura 12.** Aceleración en el dominio del tiempo con a) 4096 muestras b) 100 muestras.

La Figura 13, representa el espectro de frecuencias después de ser calculada la FFT en esta figura se observa una de las frecuencias más importantes la cual es 29.29 Hz, esta frecuencia es la velocidad de giro del eje en el motor, a partir de esta frecuencia se puede realizar el análisis de vibraciones en el dominio de la frecuencia ya que los armónicos a esta frecuencia dan información importante para la clasificación futura de fallas.

Por último, en la Tabla 3 se ven los resultados calculados de RMS tanto para aceleración como para vibración según los límites que se establecieron para este motor, el motor cumple con los valores de RMS de un motor en buen estado.

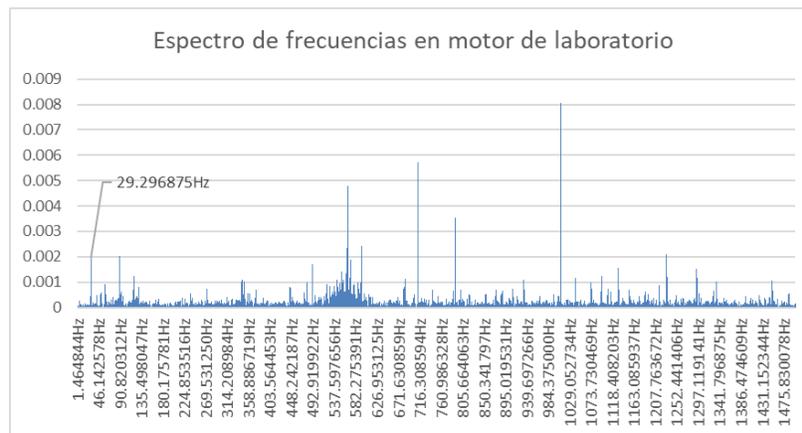


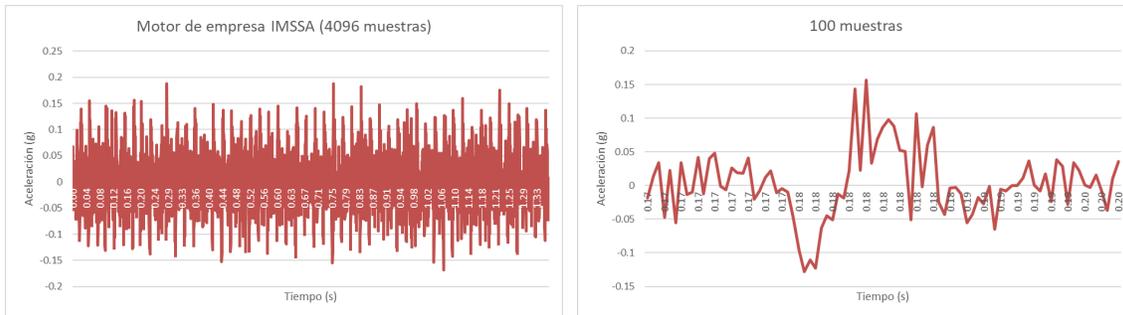
Figura 13, Espectro de frecuencias generado por el motor de laboratorio.

Tabla 3 Valores de RMS en motor de laboratorio.

Time	RMS (g)	RMS (mm/s)	Alerta
8:51:40 a.m.	0.089190507	0.81508231	Excelente Estado
9:04:15 a.m.	0.092945424	0.954761199	Excelente Estado
9:06:01 a.m.	0.088726155	0.929283963	Excelente Estado

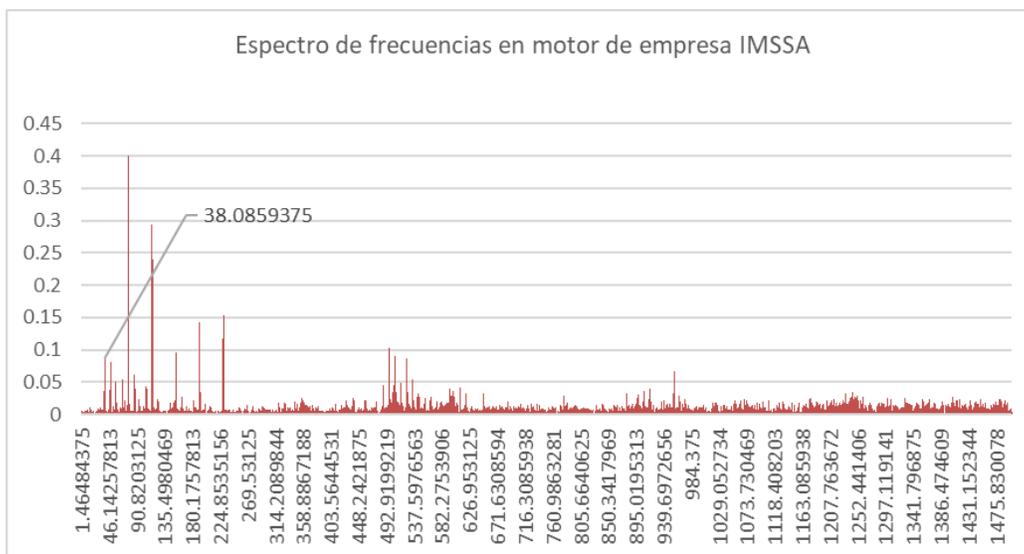
### Resultados de prueba final en motor de empresa IMSSA

