

**Universidad Tecnológica Nacional**

Proyecto Final

---

Monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en  
motores asíncronos trifásicos

---

*Autores:*

- MARSE, Rodrigo Emanuel
- SCHROEDER, Jonathan Daniel

*Director:*

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos*

*para acceder al título de Ingeniero Electrónico*

*en la*

**Facultad Regional Paraná**



## Declaración de autoría:

Nosotros declaramos que el Proyecto Final “Monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos trifásicos” y el trabajo realizado son propios. Declaramos:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:



MARSE, Rodrigo Emanuel



SCHROEDER, Jonathan Daniel

Fecha: 01/12/2020



## Agradecimientos:

En agradecimiento a nuestras familias que nos apoyaron desde el primer día de la carrera de forma emocional y económica para lograr nuestro objetivo de ser profesionales.

A todas las amistades formadas en este largo camino.

Por último, agradecemos a nuestra casa de estudios por la formación, al cuerpo docente por su paciencia y dedicación, y a todos aquellos que nos han forjado de conocimientos y valores.

MARSE, Rodrigo Emanuel

SCHROEDER, Jonathan Daniel



Universidad Tecnológica Nacional

*Abstract*

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

**Monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores  
asíncronos trifásicos**

MARSE, Rodrigo Emanuel

SCHROEDER, Jonathan Daniel

**Abstract:**

A condition-based monitoring system use to three-phase asynchronous motors was developed. The system is designed to machines that are part of an industrial environment, for allowing maintenance planning, avoiding unplanned machine downtime and reducing costs.

This system is made up of three parts, the sensor nodes, the Data-Logger and the control and analysis software.

The sensor nodes incorporate a vibration sensor LIS3DH (accelerometer) and a temperature sensor MLX90614, whose acquired data is processed by the ATmega328 microcontroller and sent to the Data-Logger by RF communication, using the integrated circuit nRF24L01+.

The Data-Logger incorporates 3 current sensors, the signals of which are conditioned by an AD623 instrumentation amplifier and converted into digital form by the STM32F103 microcontroller. Furthermore, the Data-Logger receives the data from the nodes and, added to the current data, is stored in a non-volatile memory SD. Communication with the analysis software is carried out through an Ethernet LAN connection, using the UDP protocol to send

and receive packets. For Ethernet communication, a module incorporating the W5500 integrated circuit is used.

The analysis software was developed in the App Designer environment, where processing is applied to the signals captured by the sensors, both in the time and frequency domain, allowing the status of the motor to be diagnosed.

A device with the ability to connect up to 6 sensor nodes was obtained, within a radius of approximately 40 [m] from the Data-Logger. The nodes, powered by battery, have an autonomy of around 8 years. The memory capacity of the Data-Logger allows data logging for 30 years.

**Keywords:**

Predictive maintenance. Data-Logger. Sensor. Current. Vibration. Temperature



## **Resumen:**

Se desarrolló un sistema de monitoreo predictivo aplicado a motores asíncronos trifásicos. El sistema está pensado para ser aplicado a máquinas que forman parte de un entorno industrial, con el objetivo de permitir planificar las tareas de mantenimiento, evitar las detenciones imprevistas y reducir costos.

Este sistema está compuesto por tres partes, los nodos sensores, el Data-Logger y el software de control y análisis.

Los nodos sensores incorporan un sensor de vibración LIS3DH (acelerómetro) y un sensor de temperatura MLX90614, cuyos datos adquiridos son procesados por el microcontrolador ATmega328P y enviados hacia el Data-Logger por comunicación RF, utilizando el circuito integrado nRF24L01+.

El Data-Logger incorpora 3 sensores de corriente, cuyas señales son acondicionadas por un amplificador de instrumentación AD623 y convertidas en forma digital por el microcontrolador STM32F103. Además, el Data-Logger recibe los datos de los nodos y, junto con los datos de corriente, son almacenados en una memoria no volátil SD. La comunicación con el software de análisis, se realiza mediante una conexión Ethernet LAN, utilizando el protocolo UDP para el envío y recepción de paquetes entre ambos. Para ello, se utiliza un módulo que incorpora el circuito integrado W5500.

El software de análisis fue desarrollado en el entorno App Designer, donde se aplican procesamientos a las señales capturadas por los sensores, tanto en el dominio temporal como frecuencial, permitiendo diagnosticar el estado del motor.

Se obtuvo un equipo con la capacidad de conectar hasta 6 nodos sensores, en un radio de aproximadamente 40 [m] del Data-Logger. Los nodos, energizados por batería, tiene una autonomía de alrededor de 8 años. La capacidad de memoria del Data-Logger permite registrar datos durante 30 años.

## **Palabras Clave:**

Mantenimiento predictivo. Data-Logger. Sensores. Corriente. Vibración. Temperatura.

*Reconocimientos:*

# Índice:

1. Capítulo 1: Introducción.....	24
1.1. Descripción .....	24
1.2. Fundamentación .....	24
1.3. Diagrama en bloques.....	25
1.4. Target.....	26
1.5. Pruebas de concepto .....	26
1.6. Pruebas de producto. Competencia.....	26
1.7. Análisis de recursos .....	26
2. Capítulo 2: Marco teórico.....	27
2.1. Motores asíncronos trifásicos.....	27
2.1.1. Clasificación según tipo de rotor.....	27
2.1.1.1. Motor asíncrono con rotor jaula de ardilla .....	27
2.1.1.2. Motor asíncrono con rotor bobinado .....	28
2.2. Fallas en motores asíncronos trifásicos .....	29
2.2.1. Causas de fallas en el estator .....	29
2.2.1.1. Causas térmicas .....	29
2.2.1.2. Causas eléctricas.....	30
2.2.1.3. Causas mecánicas.....	30
2.2.2. Causas de fallas en el rotor .....	31
2.2.2.1. Causas térmicas .....	31
2.2.2.2. Causas magnéticas.....	31
2.2.2.3. Causas dinámicas.....	31
2.2.2.4. Causas mecánicas.....	31
2.2.3. Métodos de detección de fallas .....	31
2.3. Vibraciones en motores asíncronos trifásicos .....	33
2.3.1. Vibraciones producidas por desbalances .....	33
2.3.2. Vibraciones producidas por desalineamiento .....	33
2.3.3. Vibraciones por falta de excentricidad .....	34
2.3.4. Vibraciones por rodamientos defectuosos.....	36
2.3.5. Vibraciones por bujes defectuosos .....	38
2.3.6. Vibraciones debidas a partes flojas .....	39

2.3.7.	Vibraciones debidas a roturas de barras en el rotor .....	39
2.3.8.	Vibraciones debidas a fallas electromagnéticas .....	39
2.3.9.	Clasificación para la evaluación vibratoria según la Norma ISO 10816...40	
2.3.9.1.	Clasificación por grupos ISO 10816-1.....	40
2.3.10.	Acelerómetros comerciales .....	42
2.3.10.1.	Comparación entre los tipos de acelerómetros .....	43
2.4.	Análisis espectral de corrientes del estator (MCSA) .....	44
2.4.1.	Cortocircuito en el devanado del estator .....	44
2.4.2.	Detección de barras rotas en el rotor de un motor de inducción .....	44
2.4.3.	Detección de excentricidad del rotor .....	45
2.4.4.	Fallo en cojinetes.....	45
2.4.5.	Valores permisibles.....	46
2.4.6.	Métodos de medición de corriente alterna.....	46
2.4.6.1.	Resistencia shunt.....	46
2.4.6.2.	Sensores de efecto Hall .....	47
2.4.6.3.	Transformadores de corriente .....	47
2.4.6.4.	Bobina Rogowski .....	48
2.5.	Temperatura de operación .....	50
2.5.1.	Sensores de temperatura .....	51
2.6.	Métodos para el diagnóstico de fallas .....	53
2.6.1.	Caracterización de las señales en el dominio temporal.....	53
2.6.1.1.	Desplazamiento, velocidad y aceleración de las vibraciones.....	53
2.6.2.	Caracterización de las señales en el dominio frecuencial .....	54
2.6.2.1.	Transformada de Fourier.....	54
2.6.2.2.	Transformada de Wavelet .....	54
3.	Capítulo 3: Desarrollo .....	55
3.1.	Nodos sensores .....	55
3.1.1.	Batería.....	56
3.1.2.	Regulador de voltaje.....	57
3.1.3.	Microcontrolador.....	57
3.1.4.	Real time clock (RTC).....	58
3.1.5.	Sensor de vibraciones .....	59
3.1.6.	Sensor de temperatura.....	61
3.1.7.	Módulo de comunicaciones por RF .....	61

3.1.7.1.	Funcionalidad Enhanced ShockBurst.....	62
3.1.8.	Placa de circuito impreso (PCB).....	64
3.2.	Data-Logger Gateway .....	66
3.2.1.	Fuente de alimentación. Regulador de voltaje.....	67
3.2.2.	Microcontrolador .....	68
3.2.3.	Módulo de comunicaciones por RF .....	70
3.2.4.	Sensor de corriente .....	71
3.2.4.1.	Circuito acondicionador de señal .....	72
3.2.4.4.	Memoria no volátil.....	76
3.2.5.	Módulo de comunicaciones Ethernet.....	79
3.2.5.1.	Configuración W5500 .....	80
3.2.5.1.1.	Configuración básica .....	80
3.2.5.1.2.	Configuración de información de red .....	80
3.2.5.1.3.	Establecer información de memoria de socket .....	81
3.2.5.1.4.	Transmisión de datos.....	81
3.2.5.1.5.	Unicast y Broadcast.....	82
3.2.5.1.6.	Proceso de recepción .....	82
3.2.5.1.7.	Proceso de envío .....	82
3.2.5.1.8.	Cierre del puerto .....	82
3.2.6.	Placa de circuito impreso (PCB).....	83
3.3.	Software de análisis: MASH Soft .....	84
3.3.1.	Selección de dispositivo: Nodo.....	87
3.3.2.	Selección de dispositivo: Sensor de corriente .....	90
3.3.3.	Funciones de MATLAB utilizadas .....	92
4.	Capítulo 4: Resultados .....	93
4.1.	Puesta en funcionamiento.....	94
4.2.	Características técnicas del Nodo sensor .....	95
4.3.	Características técnicas del Data-Logger .....	95
4.4.	Características del software MASH Soft .....	96
5.	Capítulo 5: Análisis de Costos .....	97
5.1.	Costos de materiales del Data-Logger.....	97
5.2.	Costos de materiales del Nodo sensor .....	97
5.3.	Costos totales .....	98
6.	Capítulo 6: Discusión y Conclusión. ....	99

6.1. Resultados obtenidos.....	99
6.1.1. Seguridad operativa.....	99
6.2. Futuras mejoras .....	100
7. Capítulo 7: Literatura Citada.....	101

## Lista de Figuras:

Figura 1.1 – Mantenimiento preventivo y predictivo .....	24
Figura 1.2 – Evolución de la condición del motor.....	25
Figura 1.3 – Diagrama en bloques del sistema .....	25
Figura 2.1 – Partes motor asíncrono trifásico .....	27
Figura 2.2 – Rotor jaula de ardilla .....	28
Figura 2.3 – Rotor bobinado .....	28
Figura 2.4 – Porcentaje de fallas .....	29
Figura 2.5 – Espectro de desbalance.....	33
Figura 2.6 – Desalineación paralela.....	34
Figura 2.7 – Desalineación angular.....	34
Figura 2.8 – Vibración por excentricidad.....	35
Figura 2.9 – Espectro excentricidad estática .....	36
Figura 2.10 – Espectro excentricidad dinámica .....	36
Figura 2.11 – Espectro falla en rodamientos.....	38
Figura 2.12 – Espectro de vibración debido a remolinos en el aceite .....	38
Figura 2.13 – Vibración por partes flojas.....	39
Figura 2.14 – ISO 10816-1.....	40
Figura 2.15 – Medición mediante resistencia shunt .....	47
Figura 2.16 – Medición mediante sensor de efecto hall.....	47
Figura 2.17 – Medición mediante resistencia shunt .....	48
Figura 2.18 – Medición mediante bobina Rogowski.....	48
Figura 2.19 – Incremento de temperatura permisible.....	50
Figura 2.20 – Desplazamiento, velocidad y aceleración de las vibraciones.....	53
Figura 3.1 – Bloques constitutivos del sistema .....	55
Figura 3.2 – Diagrama de bloques del nodo sensor .....	55
Figura 3.3 – Batería de litio Saft LS - Perfiles de descarga.....	56
Figura 3.4 – Circuito para lectura de la tensión de la batería.....	57
Figura 3.5 – Esquema de conexiones del DS3231 .....	58
Figura 3.6 – Modulo acelerómetro LIS3DH.....	59
Figura 3.7 – Sensor MLX90614 .....	61

Figura 3.8 – Modulo con nRF24L01+.....	62
Figura 3.9 – Paquete de RF.....	62
Figura 3.10 – Red con NRF24L01 .....	63
Figura 3.11 – PCB Nodo Sensor.....	65
Figura 3.12 – Diagrama de bloques del Data-Logger Gateway .....	66
Figura 3.13 – Fuente de alimentación.....	67
Figura 3.14 – Circuito de conexión del MAX1044.....	68
Figura 3.15 – Placa de desarrollo con microcontrolador STM32F103C8.....	68
Figura 3.16 – STM32F103 -Esquema de fuentes de alimentación .....	70
Figura 3.17 – Sensor de corriente.....	71
Figura 3.18 – Conexión de los sensores de corriente .....	72
Figura 3.19 – Error introducido por la resistencia de carga.....	72
Figura 3.20 – Circuito acondicionador de señal CT .....	74
Figura 3.21 – Circuito acondicionador de señal CT .....	74
Figura 3.22 – Filtro anti-aliasing .....	75
Figura 3.23 – Respuesta en frecuencia del filtro anti-aliasing.....	76
Figura 3.24 – Pinout de una Memoria microSD .....	77
Figura 3.25 – Memoria microSD .....	77
Figura 3.26 – Módulo ethernet.....	79
Figura 3.27 – Diagrama en bloques W5500.....	80
Figura 3.28 – Diagrama de flujo de comunicación UDP.....	81
Figura 3.29 – Estructura de datos UDP .....	82
Figura 3.30 – PCB Data-Logger.....	83
Figura 3.31 – Software de análisis.....	84
Figura 3.32 – Configuración: Sensores de vibración.....	85
Figura 3.33 – Configuración: Sensores de corriente .....	85
Figura 3.34 – Configuración: Comunicación .....	86
Figura 3.35 – Estado del sistema.....	86
Figura 3.36 – Recibir datos registrados .....	87
Figura 3.37 – Visualización de datos de temperatura .....	87
Figura 3.38 – Diagnostico según ISO 10816 .....	88
Figura 3.39 – Diagnostico según ISO 10816 .....	88
Figura 3.40 – Análisis temporal de vibraciones.....	89



Figura 3.41 – Herramientas para la visualización de graficas.....	89
Figura 3.42 – Análisis frecuencial de vibraciones .....	90
Figura 3.43 – Análisis temporal de corriente.....	91
Figura 3.44 – Análisis frecuencial de corriente .....	91
Figura 3.45 – Análisis frecuencial de corriente .....	92
Figura 4.1 – Equipo MASH: Nodo y Data-Logger .....	93
Figura 4.2 – Montaje de los nodos sensores .....	94

## Lista de Tablas

Tabla 2.1 – Comparación de diferentes métodos de detección de fallas .....	32
Tabla 2.2 – Características de diferentes tipos de acelerómetros .....	43
Tabla 2.3 – Diagnostico en función de la diferencia de amplitud .....	46
Tabla 2.4 – Características de diferentes tipos de sensores de corriente .....	49
Tabla 2.5 – Clases de aislamiento .....	50
Tabla 2.6 – Temperatura máxima de carcasa para distintas clases de aislamiento ...	51
Tabla 2.7 – Características de los sensores de temperatura .....	52
Tabla 3.1 – Registro CTRL_REG1 .....	60
Tabla 3.2 – Registro CTRL_REG4 .....	60
Tabla 3.3 – Registro CTRL_REG3 .....	60
Tabla 3.4 – Organización de datos en memoria SD .....	78
Tabla 5.1 – Costo de materiales: DataLogger Gateway .....	97
Tabla 5.2 – Costo de materiales: Nodo .....	98



# Lista de Abreviaciones

CBM	Condition Based Monitoring
RF	Radio Frecuencia
MCSA	Motor Current Signature Analysis
RPM	Revoluciones por minuto
RMS	Root Mean Square
CC	Corriente Continua
CA	Corriente Alterna
MEMS	Microelectromechanical Systems
DC	Direct Current
PZT	Lead Zirconate Titanate
ADC	Analog Digital Converter
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
RTD	Resistance Temperature Detector
IR	Infrared Radiation
FFT	Fast Fourier Transform
SPI	Serial Peripheral Interface
TX	Transmisor
RX	Receptor
SD	Secure Digital
UDP	User Datagram Protocol
DMA	Direct Memory Access
SNR	Signal to Noise Ratio
CMRR	Common Mode Rejection Ratio

## Lista de Símbolos

[V]	Unidad Volt
[Hz]	Unidad Hertz
[W]	Unidad Watt
[°C]	Unidad Grado Celsius
[A]	Unidad Amper
[F]	Unidad Faradio
[s]	Unidad Segundos
[Ω]	Unidad Ohm

**Dedicado a:**

Nuestras familias y amigos por el apoyo continuo.