Los resultados que se obtuvieron en el motor de la empresa IMSSA se pueden visualizar en la Figura 14 con la gráfica de aceleración en el dominio del tiempo con 4096 muestras adquiridas, en la Figura 4.21 se hace un acercamiento al visualizar solo 100 muestras, en estas graficas se observa que la vibración es periódica y tiene una amplitud desde +0.4g hasta -0.6g, aun cuando aún no se obtiene el cálculo de RMS en aceleración y velocidad a primera vista al igual que con el motor de laboratorio se tiene una amplitud menor a 1g.



**Figura 14** Aceleración en el motor de empresa IMSSA en el dominio del tiempo (100 muestras)

Posteriormente se genera la Figura 15 la cual representa el espectro de frecuencias después de ser calculada la FFT, en esta figura se observa que las frecuencias bajas entre los 30 Hz y 250 Hz tienen la mayor amplitud.



**Figura 15**, Espectro de frecuencias generado por el motor del horno de extrusión en la empresa.

La velocidad de giro del eje en el motor de la empresa IMSSA es muy parecida al motor de laboratorio. La velocidad ronda en los 30 Hz, la frecuencia que se obtiene en el espectro de frecuencia del motor de la empresa IMSSA como la frecuencia de rotación del eje es de 38 Hz, esta frecuencia se utiliza como una base para la posterior detección de fallas en el espectro de frecuencias en motores.

Por último, en la Tabla 4 se ven los resultados calculados de RMS tanto para aceleración como para vibración según los límites que se establecieron para este motor, el motor cumple con los valores de RMS de un motor en buen estado.

**Tabla 4** Valores de RMS en motor de empresa IMSSA.

Time	RMS (g)	RMS (mm/s)	Alerta
9:27:47 a.m.	0.06131714	0.96412398	Excelente Estado
9:29:42 a.m.	0.05234134	0.8455009	Excelente Estado
9:31:44 a.m.	0.05892835	0.8722839	Excelente Estado

Con este procesamiento de datos en sus dos partes, tanto el cálculo de frecuencias como la integración y cálculo del valor RMS en velocidad y aceleración son de mucha utilidad para su posterior análisis y detección de fallas. Este proyecto tiene como delimitación el no detectar fallas en el espectro de frecuencias, aun así, se entrega la información a la empresa IMSSA para que tenga lo necesario para realizar este análisis en un futuro y así puedan clasificar las fallas de dicho motor. Lo que sí es una prioridad es la detección de fallas de acuerdo con el valor RMS de la velocidad y aceleración, las cuales tienen rangos establecidos y respaldados por normatividades ISO como el ISO 2372 y el fabricante ADASH el cual cuenta con muchos años de investigación e implementación de sistemas de detección de fallas en máquinas rotativas que los respaldan.

## **7. Productos generados**

Formación de recursos humanos, estudiante de Ingeniería en Sistemas Digitales y Comunicaciones, se anexa acta de examen de tesis.

Reporte de investigación.

## **8. Conclusiones**

El proyecto lleva un grado de avance del 70% se registra la señal de vibración de motor y se tienen desarrollados los módulos para el registro de la señal de vibración, el procesamiento de la misma, la comunicación LoRa, el receptor recibe y almacena señal de vibración, lo cual cumple las especificaciones del proyecto, sin embargo, debido al retraso en el tiempo de entrega del sensor industrial, no fue posible integrar todos los módulos de software y realizar la pruebas que se hicieron con el sensor ADXL345 que se utilizó para poder avanzar en el proyecto. En estos 7 meses restantes se pretende integrar los módulos y adaptarlos a la nueva placa de desarrollo además de realizar pruebas con varios motores de la empresa.

## **9. Mecanismos de transferencia. (Si aplica)**

## **10. Contribución e impacto del proyecto**

El proyecto tiene un impacto tecnológico, contribuye a automatizar la lectura y registro de vibración de un motor en una empresa local y transmitir los datos de forma inalámbrica a una distancia máxima de 70 m, en espacios contiguos del edificio que pueden estar separados por paredes de concreto escaleras, maquinaria pesada. A fin de mantener un registro de los valores de vibración y establecer patrones o la posible necesidad de mantenimiento predictivo.

## **11. Impacto económico, social y/o ambiental en la región**

Como se menciona en la justificación el proyecto tiene un impacto económico para la empresa pues se busca anticiparse a la falla y generar alertas de mantenimiento predictivo a fin de que el motor que recircula el aire en el horno siempre esté en funcionamiento y en la medida de lo posible evitar los paros de línea.