# Capítulo 1: Introducción

## 1.1. Descripción

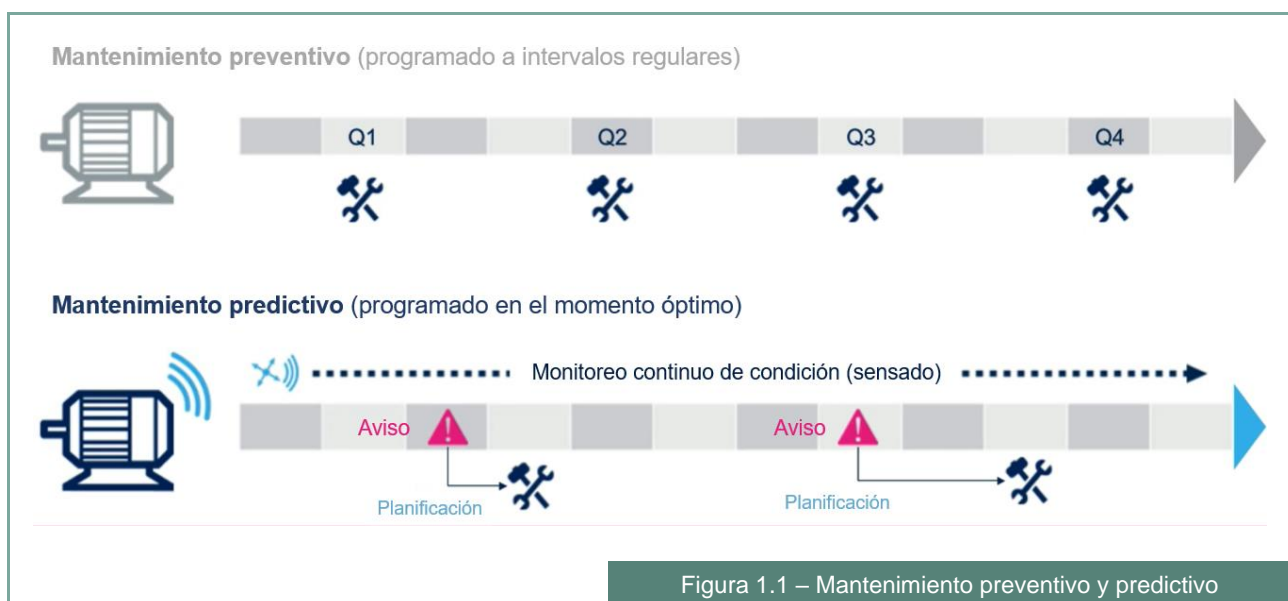
La temática del proyecto consiste en la implementación de un sistema de monitoreo basado en condición (Condition Based Monitoring, CBM), que es un tipo de mantenimiento predictivo que involucra el uso de sensores para determinar el estado de una máquina a lo largo del tiempo, mientras se encuentra en funcionamiento. Los datos recopilados son utilizados para establecer tendencias, predecir fallas y calcular la vida útil de la máquina.

El sistema propuesto, busca predecir fallas severas en máquinas eléctricas que utilicen motores asíncronos trifásicos como medio principal de accionamiento. De esta manera, no solo se limita a detectar fallas eléctricas producidas en el motor (rotura de barras y espiras del estator en cortocircuito), sino también en los elementos mecánicos asociados al mismo (rodamientos, engranajes, acoples, desbalance, desequilibrio, excentricidades, entre otros).

Como funcionalidad adicional, el sistema permite determinar la influencia de la utilización de un variador de velocidad en la vibración mecánica del motor. Los variadores de velocidad generan armónicos de corriente, cuya interacción con el flujo pueden resultar en fuerzas parasitas actuando sobre el motor y ocasionando vibraciones mecánicas, las cuales pueden resultar severas si son amplificadas por resonancias mecánicas en el motor o en la máquina accionada.

## 1.2. Fundamentación

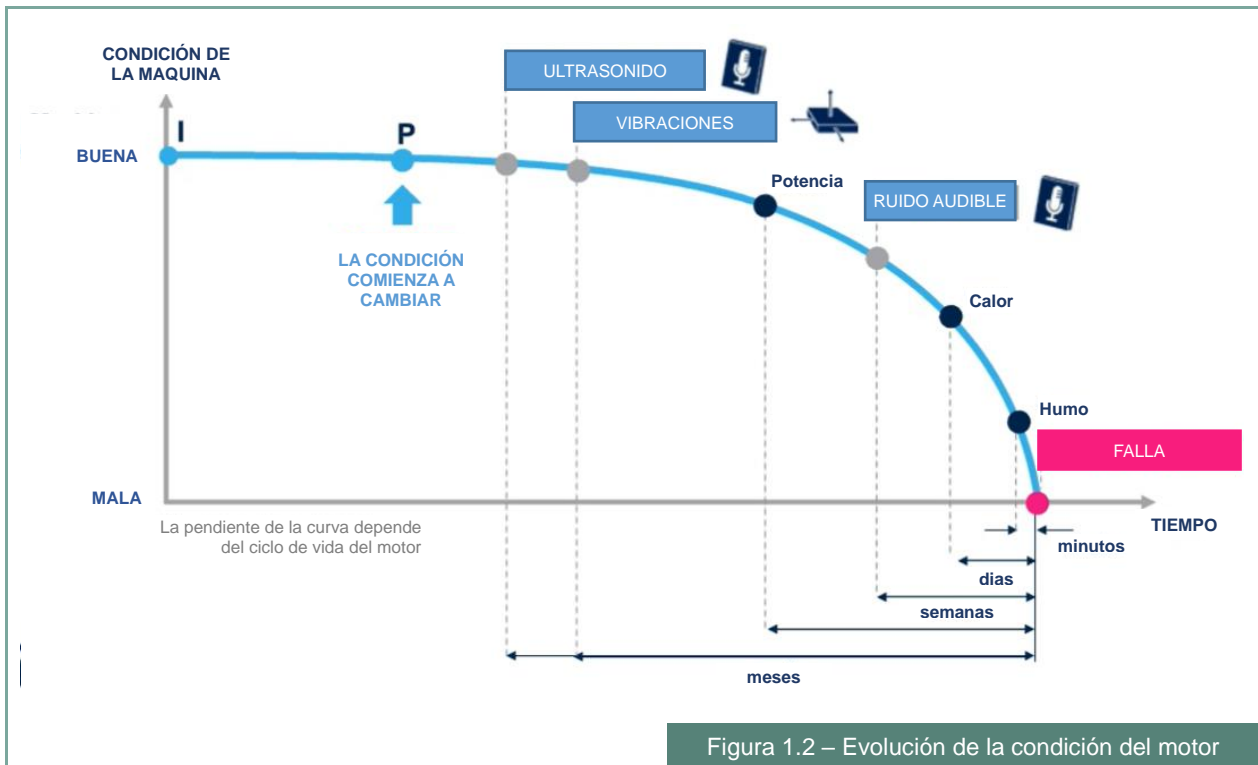
Los motores de inducción son las máquinas eléctricas más populares en la industria, por lo que del buen desempeño de los mismos depende el éxito de las operaciones dentro de un proceso industrial. El principal objetivo es permitir planificar las tareas de mantenimiento y evitar las detenciones imprevistas.



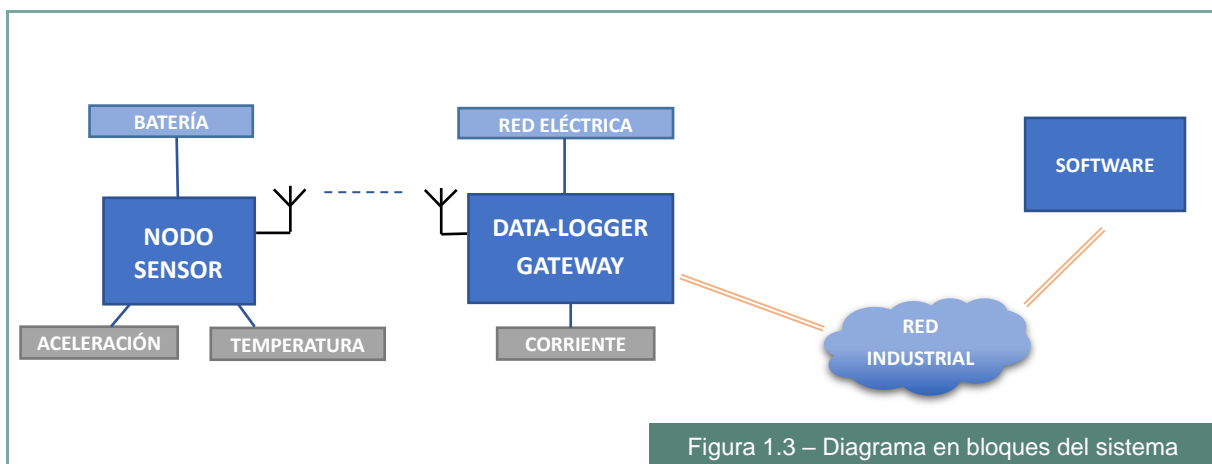


Entre las ventajas que posee este tipo de mantenimiento, mencionamos:

- No interrumpe el funcionamiento de la máquina, ya que se ejecuta mientras la misma está en servicio.
- Garantiza la confiabilidad de la máquina y la seguridad del trabajador.
- Permite reducir las tasas de fallas y los tiempos de inactividad no programados.
- Tiende a ser menos costoso que el mantenimiento preventivo, dado que las actividades de mantenimiento se programan con anticipación y solo se realizan cuando los datos muestran que el rendimiento está disminuyendo o que es probable que haya una falla.



### 1.3. Diagrama en bloques



## **1.4. Target**

El target del proyecto comprende todas aquellas industrias que cuenten con motores asíncronos de gran potencia instalados en su planta y, cuya continuidad de funcionamiento es crítica para el proceso productivo y la obtención de beneficios económicos. Mediante la instalación del equipo, se lograría programar una parada del motor para solucionar el problema antes de que genere una detención.

También, el equipo podría resultar útil para aquellas empresas que presten el servicio de mantenimiento predictivo o análisis de vibraciones.

## **1.5. Pruebas de concepto**

Un sistema de monitoreo de vibraciones es sumamente importante, ya que los elementos de un motor pierden sus propiedades físicas y se degradan con el tiempo, siendo así posible que se produzcan daños mecánicos que puedan llevar a su detención o rotura, poniendo en riesgo la producción de una empresa o la seguridad de los operarios. Esto implica el poder detectar anomalías en el funcionamiento del mismo, con el fin de planificar las medidas necesarias para corregirlas.

## **1.6. Pruebas de producto. Competencia**

Actualmente, en el mercado nacional hay empresas que ofrecen un servicio de mantenimiento predictivo mediante el análisis de vibraciones, como Semapi o Vibromax. Sin embargo, no cuentan con un sistema de monitoreo continuo, si no que el análisis es realizado por trabajadores de la empresa que realizan visitas programadas para la toma de mediciones. Existe otra empresa nacional llamada Univibro, la cual comercializa sistemas de monitoreo continuo de vibraciones. Dicho sistema, analiza solamente los valores eficaces y pico de las vibraciones y los compara con umbrales configurados por el usuario.

Además del análisis de vibraciones, se prevé la medición de corriente y temperatura de carcasa. De esta manera, se hará un análisis frecuencial de las vibraciones y corriente medida, lo que nos permitirá contar con la información necesaria para determinar la causa "más probable" que afecta el funcionamiento del motor.

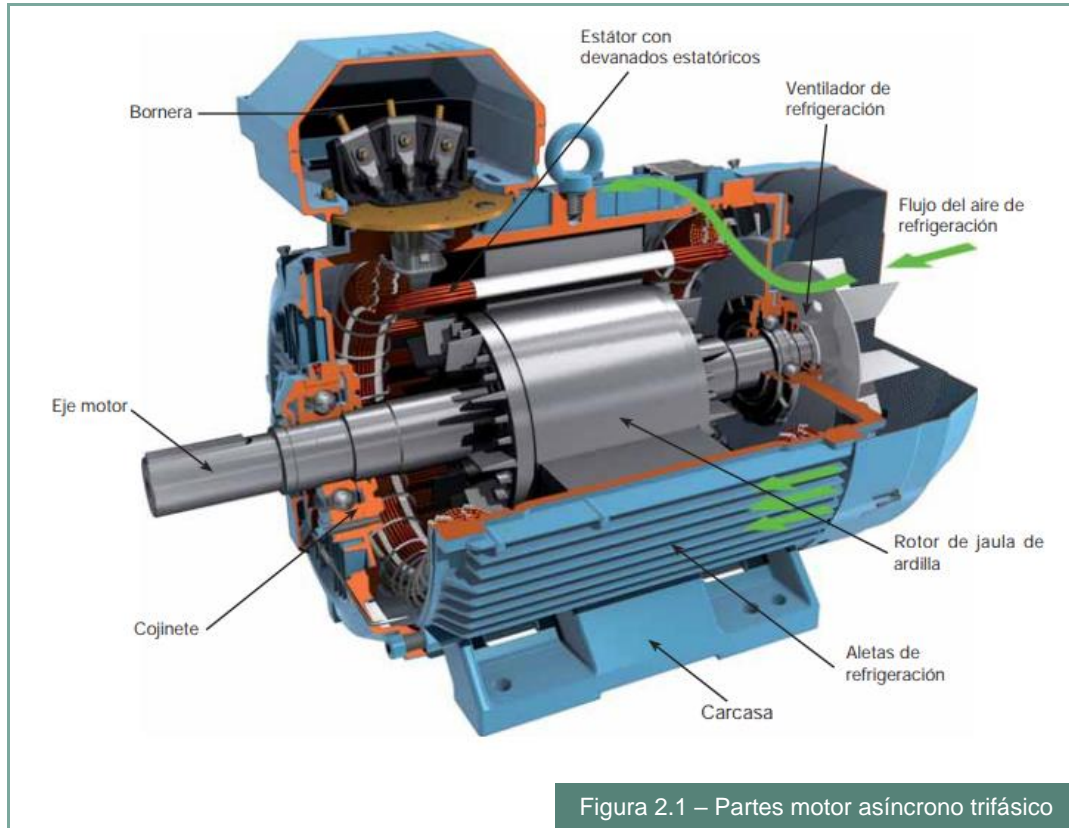
## **1.7. Análisis de recursos**

Los recursos necesarios para la realización del proyecto se dividen en partes; una sería el tiempo que tomara realizar el proyecto, esto es, desarrollarlo y realizando pruebas en un banco de prueba. En cuanto al apartado económico tenemos la parte de hardware, la cual constara de los distintos elementos electrónicos a utilizar los cuales serán los sensores, microprocesadores, líneas de transmisión, PC's para el monitoreo, etc. Por otra parte, tenemos los recursos humanos, para la instalación y monitoreo del sistema de sensado.

## Capítulo 2: Marco teórico

### 2.1. Motores asíncronos trifásicos

Para comprender mejor cómo está estructurado un motor asíncrono trifásico, en la Figura 2.1 podemos apreciar las partes que lo comprenden.



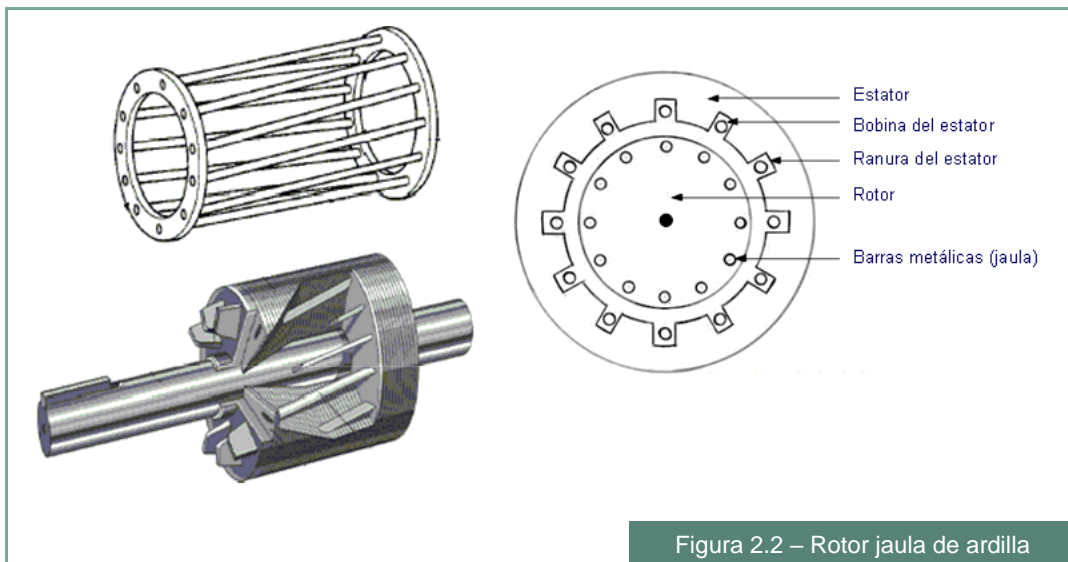
#### 2.1.1. Clasificación según tipo de rotor

Los motores asíncronos trifásicos, se clasifican de acuerdo con las características constructivas del rotor.

- Rotor de jaula de ardilla
- Rotor bobinado

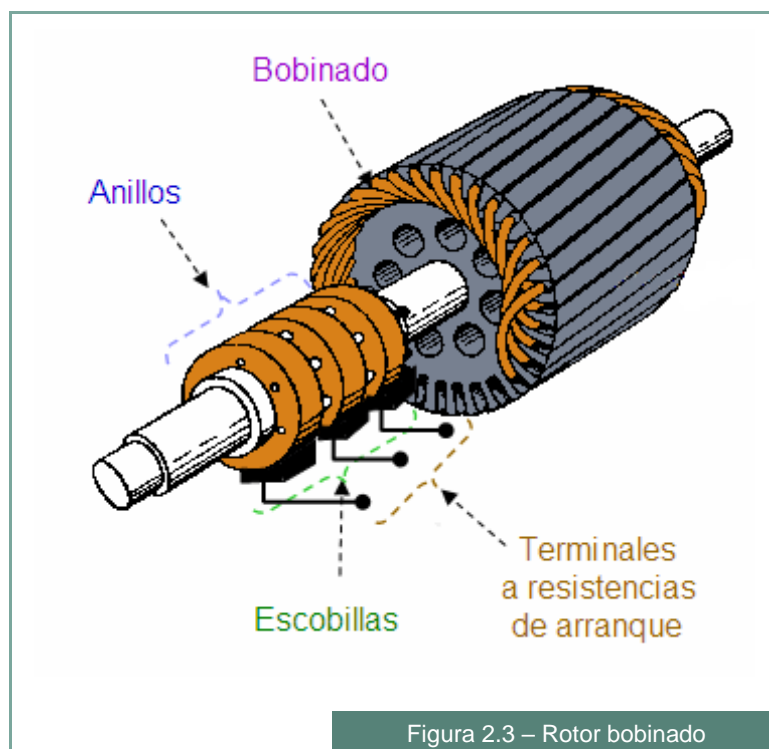
##### 2.1.1.1. Motor asíncrono con rotor jaula de ardilla

El motor de rotor jaula de ardilla, también llamado de rotor en cortocircuito, es el más sencillo y el más utilizado actualmente. El núcleo del rotor está construido por un conjunto de chapas laminadas de acero al silicio, en cuyo interior se disponen unas barras, generalmente de aluminio moldeado a presión.



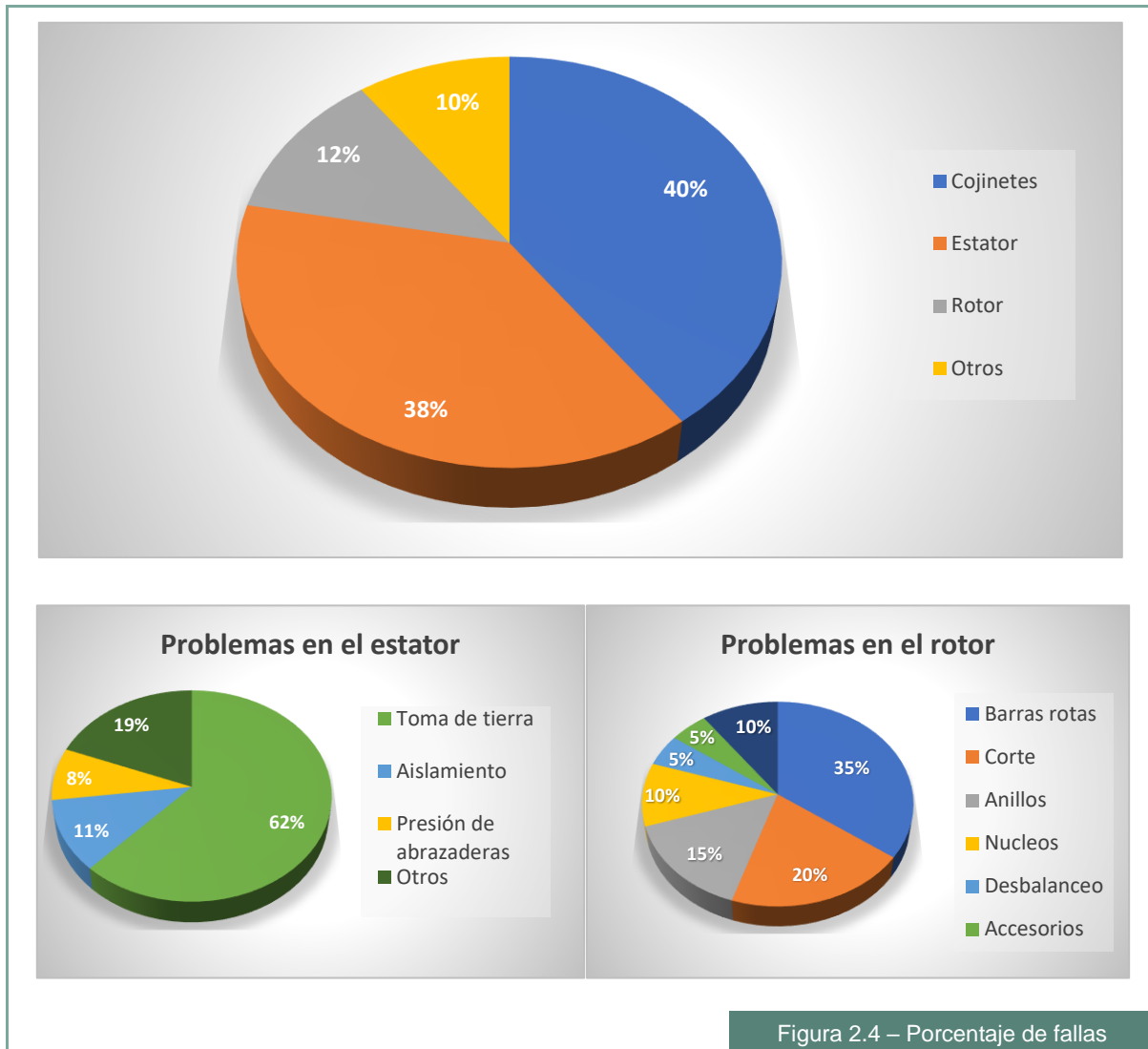
### 2.1.1.2. Motor asíncrono con rotor bobinado

Son motores asíncronos con un devanado trifásico de cobre dispuesto en las ranuras de rotor, que va conectado a tres anillos metálicos por uno de sus extremos, en tanto que, por el otro lado se conectan en estrella.



## 2.2. Fallas en motores asíncronos trifásicos

Un motor de inducción es un sistema electromecánico, por lo que pueden presentarse fallas de naturaleza eléctrica y mecánica. De acuerdo con estadísticas de fallas en máquinas, se ha reportado el porcentaje de fallas de acuerdo con el elemento constitutivo del motor en el que ocurre la falla, tal como se observa en la Figura 2.4.



Las fallas más comunes en una máquina rotativa se presentan en los rodamientos, en el rotor y en el propio estator.

### 2.2.1. Causas de fallas en el estator

#### 2.2.1.1. Causas térmicas

- **Variación de tensión:** variaciones de tensión afectan la performance del motor y la temperatura de los bobinados. Los motores suelen tener una tolerancia de  $\pm 10\%$  en la tensión de suministro.
- **Tensión de fase desbalanceada:** un pequeño desbalanceo de fase causará un aumento de temperatura en los bobinados del estator.

- **Arranques cíclicos:** si el motor es sometido a sucesivos arranques en un corto período de tiempo, la temperatura de los bobinados aumentará rápidamente debido a las altas corrientes de arranque.
- **Sobrecarga:** muchos motores de inducción son fabricados con una cierta holgura en la carga máxima de operación en régimen continuo, caracterizado como factor de servicio. La utilización del factor de servicio implica una vida útil del motor menor a aquella en que el motor se encuentre operando con carga nominal.
- **Obstrucción del sistema de ventilación:** el calor generado en el rotor y estator se disipa al exterior por medio de un sistema de ventilación, el cual, si por alguna circunstancia se encontrara obstruido o dañado, causaría un sobrecalentamiento en los bobinados del estator.

#### 2.2.1.2. Causas eléctricas

- **Dieléctrico:** existe una relación entre la vida del aislante del bobinado y la sobretensión aplicada. Esta sobretensión puede causar cortocircuitos en el bobinado de 3 formas: fase – fase, espira – espira, espira-tierra.
- **Efecto corona:** el efecto corona es una descarga localizada resultante de la ionización gaseosa en el sistema de aislamiento cuando la tensión excede un valor crítico. Puede llegar a ser un problema serio particularmente en bobinados que operen a tensión superior a 5[kV]
- **Sobretensiones de corta duración:** condiciones de sobretensión ocurren con cierta frecuencia durante la utilización de motores eléctricos, dando como resultado la reducción de la vida útil del bobinado y pudiendo ocasionar fallas prematuras. Oscilaciones de corriente y sobretensión normalmente dañan la aislación de las espiras del estator pudiendo esto ocasionar cortocircuitos entre espiras.

#### 2.2.1.3. Causas mecánicas

- **Movimiento de espiras:** el paso de corriente por los bobinados del estator produce esfuerzos directamente proporcionales al cuadrado de la corriente. Estos esfuerzos alcanzan su máximo valor en el arranque del motor, ocasionando vibraciones en las espiras de los bobinados. Esta vibración provoca un movimiento relativo entre las espiras, el cual se acentúa más en las cabezas de bobinas, pudiendo ocasionar cortocircuitos. Cualquier vibración excesiva también puede provocar daños en los rodamientos del motor.
- **Contacto entre estator y rotor:** las razones más comunes que conducen al contacto entre el rotor y el estator son: fallas en los rodamientos, deflexión del eje, desalineamiento entre rotor y estator.

## 2.2.2. Causas de fallas en el rotor

### 2.2.2.1. Causas térmicas

- **Sobrecarga térmica:** puede ocurrir durante la partida, régimen permanente o en condiciones de rotor bloqueado, siendo esta última la condición responsable por lo mayores daños en el rotor.
- **Desbalance térmico:** puede tener su origen ya en el proceso de fabricación del rotor o puede ocurrir debido a condiciones de operación que traspasen los límites de trabajo de este.

### 2.2.2.2. Causas magnéticas

- **Efecto electromagnético:** Las fuerzas electromagnéticas son proporcionales al cuadrado de la corriente, siendo unidireccionales y tienden a dislocar las barras produciendo una deflexión en las mismas. El mayor esfuerzo sobre las barras ocurre durante el arranque del motor, debido a las altas corrientes generadas.
- **Atracción electromagnética desbalanceada:** Idealmente el rotor se encuentra centrado y las fuerzas electromagnéticas balanceadas en direcciones opuestas, sin causar deflexión en el rotor. En la práctica, el rotor no se encuentra perfectamente centrado, ya que factores como el peso propio del rotor, desgaste en los rodamientos y alineación del motor influyen en el centrado del mismo. El desbalance electromagnético es un problema que puede llevar a la flexión del rotor, pudiendo provocar que entren en contacto el rotor con el núcleo del motor o incluso con los mismos bobinados.

### 2.2.2.3. Causas dinámicas

La mayoría de las solicitaciones dinámicas ocurren por procedimientos de operación del motor que obligan al mismo a sobrepasar sus límites operativos de diseño, como por ejemplo torques excesivos en el eje o sobre-velocidades.

### 2.2.2.4. Causas mecánicas

Algunas de las causas más comunes de fallas mecánicas en el rotor son el desprendimiento de chapas o el incorrecto ajuste del eje del rotor. En general los fallos en máquinas eléctricas se encuentran dominados por fallos en los rodamientos y en las bobinas del estator.

## 2.2.3. Métodos de detección de fallas

Existen diferentes métodos invasivos y no invasivos para la detección de fallas utilizando técnicas de análisis de datos de origen eléctrico, mecánico o químico, entre los cuales se pueden resaltar los siguientes: análisis de vibraciones, análisis de temperatura, estimación de parámetros electromagnéticos del motor, análisis de partículas de aceite, análisis de señal de corriente del motor (MCSA).

En la siguiente tabla se puede observar una comparación entre los principales métodos de detección de fallos, indicando las fallas que los mismos pueden detectar.

Método	Cortocircuito en estator	Rotura de barras	Excentricidades	Rodamientos
<b>Vibración</b>	NO	SI	SI	SI
<b>MCSA</b>	SI	SI	SI	SI
<b>Temperatura</b>	SI	NO	NO	SI
<b>Partículas</b>	NO	NO	NO	SI

Tabla 2.1 – Comparación de diferentes métodos de detección de fallas

En el presente proyecto, se utilizarán los tres primeros métodos mencionados en la Tabla 2.1 para la detección de las fallas más frecuentes que se presentan en los motores asíncronos.

Los dos primeros métodos se basan en la utilización de la transformada rápida de Fourier de las señales de vibración y corriente del estator, con el fin de detectar los distintos tipos de fallos en función del estudio del espectro de frecuencia de la señal muestreada.



## 2.3. Vibraciones en motores asíncronos trifásicos

Para el análisis de las vibraciones en los motores eléctricos trifásicos, se debe tomar en cuenta que, debido a las tolerancias que existen en los componentes de la máquina, siempre existirán vibraciones. Las razones por las que las vibraciones aumenten de magnitud se deben a componentes defectuosos que se describen a continuación.

### 2.3.1. Vibraciones producidas por desbalances

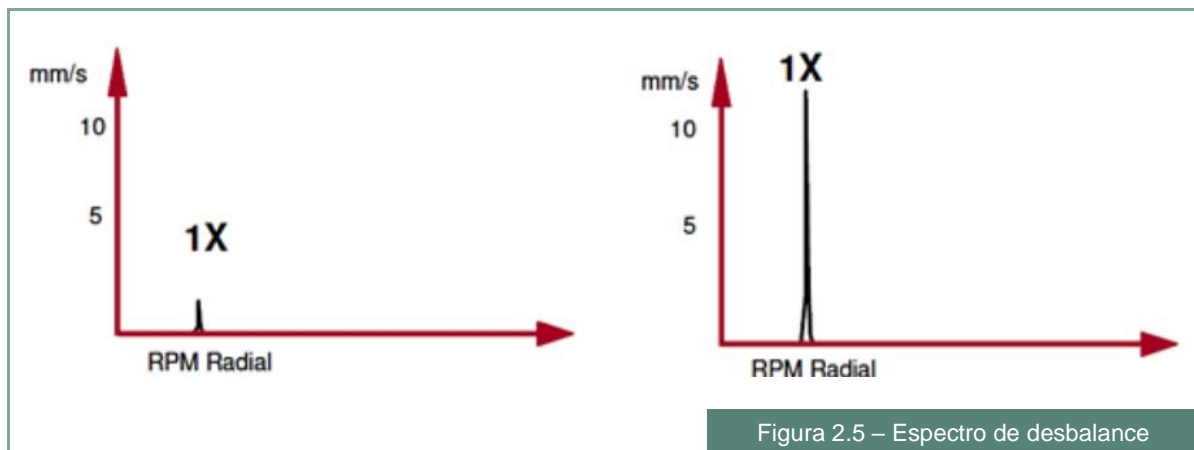
Los desbalances en el rotor de un motor eléctrico es una de las fuentes más comunes de vibraciones. El desbalance en el rotor de un motor asíncrono trifásico ocasiona que aparezcan fuerzas centrífugas sobre el rotor. Estas fuerzas producirán vibraciones que se transmitirán a los cojinetes y rodamientos.