## Referencias (bibliografía)

- [1] P. Poor, J. Basl, and D. Zenisek, "Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development," Proceedings - IEEE International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering, SCSE 2019, vol. 10, no. 0, pp. 245–253, 2019, doi: 10.23919/SCSE.2019.8842659.
- [2] A. A. Manjare and B. G. Patil, "A Review: Condition Based Techniques and Predictive Maintenance for Motor," Proceedings - International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems, ICAIS 2021, pp. 807–813, 2021, doi: 10.1109/ICAIS50930.2021.9395903.
- [3] R. F. Ribeiro Junior, I. A. dos S. Areias, and G. F. Gomes, "Fault detection and diagnosis using vibration signal analysis in frequency domain for electric motors considering different real fault types," Sensor Review, vol. 41, no. 3, pp. 311–319, 2021, doi: 10.1108/SR-02-2021-0052.
- [4] K. S. Kiangala and Z. Wang, "Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 97, no. 9–12, pp. 3251–3271, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2093-8.
- [5] J. E. M. Morales, "Análisis De Vibraciones En Motores Eléctricos Asíncronos Trifásicos," pp. 32–34, 2009, [Online]. Available: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0158\\_ME.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0158_ME.pdf)
- [6] International Organization for Standardization, "ISO 20816-1:2016 Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration Part 1: General guidelines," 2016.
- [7] International Organization for Standardization, "ISO 2372 Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards," vol. 1, no. 1, 1974.
- [8] ADASH, User's Guide ADASH 4900 Vibrio M. 2020. Accessed: Nov. 09, 2021. [Online]. Available: <https://adash.com/documents/A4900/Adash-A4900-Vibrio-manual.pdf>
- [9] International Organization for Standardization, "ISO 5348 Mechanical vibration and shock — Mechanical mounting of accelerometers," 2021.
- [10] International Organization for Standardization, "ISO 2954 Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery - Requirements for instruments for measuring vibration severity," vol. 2012, 2012.
- [11] Z. Feng and Z. Yufeng, "Research progress of mechanical vibration sensors," Proceedings - 2020 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing, WCMEIM 2020, pp. 412–416, 2020, doi: 10.1109/WCMEIM52463.2020.00093.

## 12. Anexos

## 12.1 Taxonomía de los Roles de Colaborador (con las actividades logradas)

Roles	Definición de los roles	Nombre de él(la) investigador	Figura	Grado de contribución	Actividades logradas durante el proyecto	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto
<p>Responsabilidad de la dirección del proyecto</p> <p>Realización y redacción de la propuesta</p> <p>Desarrollo o diseño de la metodología</p> <p>Recopilación/recolección de datos e información</p>	<p>Coordina y participa en las actividades del proyecto.</p> <p>Contribuir con el diseño de la metodología, modelos a implementar y el sustento teórico, empírico y científico para la aplicabilidad de los instrumentos en la ejecución del proyecto</p>	Lidia Hortencia Rascon Madrigal	Director del Proyecto, Recopilador de datos, Editor de reportes técnicos	- Principal	<p>Participación en todas las actividades del proyecto.</p> <p>En procesos. Análisis en frecuencia de las señales de vibración.</p>	5
<p>Responsabilidad de supervisión</p> <p>Elaboración del análisis formal de la investigación, Preparación, creación y/o presentación de los productos o entregables</p>	<p>Elaborar la planificación de las actividades de la investigación (cronogramas y controles de seguimiento), describe los roles identificados por el director del proyecto y facilita el apoyo constante a todos los roles para conseguir un trabajo integral, coherente y que llegue a buen término.</p>	Jose Manuel Mejia Muñoz	<p>Supervisor del proyecto</p> <p>Analista de Datos</p> <p>Editor de reportes técnicos</p>	- Principal /apoyo	<p>Supervisar á que la base de datos tenga los campos necesarios, para elaborar los reportes ante las auditorias de calidad.</p>	5
<p>Elaboración del análisis formal de la investigación</p>	<p>Aplicar métodos estadísticos, matemáticos, computacionales, teóricos u otras técnicas formales para analizar o sintetizar los datos del estudio. Verifica los</p>	Onofre Amador Morfin Garduño	Analista de datos	-Principal /apoyo	<p>Colaborar en el análisis matemático y la interpretación de los datos de vibración del motor</p>	4

	resultados preliminares de cada etapa del análisis, los experimentos implementados y otros productos comprometidos en el proyecto.				para contrastar con las normas ISO. En proceso	
Desarrollo o diseño de la metodología	Contribuir con el diseño de la metodología, modelos a implementar y el sustento teórico, empírico y científico para la aplicabilidad de los instrumentos en la ejecución del proyecto.	Héctor Manuel Loya Caraveo	Diseñador de la metodología	apoyo	Participa en el diseño de la metodología a en la ejecución del proyecto. En proceso	4

### 12.1.1 Estudiantes participantes en el proyecto

Nombre de estudiante(s)	Matrícula	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto	Actividades logradas en la ejecución del proyecto
Anuar Emmanuel Ramírez Valenzuela	142948	4 hrs	Sensor ADXL345 Comunicación emisor - receptor Pruebas de medida de vibración con el sensor un UACJ y en la empresa.
Rebeca Zapata Armendáriz	168486	4 hrs	Sensor industrial, pruebas de medida de vibración (en proceso).