Las causas de desbalance son varias entre las que podemos mencionar:

- Desgaste y erosiones por rozamiento
- Corrosión
- Deformaciones en el rotor

También debido a variaciones de temperatura en el rotor se producen fuerzas que tienden a curvar el rotor, y con ello la aparición de desbalance.

En el análisis espectral, el desbalance se identifica por la aparición de un pico de vibración importante a la velocidad de giro del rotor 1x RPM del rotor, siendo lo más habitual que sea el pico dominante en el espectro. En la Figura 2.5 se muestra dos espectros de una misma máquina en la que puede apreciarse un problema de desequilibrio (gráfica de la derecha) y la ausencia del mismo (gráfica de la izquierda).



### 2.3.2. Vibraciones producidas por desalineamiento

Los motores eléctricos se suelen acoplar a otras máquinas que tienen un determinado funcionamiento, como una bomba de agua, una lavadora, etcétera. La principal fuente de vibración debida a la falta de alineamiento ocurre cuando el eje del motor eléctrico no está alineado con el eje de la máquina acoplada, aunque también suele suceder entre rodamientos o en un par de engranajes. Este acoplamiento se realiza a través de un elemento rígido o flexible. La falta de alineación puede ser vertical u horizontal.

En el espectro típico de un problema de desalineamiento podrá observarse un pico de vibración a la frecuencia de 2x RPM y 1x RPM principalmente, pudiendo aparecer armónicos superiores a medida que el daño aumenta. Para evaluar la severidad del daño es conveniente observar que el pico de vibración obtenido en 2x es mayor que el 75% del pico obtenido en el 1x, lo que indicaría una desalineación severa.

La desalineación puede ser de dos tipos:

- **Desalineación paralela:** los ejes del motor y del rotor conducido son paralelos, pero no colineales. Se detecta altas vibraciones radiales a 2x RPM y a 1x RPM, presentando un desfase de 180° a través del acople. Al aumentar la severidad se generan picos de vibración en armónicos superiores (3x, 4x, etc.).

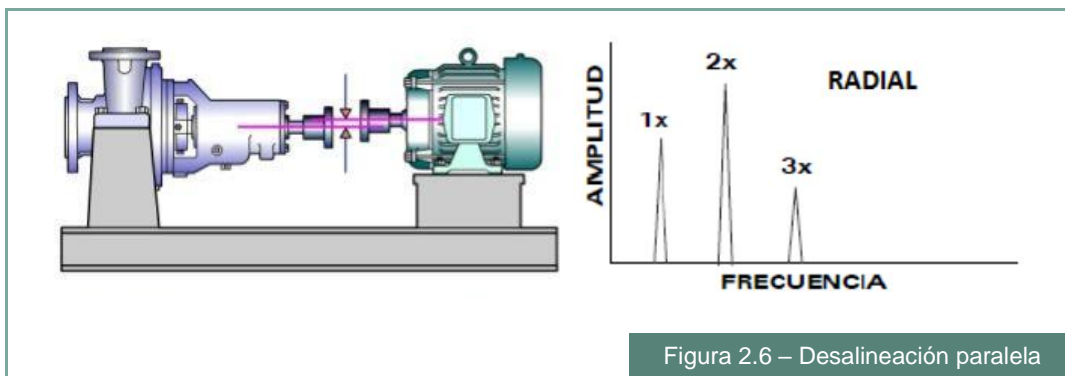


Figura 2.6 – Desalineación paralela

- **Desalineación angular:** ocurre cuando el eje del motor y el conducido unidos en el acople no son paralelos. Se caracteriza por altas vibraciones axiales a 1x RPM y a 2x RPM, presentando un desfase de 180° en el acople.

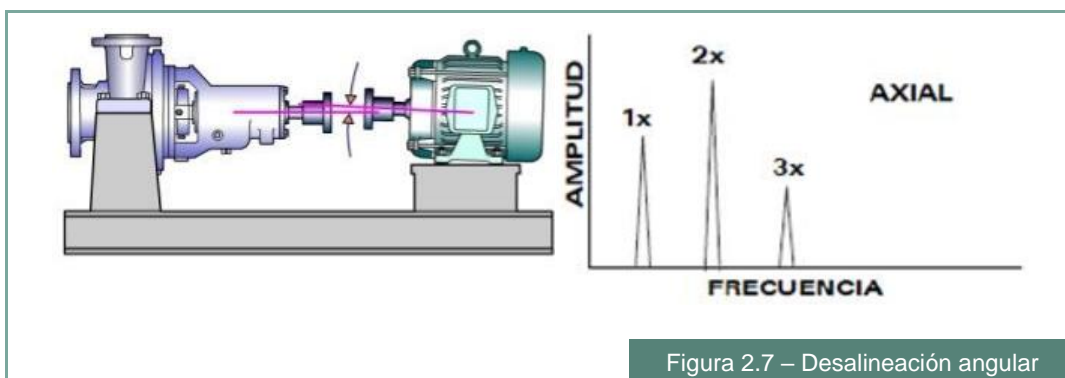
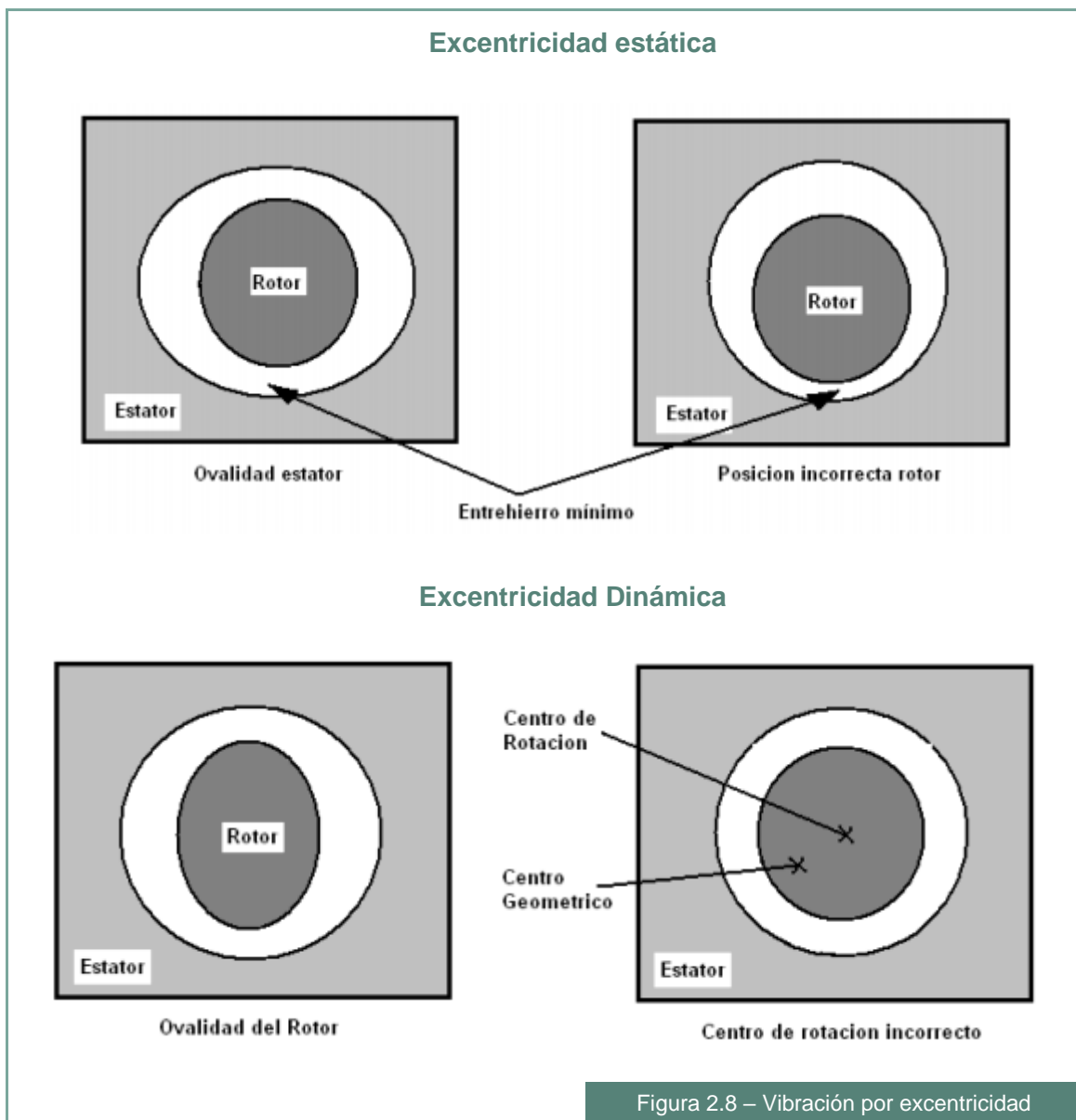


Figura 2.7 – Desalineación angular

### 2.3.3. Vibraciones por falta de excentricidad

El espacio que existe entre el rotor y el estator (entrehierro) es muy reducido, algunos milímetros. Por esta razón, el rotor debe de estar lo más alineado posible, así también la redondez del eje y la excentricidad de sus posiciones relativas durante el giro. Si lo anterior no se cumpliera, puede producir deformación en el entrehierro.

Los problemas de excentricidad pueden dividirse en dos grupos: excentricidad estática y dinámica. La excentricidad estática consiste en una deformación del entrehierro el cual solo aparece en una posición fija en el espacio. En la excentricidad dinámica la deformación en el entrehierro mínimo no permanece en una posición fija en el espacio, sino gira junto con el rotor.



Debido al efecto que tiene la excentricidad en los motores eléctricos, el análisis se puede realizar con el espectro de las corrientes de alimentación y también con el análisis de vibraciones.

La frecuencia de la vibración cuando ocurre excentricidad estática es dos veces la frecuencia de la corriente de alimentación del rotor  $2 * f_{línea}$ , también es frecuente la aparición de frecuencias de 50 y 200 [Hz], causado por la modificación del entrehierro debida a desgaste de los cojinetes.

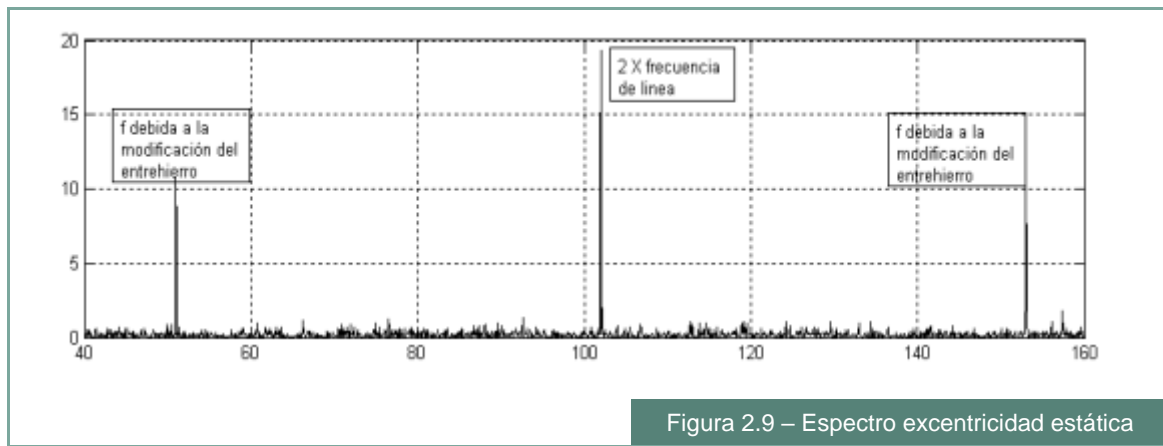


Figura 2.9 – Espectro excentricidad estática

La frecuencia de vibración cuando ocurre excentricidad dinámica suele suceder en bandas laterales alrededor de la frecuencia de giro, de anchura  $s * f_{línea}$ , donde  $s$  es el deslizamiento. Entonces la frecuencia de vibración queda:

$$f_V = 1 * RPM \pm d \quad (1)$$

Donde  $d = s * f_{línea}$ .

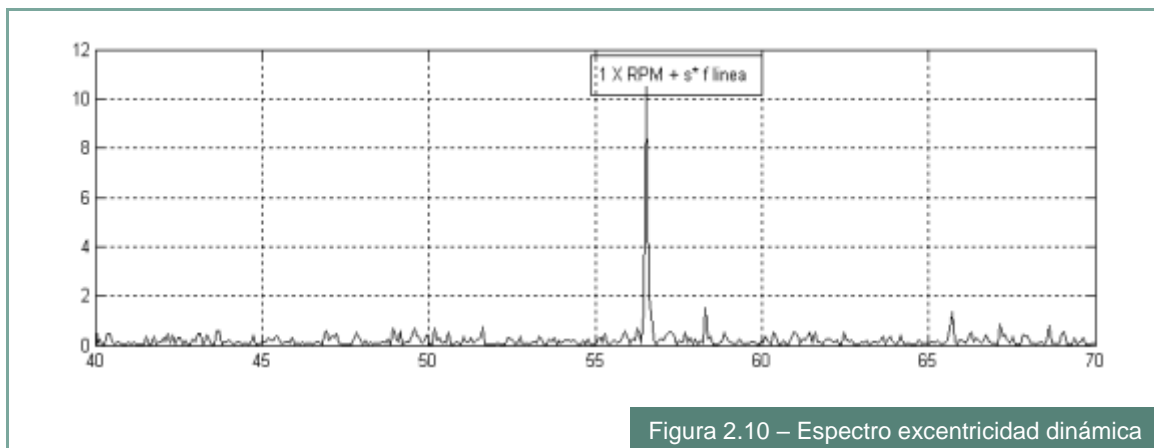


Figura 2.10 – Espectro excentricidad dinámica

#### 2.3.4. Vibraciones por rodamientos defectuosos

Realizar un buen diagnóstico conlleva calcular los valores correspondientes a las frecuencias de daño de los rodamientos y ver si en el espectro aparece algún pico de vibración a alguna de estas frecuencias, lo que sería indicativo de que el rodamiento está fallando o va a fallar.

Las frecuencias de defecto se calcularán bajo las hipótesis de:

- El aro interior del rodamiento es el que gira con el eje.
- El aro exterior del rodamiento permanece fijo en contacto con el soporte.
- La carga es fija sobre el aro exterior y rotativo sobre el interior.

A partir de estas hipótesis se calculan las frecuencias de defecto aproximadamente como:

- **Defecto de aro exterior (BPFO).** Se da cuando se produce una picadura en el aro exterior. Su valor viene dado por:

$$BPFO = \frac{1}{2} N \left[ 1 + \left( \frac{D_w}{P_d} \right) \cos \alpha \right] \quad (2)$$

- **Defecto de aro interior (BPFI).** Se da cuando se produce una picadura en el aro interior. Su valor viene dado por:

$$BSFI = \frac{1}{2} N \left[ 1 - \left( \frac{D_w}{P_d} \right) \cos \alpha \right] \quad (3)$$

- **Defecto de elemento rodante (BSF).** Se da cuando se produce una picadura en alguno de los elementos rodantes. Su valor viene dado por:

$$BSF = \frac{1}{2} \frac{P_d}{D_w} \left[ 1 - \left( \frac{D_w}{P_d} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (4)$$

- **Defecto de jaula (FTF).** Se da cuando falla la jaula del rodamiento. Su valor viene dado por:

$$BSFI = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{D_w}{P_d} \right) \cos \alpha \right] \quad (5)$$

Donde:

$N$  = número de elementos rodantes

$D_w$  = diámetro de los elementos rodantes

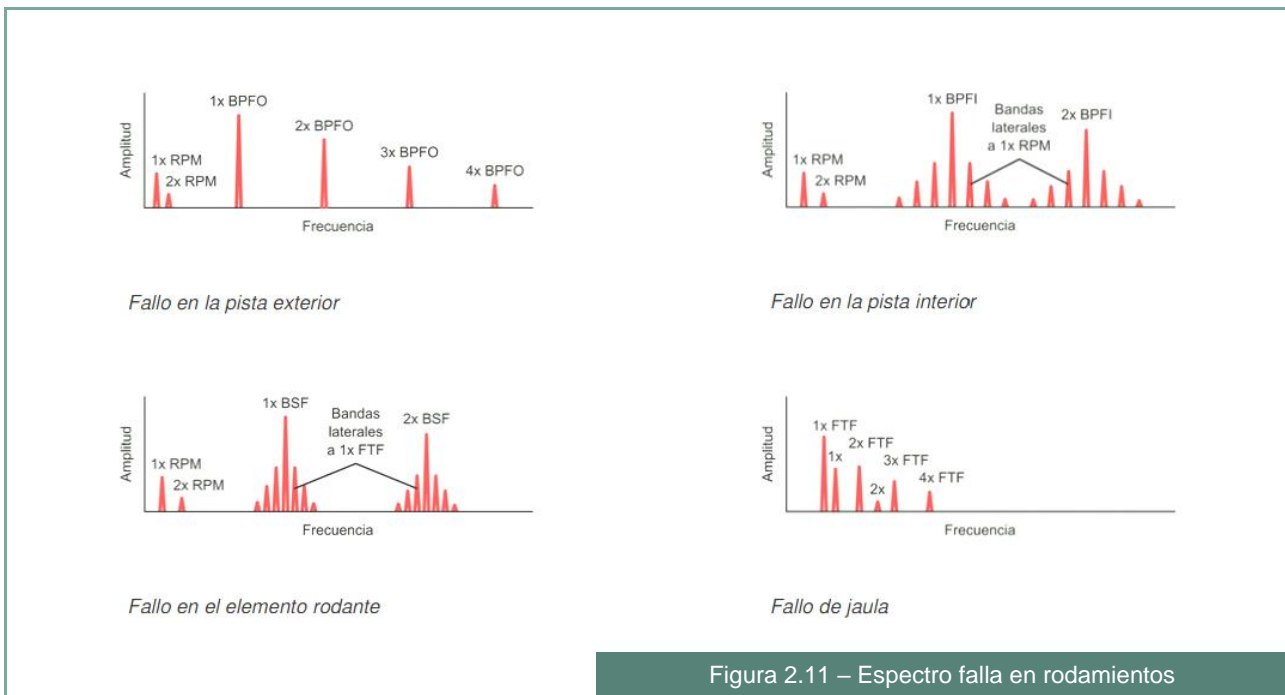
$P_d$  = diámetro primitivo del rodamiento

$\alpha$  = ángulo de contacto del rodamiento

Las frecuencias de fallo de los rodamientos no aparecen solas en el espectro, sino que aparecen acompañadas por sus armónicos y bandas laterales. En la Figura 2.11 se muestra los espectros típicos de fallo en rodamientos donde se aprecia tanto las frecuencias de fallo antes comentadas, así como sus armónicos.

Los armónicos se deben a las ondas de impactos que se producen cuando en el rodamiento se produce un contacto metal-metal debido a las imperfecciones de las superficies de rodadura. Cada tipo de defecto tiene su propia particularidad, considerando que el aro exterior está fijo, gira el aro interior y la carga es fija en una zona del aro exterior, las particularidades de cada tipo de defecto son:

- Defecto de aro exterior: cuando aparece una picadura en el aro exterior, en el espectro de vibración se aprecian armónicos de la frecuencia de fallo BPFO.
- Defecto de aro interior: en el caso de encontrar una picadura en el aro interior, además de armónicos de la frecuencia de fallo se encontrará bandas laterales a ambos lados de BPFI espaciadas la velocidad de giro.
- Defecto de elemento rodante: un fallo en la superficie de un elemento rodante produce también armónicos de la frecuencia de defecto y bandas laterales con una separación de FTF.
- Defecto de jaula: la frecuencia de giro de la jaula FTF, se muestra principalmente en forma de bandas laterales de las demás frecuencias de defecto.



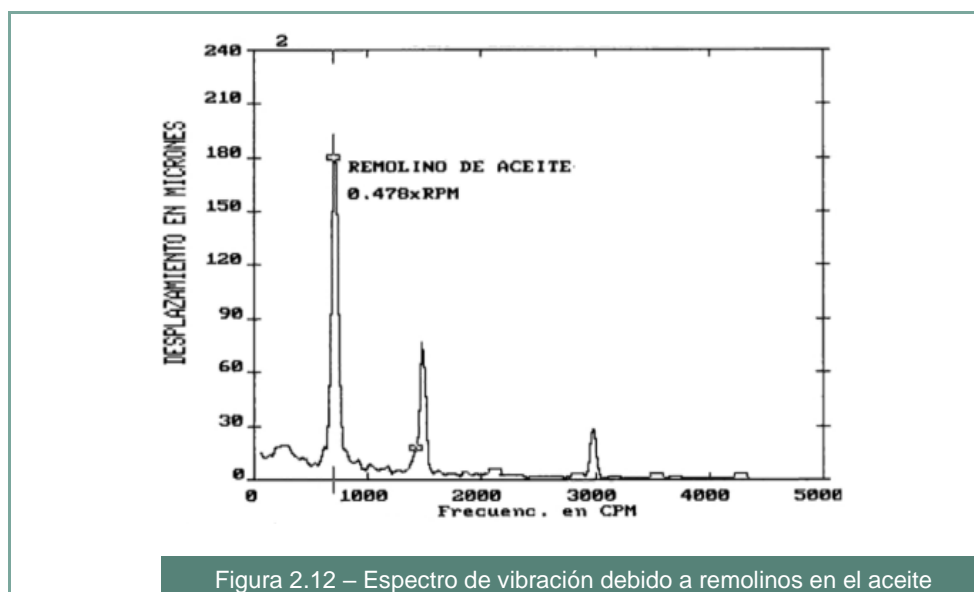
### 2.3.5. Vibraciones por bujes defectuosos

En el caso de los bujes las vibraciones se presentan cuando ocurren anomalías en el aceite. Las ondas de choque producidos por los bujes son absorbidas en gran parte por el aceite, especialmente los de alta frecuencia.

Las frecuencias características cuando hay bujes defectuosos pueden ser las siguientes:  $f_0$ , frecuencia fundamental de la vibración, igual a la velocidad de giro del rotor, ocasionado por falta de excentricidad o incorrecto ajuste del buje.

La frecuencia puede ser 0.4 a 0.6 veces la frecuencia fundamental, ocasionado cuando el eje no se desliza uniformemente sobre la película de aceite. También pueden ser por variaciones en la viscosidad y la temperatura.

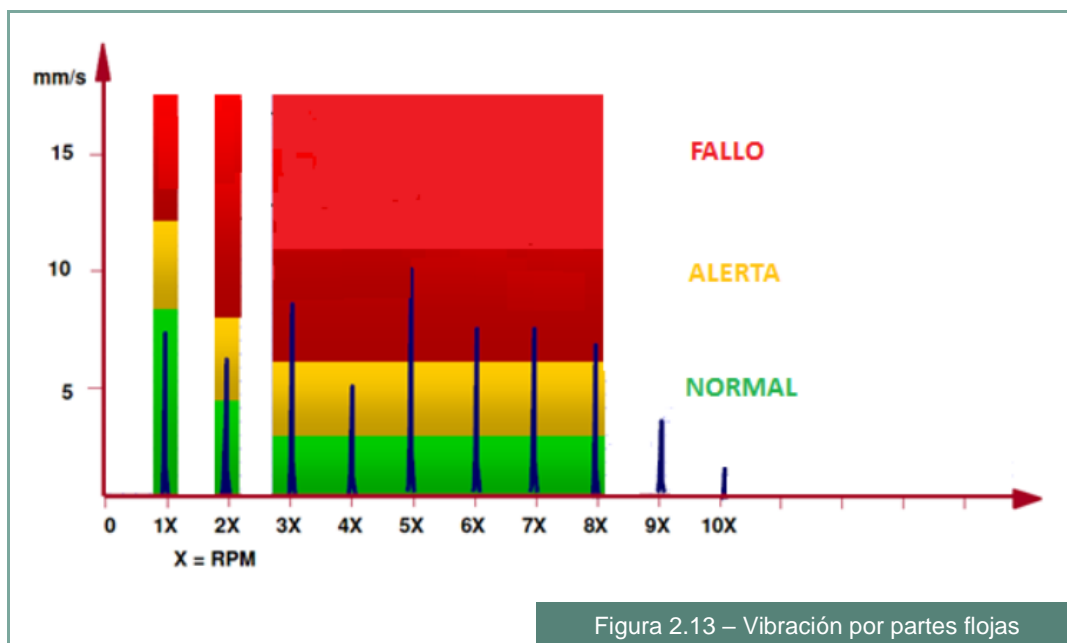
$f = 2f_0$ , este armónico aparece cuando el cojinete se encuentra incorrectamente ajustados. El aflojamiento de partes puede ser también una de las causas.



### 2.3.6. Vibraciones debidas a partes flojas

La soltura mecánica es debido al deterioro de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos que se han excedido en las tolerancias permitidas o simplemente se han aflojado debido a movimiento del motor. Pueden aparecer holguras en la base de la máquina y en los cojinetes afectando el alineamiento del eje.

El espectro típico de un fallo por partes flojas es el representado por la Figura 2.13, donde aparece vibración en los armónicos de la velocidad de giro, subiendo el nivel de ruido espectral en caso de tener holguras severas. La presencia de holguras en la máquina hace aumentar los niveles de vibración, valores de 4 o 5 [mm/s] (en valor global RMS) se consideraría elevado si el espectro muestra una amplia actividad de armónicos de la velocidad de giro.



### 2.3.7. Vibraciones debidas a roturas de barras en el rotor

La rotura en las barras sucede principalmente en la soldadura entre la barra y los anillos de cortocircuito debido a que es donde se concentran los esfuerzos mecánicos. Aunque éstas estén diseñadas para soportar el arranque y paro del motor, la falla ocurre debido a la fatiga del material.

El análisis que se realiza para determinar si existen barras rotas en el rotor del motor eléctrico, no es a través de la medición de las vibraciones, sino con el análisis de la corriente de alimentación del motor eléctrico debido a los efectos en el campo magnético en la corriente de alimentación cuando existe una barra rota.

### 2.3.8. Vibraciones debidas a fallas electromagnéticas

Este tipo de fallas ocurre solo cuando el campo magnético se ve alterado debido a un cortocircuito entre una bobina y el núcleo, cuando una bobina o barra se rompe y también debido a una falla en la alimentación de corriente eléctrica del sistema, esto puede ocurrir

cuando un conductor eléctrico se rompe o cuando una de las protecciones del motor se abre, como sucede con un fusible.

### 2.3.9. Clasificación para la evaluación vibratoria según la Norma ISO 10816

Una guía de referencia para distinguir entre lo que puede entenderse como un funcionamiento normal o admisible de la máquina y un nivel de alerta lo constituyen normas internacionales como la ISO 10816. Esta norma establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones sobre partes no rotativas de la máquina.

Las máquinas se diferencian por su tamaño, por su rigidez, así como su amortiguamiento, lo que incide en que los valores de los niveles de vibración no sean iguales, inclusive, entre máquinas idénticas operando bajo las mismas condiciones.

#### 2.3.9.1. Clasificación por grupos ISO 10816-1

- **Clase I:** Motores eléctricos industriales de hasta 15[kW].
- **Clase II:** Motores eléctricos industriales de 18.5[kW] a 75[kW] sin cimientos especiales o motores rígidos montados de hasta 300[kW] en cimientos especiales.
- **Clase III:** Motores principales grandes y otros motores grandes con masas giratorias montados sobre cimientos rígidos.
- **Clase IV:** Grandes motores primarios y otras máquinas grandes con masas giratorias montadas sobre cimientos blandos (grupos turbo generadores, turbinas de gas con  $P > 10$  [MW]).

Velocidad de vibración (RMS)	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0.28 mm/s				
0.45 mm/s	A			
0.71 mm/s		A		
1.12 mm/s	B		A	A
1.8 mm/s		B		
2.8 mm/s	C		B	
4.5 mm/s		C	B	B
7.1 mm/s	D		C	C
11.2 mm/s		D		C
18 mm/s			D	D
28 mm/s				D
45 mm/s				

Figura 2.14 – ISO 10816-1



**Zona A (Buena):** Es la zona de evaluación de la mayoría de las máquinas nuevas.

**Zona B (Satisfactoria):** Máquinas con vibración en esta zona se consideran aceptables.

**Zona C (Insatisfactoria):** Máquinas que presentan algunos fallos, pero no es obligatorio detenerlas.

**Zona D (Inaceptable):** Son valores de vibración donde el equipo presenta daños internos y su mantenimiento se debe programar con alta prioridad.

### 2.3.10. Acelerómetros comerciales

Antes de analizar los diferentes tipos de acelerómetros, es importante definir la respuesta de CC y CA.

- Un acelerómetro de respuesta de CC significa que puede medir hasta cero hercios, que es necesario para medir la gravedad y otras aceleraciones sostenidas.
- Un acelerómetro de respuesta de CA, como su nombre lo indica, están acoplados a CA y no pueden medir las aceleraciones estáticas como la gravedad y las aceleraciones sostenidas. Por lo general, tampoco pueden medir las vibraciones lentas (por debajo de unos pocos hercios); pero hay acelerómetros de alta sensibilidad que bajan a 0.1 [Hz]. Los acelerómetros de respuesta AC son la opción preferida para todas las pruebas de vibración debido a su amplia respuesta de frecuencia y alta relación señal/ruido.

Hay tres tecnologías o tipos principales de acelerómetros:

- **MEMS capacitivos.** Los sistemas micro-electromecánicos (MEMS) son una tecnología de fabricación que se puede usar para fabricar acelerómetros. Los acelerómetros MEMS capacitivos operan en función de los cambios de capacitancia en una masa sísmica bajo aceleración. Son de bajo costo y tamaño pequeño. Están acoplados a CC y, por lo tanto, son más adecuados para medir la vibración de baja frecuencia, el movimiento y la aceleración de estado estable; pero adolecen de una relación de señal a ruido baja, un ancho de banda limitado y, en su mayoría, se limitan a niveles de aceleración más pequeños (menos de 200 g).
- **Piezorresistivos.** Es la otra tecnología de detección comúnmente utilizada para acelerómetros de respuesta DC. Un acelerómetro piezoresistivo produce cambios de resistencia en los extensómetros que forman parte del sistema sísmico del acelerómetro. Tienen un ancho de banda muy amplio que permite utilizarlos para medir eventos de choque de corta duración (alta frecuencia) como las pruebas de colisión. Estos acelerómetros pueden medir hasta cero hercios, por lo que también se pueden usar para calcular con precisión la velocidad o la información de desplazamiento. Suelen tener una sensibilidad muy baja, lo que los hace menos útiles para realizar pruebas de vibración precisas. Los acelerómetros piezoresistivos son mucho más caros que los acelerómetros MEMS capacitivos, por lo que generalmente no se usan para pruebas de frecuencia y amplitud más bajas.
- **Piezoeléctricos.** Los acelerómetros piezoeléctricos típicamente usan elementos sensores de titanato de zirconato de plomo (PZT) que bajo aceleración producen una carga o salida eléctrica proporcional. Son el acelerómetro más utilizado para aplicaciones de prueba y medición; y son la primera opción para la mayoría de las mediciones de vibración debido a su amplia respuesta de frecuencia, buena sensibilidad y fácil instalación. También son increíblemente populares por lo que están disponibles en una gran cantidad de diferentes sensibilidades, pesos, tamaños y formas. Los acelerómetros piezoeléctricos tienen niveles de ruido muy bajos y se deben considerar para pruebas de choque y vibración de todo tipo. La única exclusión es para aplicaciones donde se necesitan datos de velocidad y

desplazamiento porque están acoplados a CA. Tampoco pueden medir aceleraciones estáticas y generalmente no pueden medir vibraciones por debajo de unos pocos hercios. Los acelerómetros piezoeléctricos de modo de carga se pueden considerar el tipo de sensor más duradero debido a su capacidad para tolerar condiciones ambientales hostiles, incluyendo temperaturas extremas (-200 ° C a + 400 ° C), y algunos incluso pueden operar en entornos nucleares. Debido a un modo de carga, el cableado especial de alta impedancia del acelerómetro piezoeléctrico es necesario para protegerse del ruido.

### 2.3.10.1. Comparación entre los tipos de acelerómetros

Diferentes aplicaciones requieren diferentes acelerómetros. La siguiente tabla resume qué tipos de acelerómetros funcionan para varias aplicaciones de prueba generales.

APLICACIÓN	PIEZOELÉCTRICO	MEMS CAPACITIVO	PIEZORESISTIVO
Aceleración estática (0 Hz, 1 g) Gravedad, orientación del sensor		✓	✓
Fuerza G (0 Hz, <25 g) Cohete, centrífugo, avión		✓	✓
Sísmico (<1 Hz, <1 g) Terremoto, olas, puentes	✓		
Vibración de baja frecuencia (<5 Hz, <25 g) Movimiento Humano, Robótica	✓	✓	✓
Vibración general (5 Hz a 500 Hz, <25 g) Motor eléctrico, suspensión del coche	✓	✓	
Vibración de alta frecuencia (> 500 Hz, <25 g) Análisis de Ruido de Engranajes, Monitoreo de Turbina	✓		
Choque general (<100 Hz, <200 g) Pruebas generales, pruebas de amortiguadores	✓	✓	✓
Pruebas de alto impacto (<250 Hz, > 200 g) Prueba de caída	✓		✓
Impacto extremo (> 1,000 Hz, > 2,000 g) Prueba de colisión del vehículo, metal sobre metal	✓		✓

Tabla 2.2 – Características de diferentes tipos de acelerómetros

## 2.4. Análisis espectral de corrientes del estator (MCSA)

Entre las técnicas de detección de fallo en máquinas de inducción, la MCSA es una de las más usadas, se enfoca en el análisis espectral de la corriente de estator. En presencia de falla, esta señal contiene algunas frecuencias las cuales pueden ser utilizadas como indicadores de la misma.

La metodología propuesta por esta técnica consiste en revisar detalladamente los rasgos de la corriente de estator en el dominio de la frecuencia. Los rasgos de la corriente son variados, desde el área de las componentes espectrales, la amplitud de las mismas, hasta la aparición de bandas laterales alrededor de frecuencias determinadas.

El método descrito funciona bien para torque de carga constante y con motores de alta potencia, pero presenta dificultades cuando se aplica a motores de mediana y baja potencia que están trabajando a velocidad baja o torque de carga bajo.

### 2.4.1. Cortocircuito en el devanado del estator

Un cortocircuito en el devanado del estator genera la elevación de la magnitud de algunas componentes de frecuencia, dadas por la ecuación (6):

$$f_{st} = f_1 \left[ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right] \quad (6)$$

Donde:

- $f_{st}$  son las componentes frecuenciales de las corrientes del estator asociadas a la falla de corto circuito
- $f_1$  es la frecuencia fundamental de la tensión de suministro del sistema eléctrico
- $p$  es el número de pares de polos
- $n = 1, 2, 3 \dots$  (secuencia continua de valores)
- $k = 1, 3, 5 \dots$  (secuencia de números impares)
- $s$  es el deslizamiento del motor

### 2.4.2. Detección de barras rotas en el rotor de un motor de inducción

La detección se realiza por la observación de algunas frecuencias específicas de bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental asociada a esta falla en particular. La diferencia entre la frecuencia de banda lateral y la frecuencia fundamental depende del factor de deslizamiento  $s$  de motor. Las componentes de frecuencia de la corriente del bobinado del rotor son  $sf_1$ . Estas corrientes generan un campo magnético giratorio y, como consecuencia, un par desarrollado. Bajo una condición de falla producida por barras rotas se produce un desequilibrio en las corrientes del rotor. Esta condición anormal crea un campo giratorio a la frecuencia de deslizamiento y opuesto respecto a la rotación del rotor, induciendo unas corrientes en el devanado del estator cuyas frecuencias se evalúan usando la ecuación (7):

$$f_{bb} = f_1 (1 \pm 2s) \quad (7)$$

En donde  $f_{bb}$  corresponde a las frecuencias de las componentes de corriente inducidas en el estator, generadas por las barras rotas en el rotor. El término  $(1 + 2s)$  es debido a la ruptura de barras y el término  $(1 - 2s)$  se genera por la oscilación de velocidad consecuente. La evaluación de las frecuencias de las componentes espectrales correspondientes a la falla de barras rotas debe considerar también las posibles componentes armónicas que se puedan presentar en el sistema eléctrico. Con esta consideración, las frecuencias de las componentes de frecuencias de las corrientes inducidas en el estator, debidas a las barras rotas en el rotor se evalúan usando (8)

$$f_{bb} = f_1(1 \pm 2ks) \quad (8)$$

Siendo  $k = 1, 2, 3 \dots$

### 2.4.3. Detección de excentricidad del rotor

La excentricidad se presenta en el rotor cuando el eje de su centro de masa no coincide con el eje de rotación o por la existencia de un rotor deformado o con sección ovalada. La excentricidad puede causar daños en el motor debido al posible contacto que puede producirse entre el rotor y el estator. Otro efecto de la excentricidad del rotor, es la generación de componentes de frecuencia inducidas en la corriente del estator del motor. En condiciones de excentricidad en motores de inducción se han reportado la presencia de componentes de frecuencia en la señal de corriente. Las frecuencias de estas componentes se determinan con la ecuación (9):

$$f_{ecc} = f_1 \left[ 1 \pm k \left( \frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (9)$$

Donde

$f_{ecc}$  es la frecuencia generada por la falla,

$f_1$  es la frecuencia fundamental de la tensión de suministro

$s$  es el deslizamiento

$p$  corresponde al número de pares de polos

$k = 1, 2, 3 \dots$  es un escalar entero

Las oscilaciones de la carga instalada al motor pueden generar componentes armónicas en la corriente del estator con valores de frecuencia similares a las que se pueden producir por excentricidades en el rotor, que pueden enmascarar las componentes de frecuencia producidas por esta falla.

### 2.4.4. Fallo en cojinetes

$$f_{bnq} = |f_1 \pm m f_{i,o}| \quad (10)$$

$$f_{i,o} = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 \pm \frac{bd}{pd} \cos(\beta) \right] \quad (11)$$

Donde:

$f_1$  es la frecuencia fundamental de la tensión de suministro

$$m = 1, 2, 3 \dots$$

$n$  es el número de bolas de cojinete

$f_{i,o}$  son las frecuencias características de vibración

$f_r$  es la velocidad mecánica del rotor en [Hz]

$bd$  es diámetro de bola

$pd$  es diámetro de circunferencia media

$\beta$  es el ángulo de contacto de las bolas

Para la ecuación (11) se requiere información específica de la construcción de los cojinetes o pueden ser aproximadas por la ecuación (12) para cojinetes de 6 a 20 bolas.

$$f_0 = 0.4 n f_r \quad f_i = 0.6 n f_r \quad (12)$$

#### 2.4.5. Valores permisibles

La Tabla 2.3, establece la diferencia de amplitudes entre los picos asociados a frecuencias críticas y la componente fundamental (frecuencia de la red), con el objetivo de determinar si estos valores están dentro de los rangos permisibles para un motor sano o estimar la severidad de un posible daño.

Diferencia de amplitud entre la banda lateral inferior y la componente fundamental [dB]	Diagnostico
<i>Diferencia</i> > 49	Motor sano
$46 \leq \textit{Diferencia} < 49$	Algún punto de alta resistencia
$44 \leq \textit{Diferencia} < 46$	Varios puntos de alta resistencia
$39 \leq \textit{Diferencia} < 44$	Muchos puntos de alta resistencia o una barra rota
$35 \leq \textit{Diferencia} < 39$	Al menos una barra rota
<i>Diferencia</i> < 35	Varias barras rotas

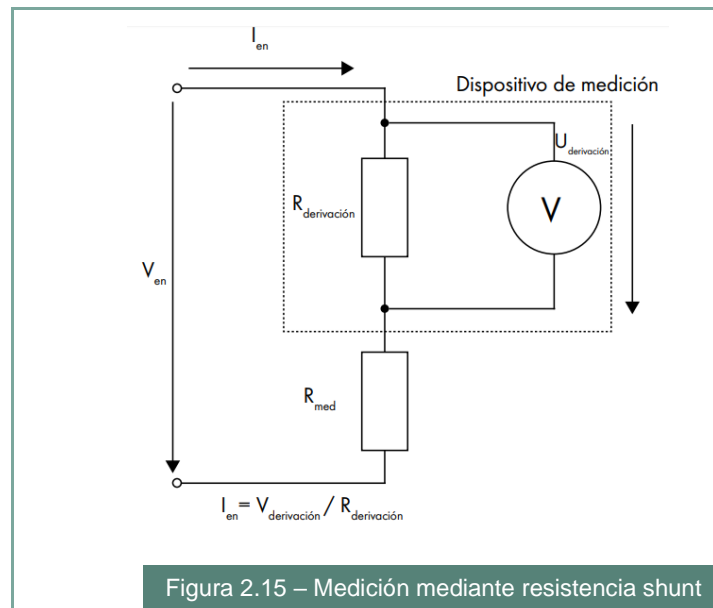
Tabla 2.3 – Diagnostico en función de la diferencia de amplitud

#### 2.4.6. Métodos de medición de corriente alterna

Entre los métodos para la medición de corriente alterna, encontramos:

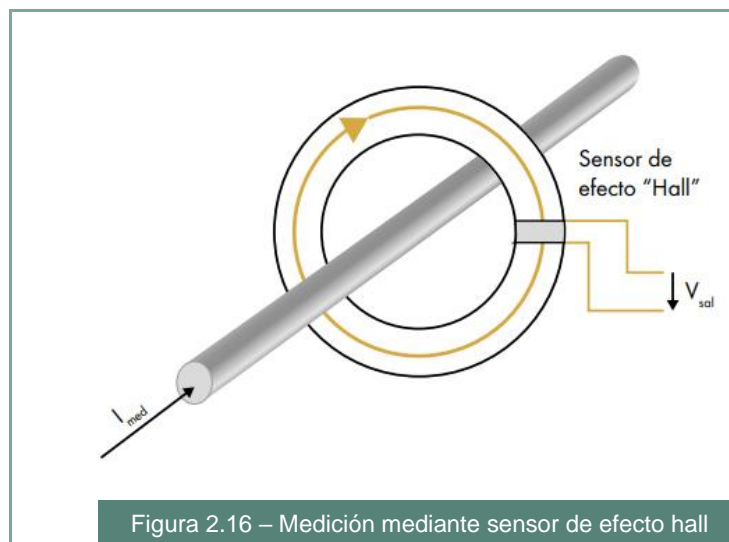
##### 2.4.6.1. Resistencia shunt

La resistencia se coloca en la línea donde se desea medir la corriente y el flujo de corriente resultante hace que una pequeña cantidad de potencia se convierta en calor. Esta conversión de potencia es lo que proporciona la señal de voltaje.



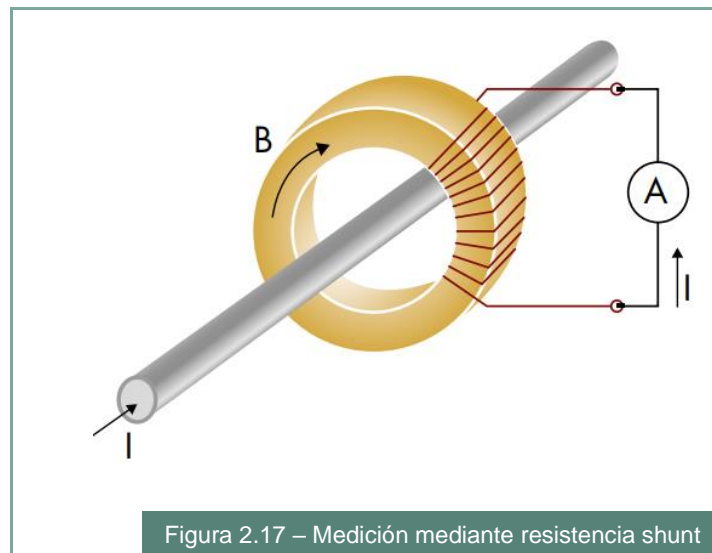
#### 2.4.6.2. Sensores de efecto Hall

El núcleo magnético se introduce alrededor del conductor. El núcleo incorpora un pequeño entrehierro en el que se encuentra el sensor de efecto "Hall". Cuando la corriente fluye a través del conductor genera un flujo magnético en el núcleo, que atraviesa el sensor de efecto "Hall", el cual entrega una tensión de salida proporcional a la corriente que circula por el conductor central.



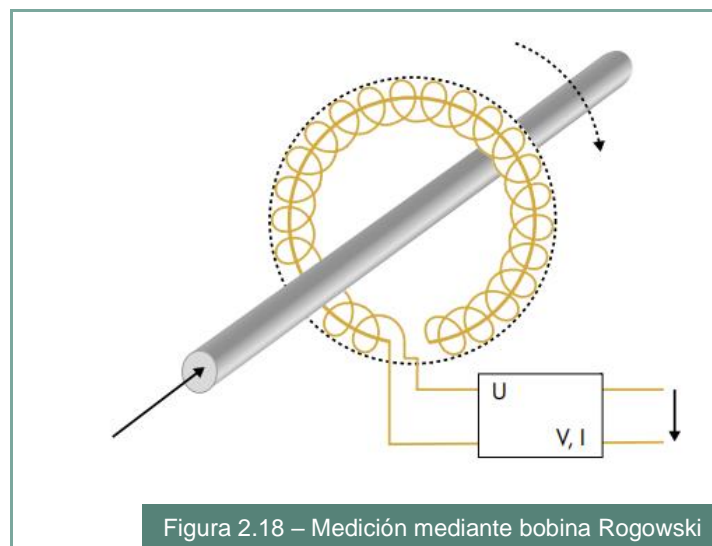
#### 2.4.6.3. Transformadores de corriente

La corriente de CA que circula por el conductor central (primario) genera un campo magnético en el núcleo. Este campo magnético induce una corriente proporcional en el devanado secundario y en fase con la corriente del primario. Se necesita introducir una resistencia de carga para convertir la corriente en una señal de voltaje, para su posterior procesamiento en un ADC.



#### 2.4.6.4. Bobina Rogowski

Es similar a un transformador de corriente, donde se induce una tensión en una bobina secundaria que es proporcional al flujo de corriente a través de un conductor. La diferencia es que la bobina de Rogowski tiene un núcleo de aire. Entrega un voltaje proporcional a la velocidad de cambio de la corriente de CA y, por lo tanto, requieren un integrador antes de procesarse.





La Tabla 2.4 resume las características más relevantes de los métodos mencionados anteriormente.

Método de medición	Resistencia shunt	Sensor de efecto Hall	Transformador de corriente	Bobina Rogowski
<b>Rango de medición</b>	Pequeño	Moderado	Grande	Moderado
<b>Exactitud</b>	Alta	Media	Media	Alta
<b>Aislación</b>	No	Si	Si	Si
<b>Deriva térmica</b>	Baja	Media	Media	Alta
<b>EMI</b>	Alta	Alta	Moderada	Moderada
<b>Robustez</b>	Alta	Moderada	Alta	Alta
<b>Costo</b>	Bajo	Alto	Moderado	Moderado

Tabla 2.4 – Características de diferentes tipos de sensores de corriente

## 2.5. Temperatura de operación

Por norma, todos los motores están diseñados para operar en un ambiente con temperatura inferior a 40 [°C] y en una altura no superior a 1000 [m] sobre el nivel del mar. La instalación en cualquier ambiente por encima de estas condiciones hará que el motor deba ser operado a una carga menor de la nominal.

Los comités y organizaciones han agrupado a los aislantes en cinco clases, según su capacidad de exposición a altas temperaturas. Estas clases corresponden a los niveles máximos de temperatura de 105 [°C], 130 [°C], 155 [°C], 180 [°C] y 220 [°C] (también representados por las letras A, B, F, H y R).

La temperatura de una maquina varia de un punto a otro, pero existen lugares donde la temperatura es más alta que en cualquier otro lado. Esta temperatura del punto más caliente no debe exceder la temperatura máxima permitida.

Clase de aislamiento	Temperatura máxima permitida °C	Incremento máximo de temperatura °C
<b>A</b>	105	65
<b>B</b>	130	90
<b>F</b>	155	115
<b>H</b>	180	140

Tabla 2.5 – Clases de aislamiento

La temperatura que se indica en la columna central de la Tabla 2.5, corresponde a la suma de la temperatura ambiente (40 [°C]) más el incremento permitido (valor de diseño). Por ejemplo, la Clase F sólo permite un incremento de 115 [°C], aunque la temperatura ambiente sea de 40 [°C] o menor.

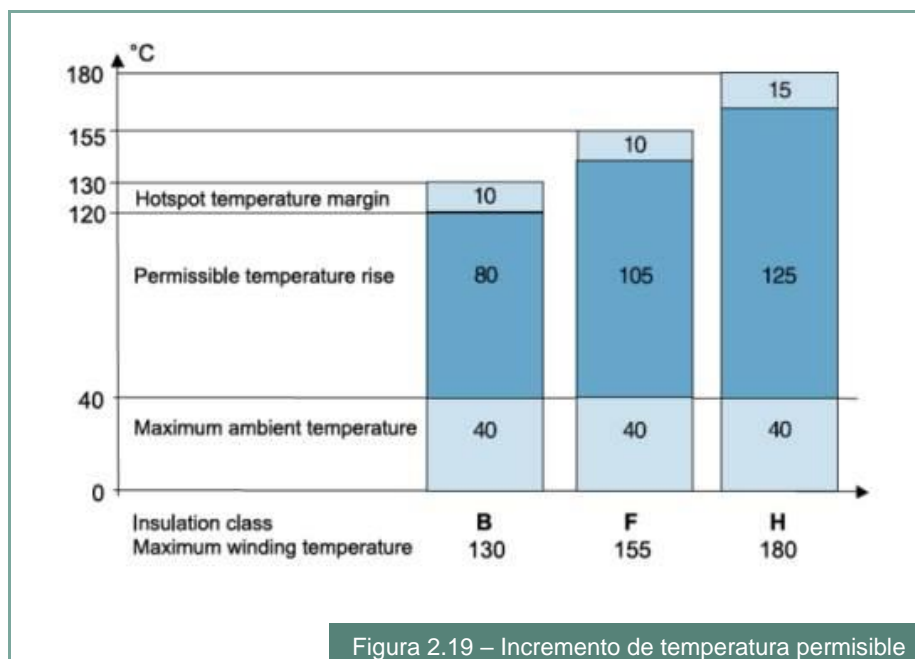


Figura 2.19 – Incremento de temperatura permisible

Un aumento de 8 a 10 [°C] por encima del límite de la clase térmica puede reducir la vida útil del devanado a la mitad. El deterioro prematuro del aislamiento puede contribuir, en las zonas de concentración de esfuerzos, a la formación de un cortocircuito entre las espiras del estator. Esto se considera una de las principales causas de falla en los motores de inducción, debido a que en el arranque y parada de este tipo de máquinas se pueden generar sobretensiones transitorias que posteriormente generan mayor degradación. Además, cuando se da un cortocircuito en una espira o grupo de espiras, la corriente que circula debido a la fuerza electromotriz generada, sólo será limitada por la impedancia entre espiras vecinas, lo que puede ocasionar daños irreversibles.

Como regla práctica de campo, la temperatura interior del motor (punto más caliente) se puede aproximar a la temperatura externa (carcasa) y sumar de 15 a 20 [°C] (dato aproximado empírico). Este valor permite conocer si el barniz del conductor de los devanados se encuentra expuesto a una temperatura mayor según su diseño. Para un dato más exacto, se aconseja emplear un sensor de temperatura en su interior, de manera que permita crear un registro o historial de su comportamiento. La Tabla 2.6 indica el incremento de temperatura medido en la carcasa, según el motor sea de tipo abierto (con sistema de ventilación interno) o cerrado (con sistema de ventilación externo).

Clase de aislamiento	Tipo de motor	Temperatura ambiente °C	Incremento de temperatura medido en la carcasa °C	Tolerancia de punto caliente °C	Temperatura total del sistema °C
A	Abierto	40	55	10	105
	Cerrado	40	60	15	105
B	Abierto	40	70	20	130
	Cerrado	40	75	15	130
F	Abierto	40	90	25	155
	Cerrado	40	95	20	155
H	Abierto	40	110	30	180
	Cerrado	40	115	25	180

Tabla 2.6 – Temperatura máxima de carcasa para distintas clases de aislamiento

### 2.5.1. Sensores de temperatura

Existen diferentes tipos de sensores de temperatura, por lo que es importante conocer las propiedades de cada tipo para elegir un sistema de protección adecuado.

- **Termocuplas:** Están construidas por dos alambres de distinto material unidos en un extremo. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura.
- **Termistores:** Son semiconductores compuestos de una mezcla sintetizada de óxidos metálicos, que se comportan como un "resistor térmico". No son lineales, pero son muy sensibles. Se pueden encontrar con coeficiente de temperatura negativo (NTC) y coeficiente de temperatura positivo (PTC).

- **Termoresistores (RTD):** Tienen elementos sensitivos basados en conductores metálicos, que cambian su resistencia eléctrica en función de la temperatura.
- **Infrarrojos:** El método comprende la medición de la energía de luz (que se encuentra en la banda IR) con un detector que lo convierte en una señal eléctrica. Este método permite medir la temperatura de forma remota.

La Tabla 2.7 muestra las características más relevantes de los sensores de temperatura comúnmente utilizado en aplicaciones industriales.

Criterio	Termocupla	RTD	Termistor	Infrarrojo
<b>Rango de temperatura</b>	Muy amplio	Amplio	Corto a medio	Amplio
<b>Intercambiabilidad</b>	Buena	Excelente	Deficiente a razonable	Excelente
<b>Estabilidad a largo plazo</b>	Deficiente a razonable	Buena	Deficiente	Buena
<b>Exactitud</b>	Media	Alta	Media	Media
<b>Repetibilidad</b>	Deficiente a razonable	Excelente	Deficiente a razonable	Deficiente a razonable
<b>Sensibilidad</b>	Baja	Media	Muy alta	Muy alta
<b>Respuesta</b>	Media a rápida	Media	Media a rápida	Rápida
<b>Linealidad</b>	Razonable	Buena	Deficiente	Buena
<b>Autocalentamiento</b>	No	Muy bajo a bajo	Alto	No
<b>Sensibilidad puntual</b>	Excelente	Deficiente	Bueno	Excelente
<b>Efecto de carga</b>	Alto	Medio	Bajo	-
<b>Tamaño</b>	Pequeño	Medio	Pequeño	Medio
<b>Costo</b>	Bajo	Alto	Bajo	Moderado

Tabla 2.7 – Características de los sensores de temperatura

## 2.6. Métodos para el diagnóstico de fallas

### 2.6.1. Caracterización de las señales en el dominio temporal

Los parámetros de interés para el análisis de estas señales son:

- **Cero - pico:** mide la amplitud de la función sinusoidal desde la posición de equilibrio, valor 0 en el eje de coordenadas, y el máximo o el mínimo de la función.
- **Pico - pico:** mide la magnitud de la amplitud de la función sinusoidal desde un valor mínimo hasta un valor máximo o viceversa.
- **Amplitud RMS:** es la amplitud del desplazamiento constante que contendría la misma energía que transporta la onda senoidal. Matemáticamente es la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la señal.

#### 2.6.1.1. Desplazamiento, velocidad y aceleración de las vibraciones

En la mayoría de los casos, se ha encontrado que la velocidad de la vibración es suficiente para caracterizar la severidad de la vibración sobre un amplio rango de velocidades de operación de la máquina. El uso solo del valor de velocidad, sin importar la frecuencia, puede llevar a grandes desplazamientos o a grandes aceleraciones inaceptables.

Cuando hay una energía significativa bajo 10 [Hz] debe medirse el desplazamiento global. Similarmente, la aceleración global debería ser medida cuando hay energía significativa sobre 1000 [Hz].

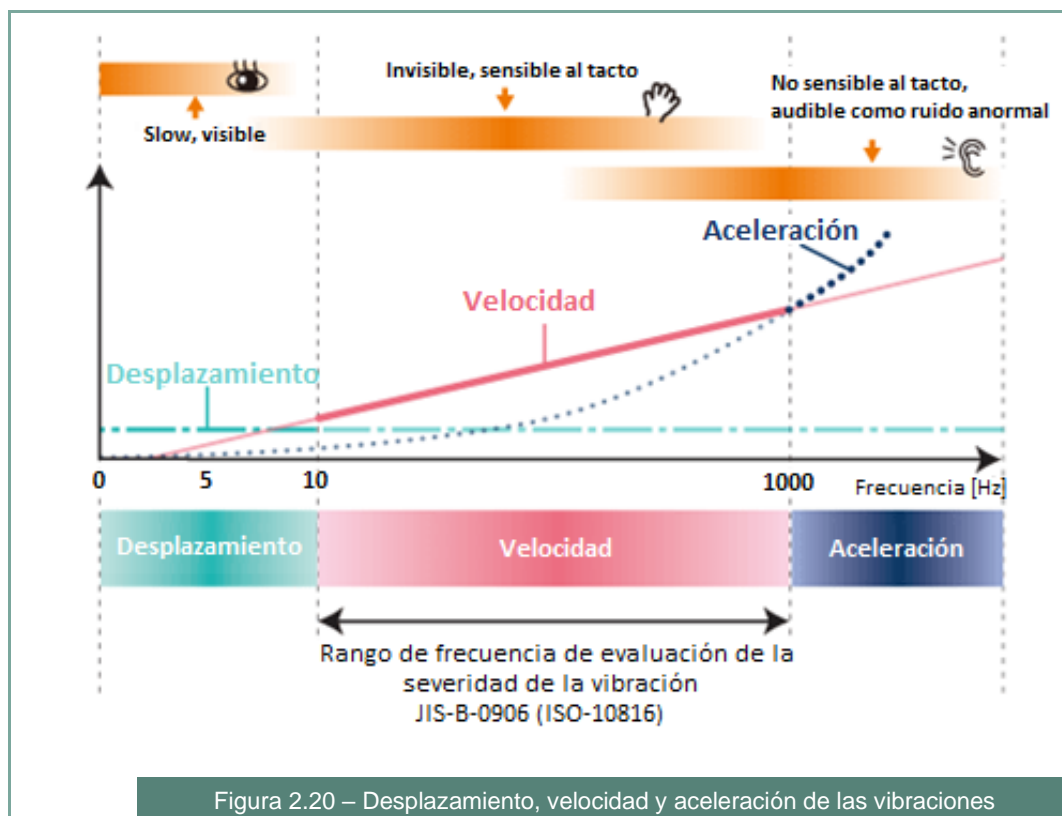


Figura 2.20 – Desplazamiento, velocidad y aceleración de las vibraciones

## 2.6.2. Caracterización de las señales en el dominio frecuencial

Las señales de corriente obtenidas directamente de los sensores no ofrecen ninguna información útil para la detección de fallos, pues a simple vista (en un osciloscopio) es imposible diferenciar la corriente de un motor sano de uno con avería. Para que esta señal pueda ser empleada para el diagnóstico de fallos, primero debe ser procesada para poder extraer de ella ciertas características o variables indicativas de fallo que sí pueden ser utilizadas para el diagnóstico. Existen diversas técnicas para el procesamiento de la señal, todas ellas basadas en el registro de estas señales en el tiempo y su transformación al dominio de la frecuencia.

Para extraer información de la señal de corriente, se utilizan algoritmos de procesamiento de señales y técnicas matemáticas como: Transformada Rápida de Fourier (FFT), Transformada Wavelet, Densidad espectral de potencia, entre otras.

### 2.6.2.1. Transformada de Fourier

Las transformaciones de una señal entre el dominio del tiempo y de la frecuencia y sus inversas, se basan en la Transformada de Fourier y la Transformada Inversa de Fourier. El cálculo digital de la Transformada de Fourier es un proceso largo debido al elevado número de operaciones matemáticas a realizar. La Transformada Rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo que consigue calcular el resultado de la Transformada de Fourier con mayor rapidez y eficiencia a partir de escoger un número de muestras  $N$  que sea potencia de dos, para lo cual aprovecha ciertas propiedades de simetría. Un requisito para implantar la FFT es que la señal sea periódica en el tiempo de registro. Para conseguir esto, la señal debe estar cerca de cero al principio y final del periodo de muestreo. En la práctica esto se consigue multiplicando la señal por una función llamada "ventana" o "ponderación". La ventana Hanning es la más comúnmente utilizada.

Después de aplicar FFT a la corriente del estator, las amplitudes de las componentes de frecuencia resultantes se normalizan por el valor de la amplitud de la componente fundamental. El proceso de normalización reduce las influencias de las condiciones de carga del motor. La FFT es adecuada para la caracterización de señales estacionarias. Sin embargo, no es adecuada para señales con características transitorias.

### 2.6.2.2. Transformada de Wavelet

La desventaja de una expansión de la serie de Fourier es que proporciona solo resolución de frecuencia, pero carece de resolución de tiempo. Wavelet es una función base aislada con respecto al tiempo o la ubicación espacial y la frecuencia o número de onda. La transformada Wavelet descompone una señal en una familia de wavelets, proporcionando una representación de frecuencia y tiempo de la señal. Las ondículas son de forma irregular y de longitud infinita. Se pueden aplicar con éxito al análisis de señales con características transitorias y contenido espectral variable.

La transformada wavelet, presenta mayor capacidad de síntesis e identificación de fallas de cortocircuito en motores de inducción que la técnica MCSA que, por enfocarse en el análisis espectral de la corriente de estator, requiere transformada de Fourier.

## Capítulo 3: Desarrollo

En términos generales, podemos decir que el sistema cuenta con tres partes claramente identificadas:

- Nodos sensores
- Data-Logger Gateway
- Software de análisis

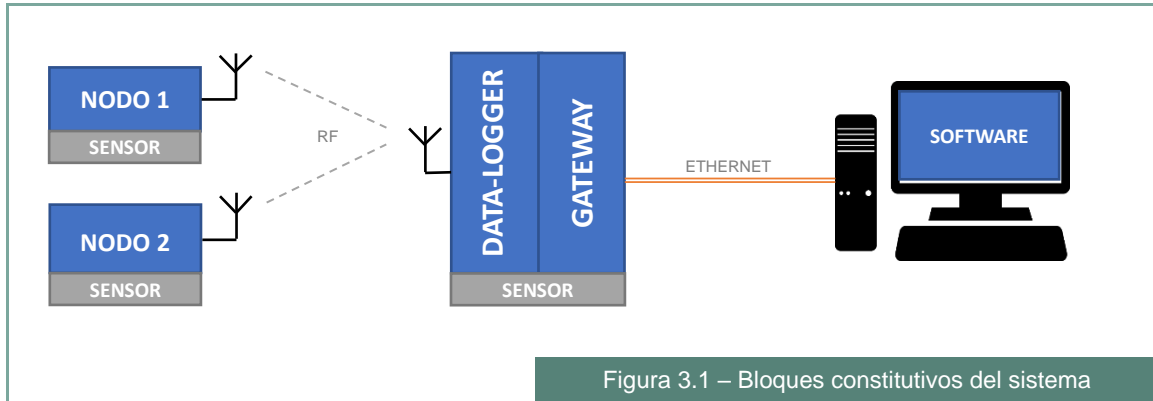


Figura 3.1 – Bloques constitutivos del sistema

En las próximas secciones, se hará un análisis detallando el funcionamiento y los criterios adoptados para el diseño de cada uno de los bloques del sistema.

### 3.1. Nodos sensores

Son los responsables de capturar los datos de vibración y temperatura del motor, y transmitirlos hacia el Data-Logger Gateway por radiofrecuencia. Los nodos serán montados en la carcasa del motor, ya sea mediante pernos de fijación (stud), adhesivo o bases magnéticas.

En la Figura 3.2 se observa un diagrama general del nodo sensor.

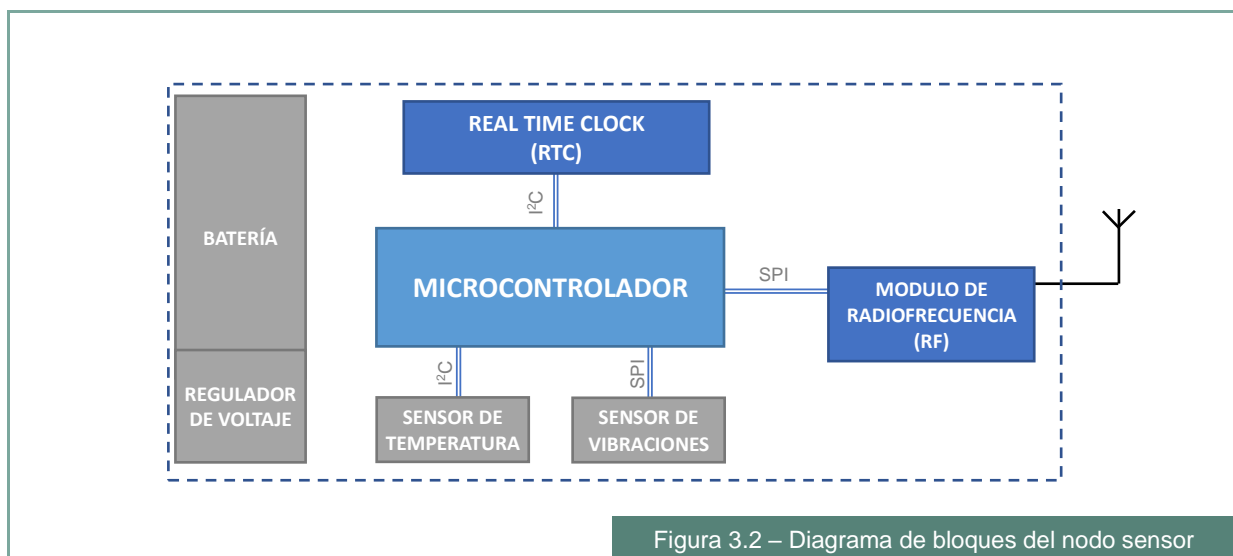


Figura 3.2 – Diagrama de bloques del nodo sensor

Los nodos serán energizados por una batería de larga duración que, sumado a la comunicación inalámbrica, hacen que el dispositivo sea completamente portátil. Esto,

permite que la instalación del sensor sea muy sencilla, evitando la necesidad de tender cables y modificar la instalación eléctrica de la máquina para su incorporación.

Al tratarse de un sistema energizado por batería, es fundamental realizar un diseño que garantice un bajo consumo de energía. Teniendo en cuenta que, la captura de datos se realiza a intervalos de tiempo preestablecidos y de corta duración, la mayor parte del tiempo los módulos permanecen inactivos, pudiendo configurarse sus modos de bajo consumo de energía.

De esta manera, la lógica de funcionamiento será:

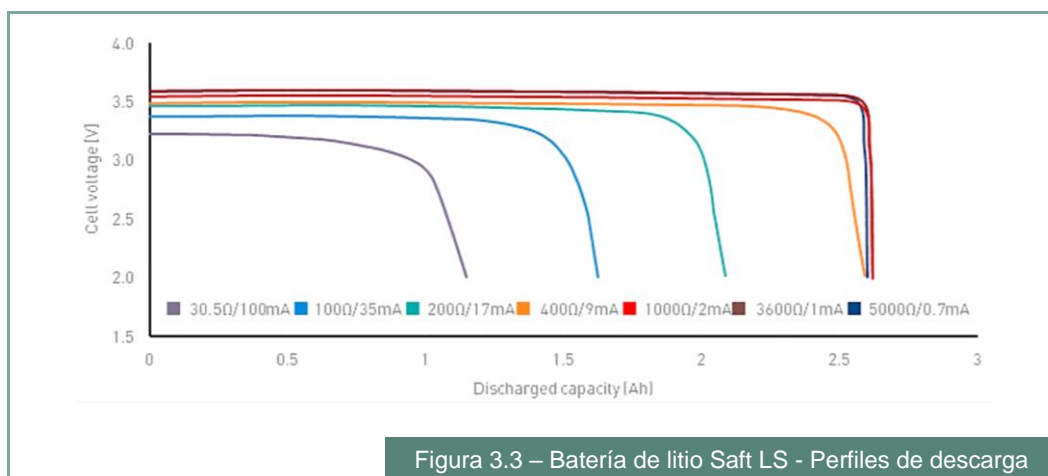
- a) El microcontrolador configura las alarmas en el RTC
- b) El microcontrolador configura los periféricos para que ingresen en modo ahorro de energía
- c) Se fuerza al microcontrolador a entrar en modo de ahorro de energía, en espera de una interrupción externa
- d) Al activarse la alarma, el RTC “despierta” al microcontrolador a través de una interrupción
- e) El microcontrolador “despierta” los periféricos, captura los datos de los sensores y los envía al Data-Logger mediante el módulo de RF.
- f) Luego, se vuelve al paso b) y se repite la secuencia

Para poder realizar un análisis frecuencial de las vibraciones, se toman 2048 muestras.

### 3.1.1. Batería

Todos los circuitos integrados utilizados en el diseño electrónico del nodo, funcionan con tensiones de entre 2.5 y 3.3 [V].

Se optó por utilizar una batería de litio, marca Saft LS 14500, con una tensión nominal de 3.6[V] y una capacidad de 2600 [mAh]. Si observamos el perfil de descarga, vemos que la tensión se mantiene prácticamente constante durante toda su vida útil y, además, posee muy baja auto-descarga.





### 3.1.2. Regulador de voltaje

Una característica importante del regulador, para un sistema energizado por batería, es su baja corriente de reposo. Por ello, se escogió un regulador de voltaje lineal NCP551, de tipo LDO, con tensión de salida fija de 3.3 [V] y corriente de reposo de tan solo 4 [ $\mu$ A].

### 3.1.3. Microcontrolador

El microcontrolador ATmega328p será el responsable de gestionar los periféricos, realizar lecturas analógicas y ejecutar la lógica de control. Entre sus características, se destacan:

- Tensión de alimentación entre 1.8 y 5.5 [V]
- Memoria de programa de 32 KB, SRAM de 2KB y EEPROM de 1KB
- Posee interfaces SPI y I<sup>2</sup>C
- Oscilador interno de 8 [MHz]
- Conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits

La frecuencia máxima de operación del microcontrolador es de 20 [MHz]. Sin embargo, nuestros requisitos de procesamiento y uso de la CPU permiten utilizar una frecuencia de operación de 8 [MHz], aprovechando el oscilador interno. Lo cual resulta beneficioso desde el punto de vista del consumo, dado que, a menor frecuencia de operación, menor es el consumo de energía. En funcionamiento normal, el consumo ronda los 5 [mA], descendiendo a menos de 8 [ $\mu$ A] en modo Power-Down.

Para informar al sistema el nivel de carga disponible en la batería del nodo, se incorpora el circuito de la Figura 3.4.

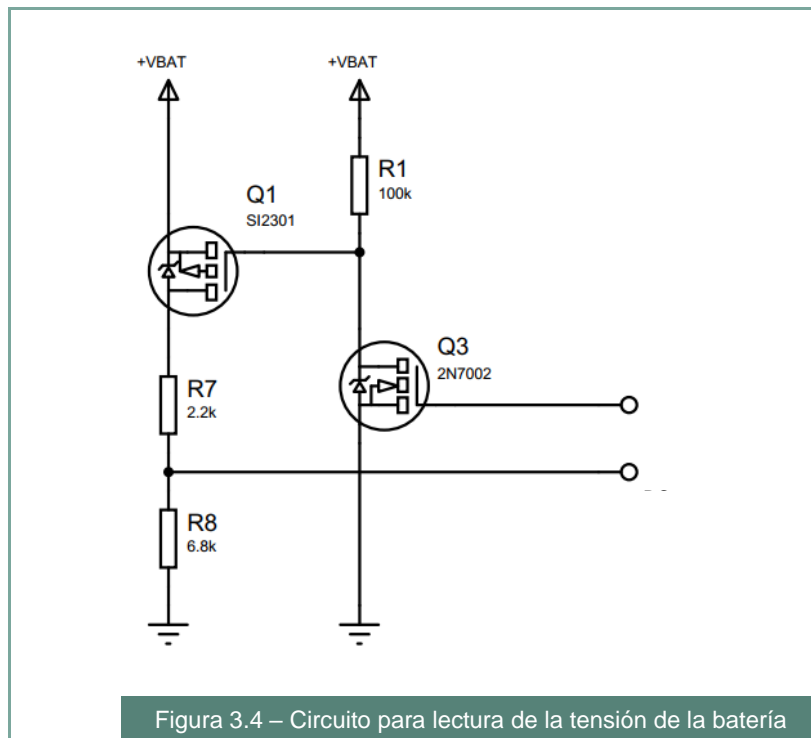


Figura 3.4 – Circuito para lectura de la tensión de la batería

En principio, se pensó en utilizar simplemente un divisor resistivo, pero quedaría consumiendo energía continuamente. Como alternativa, se utiliza un transistor Q1, el cual se activa solamente durante el tiempo necesario para que el ADC realice la lectura. El transistor Q3, cumple la función de driver para la activación de Q1.

### 3.1.4. Real time clock (RTC)

Es un circuito integrado especialmente diseñado para medir el paso del tiempo.

En el proyecto, se utilizará el integrado DS3231, que mantiene la información sobre segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año; y realiza correcciones automáticas para los meses con menos de 31 días y año bisiesto.

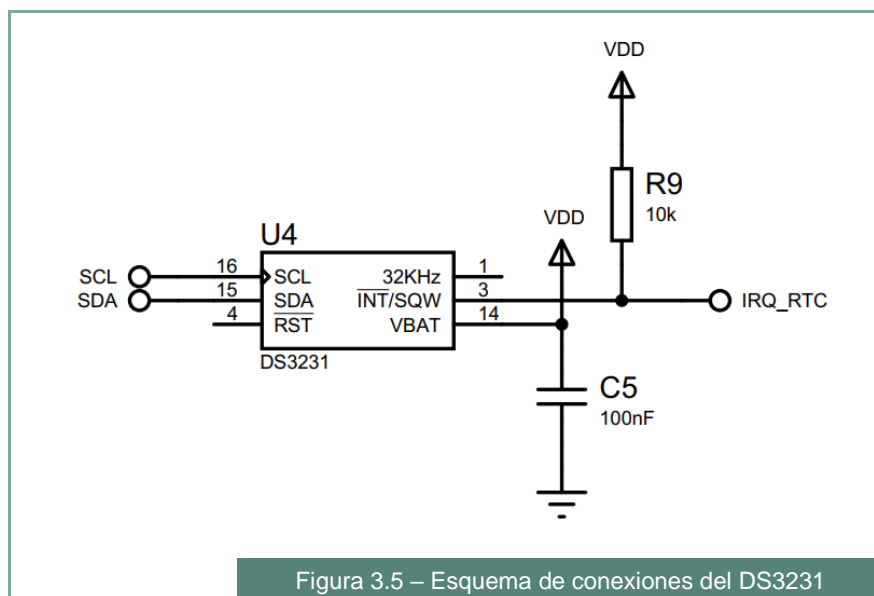
Las diferentes configuraciones y lectura de registros, se realiza a través de la interfaz I<sup>2</sup>C.

Además, el IC cuenta con la posibilidad de configurar alarmas internas que, al activarse cambian de estado un pin de interrupción (INT). Esta es la funcionalidad utilizada para la captura de datos de los sensores.

- Una vez al día, se activa la Alarma 1 para la captura de datos de vibraciones y medición de la tensión de la batería
- Una vez cada hora, se activa la Alarma 2 para la medición de temperatura

El horario de activación de las alarmas, pueden ser configurado por el usuario final a través del software de análisis.

Respecto al consumo de energía, utilizando la configuración de la Figura 3.5, se mantiene por debajo de los 3  $\mu$ A]. El pin VCC del integrado, se mantiene conectado a GND, para indicarle al IC que está funcionando con batería y no con una fuente primaria de energía.



Cuando se energiza el sistema por primera vez, o en el caso de que se reemplace la batería, el microcontrolador detecta que el DS3231 tiene sus valores de fecha

predeterminados de fábrica y, automáticamente solicita la hora y fecha actual al Data-Logger Gateway.

### 3.1.5. Sensor de vibraciones

Teniendo en cuenta la clasificación realizada en la sección 2.5, el tipo de acelerómetro más adecuado para la medición de vibraciones es el piezoeléctrico. Sin embargo, la evolución tecnológica de los circuitos integrados, han permitido desarrollar acelerómetros MEMS de bajo ruido y gran ancho de banda. Por este motivo, se ha optado por la utilización de un acelerómetro tipo MEMS, ya que su performance es adecuada para nuestro sistema. Además, es considerablemente menos costoso que los otros tipos de acelerómetros, teniendo un valor de aproximadamente USD20, a diferencia de uno piezoeléctrico, que ronda los USD200. De esta manera, podemos desarrollar un sistema menos costoso respecto a los ofrecidos por otras empresas, pero de prestaciones similares.

Los acelerómetros MEMS se encuentran comercialmente en encapsulados pequeños de tipo LGA, cuya operación de soldado resulta difícil de llevar a cabo sin el equipamiento adecuado. Para superar esta dificultad, se optó por utilizar el módulo de la Figura 3.6, que incluye el chip LIS3DH de la empresa STMicroelectronics.



Figura 3.6 – Modulo acelerómetro LIS3DH

El LIS3DH es un acelerómetro lineal de tres ejes de alto rendimiento y bajo consumo perteneciente a la familia "nano". El dispositivo cuenta con modos operativos de muy baja potencia que permiten un ahorro de energía avanzado y funciones integradas inteligentes.

#### Características principales:

- Tensión de alimentación: 1.7 [V] a 3.6[V]
- Consumo menor a 2 [ $\mu$ A] en modo Low-Power
- Interfaz de salida digital I<sup>2</sup>C / SPI
- Salida de datos de 16 bits
- Escala seleccionable:  $\pm 2g$  /  $\pm 4g$  /  $\pm 8g$  /  $\pm 16g$
- Ancho de banda de 1 [Hz] hasta 5.3 [kHz]
- Densidad de ruido: 220 [ $\mu g/\sqrt{Hz}$ ]
- Interrupciones programables para detección de movimiento y caída libre

- Rango de temperatura extendido de -40°C a +85°C

Para configurar los registros internos y obtener los valores de aceleración, se utiliza la interfaz SPI. En cuanto a la configuración de los registros, se establecen:

El registro CTRL\_REG1:

CTRL_REG1							
O	O	O	O	L	Z	Y	X
DR3	DR2	DR1	DR0	Pen	en	en	en
0	1	1	1	0	1	1	1

Tabla 3.1 – Registro CTRL\_REG1

Donde:

- **ODR [3:0]:** Configura la velocidad de muestreo en 400 [Hz].
- **LPen:** Desactiva el modo Low-power.
- **Zen, Yen, Xen:** Habilita el muestreo en todos los ejes.

El registro CTRL\_REG4:

CTRL_REG4							
BDU	BLE	FS1	FS0	HR	ST1	ST0	SIM
1	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 3.2 – Registro CTRL\_REG4

Donde:

- **BDU:** Actualiza los registros de aceleración con los últimos valores muestreados.
- **FS [1:0]:** Establece la escala en  $\pm 2 [g]$
- **HR:** Habilita el modo High Resolution

El registro CTRL\_REG3:

CTRL_REG3							
ZYXOR	ZOR	YOR	XOR	ZYXDA	ZDA	YDA	XDA
0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 3.3 – Registro CTRL\_REG3

Donde:

- **ZYXDA:** Habilita interrupción cuando hay nuevas muestras disponibles para ser leídas en los ejes X, Y y Z.

Además, el estado del bit ZYXDA (bit 2), del registro STATUS\_REG, nos indica cuando hay información lista para ser leída.

Con esta configuración, se obtiene una resolución de 1 [mg/digito] y un consumo de 73 [ $\mu$ A]. Pero, configurando todos los bits ODR del registro CTRL\_REG1 en 0, se ingresa al modo Power-Down, donde el consumo se reduce a solo 0.5 [ $\mu$ A]

El módulo utilizado no requiere componentes adicionales para su funcionamiento, dado que ya incluye los capacitores de desacople en sus pines de alimentación. Incluso, se han

quitado las resistencias incorporadas en el módulo, para reducir el consumo de energía y garantizar la compatibilidad con el resto del circuito.

### 3.1.6. Sensor de temperatura

Haciendo un análisis de las características detalladas en la Tabla 2.7 y sus ventajas y desventajas, se optó por la utilización de un sensor infrarrojo para la medición de la temperatura de la carcasa del motor. Esto, evita la obtención de lecturas erróneas debido a un contacto deficiente entre el sensor y la estructura del motor.

El sensor utilizado es el MLX90614BAA, que está constituido por un chip de silicio con una fina membrana micro-mecanizada sensible a la radiación infrarroja, junto con la electrónica necesaria para amplificar, digitalizar la señal y calcular la temperatura.

Viene calibrado de fábrica para medir temperaturas de objeto entre  $-70^{\circ}\text{C}$  y  $380^{\circ}\text{C}$ , y temperatura ambiente entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $125^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3.7 – Sensor MLX90614

El sensor tiene una exactitud de  $0.5^{\circ}\text{C}$  para el rango de temperatura entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$ , y su resolución es de  $0.02^{\circ}\text{C}$ . Se puede alimentar con una tensión de entre 2.4 y 3.6[V] y cuenta con un ángulo de visión de  $70^{\circ}$ .

Utiliza una interfaz de comunicaciones SMBus, compatible con I<sup>2</sup>C, a través de la cual se accede a los registros internos del sensor para obtener los datos de temperatura de objeto y temperatura ambiente. Además, se puede configurar su modo Power-Down, haciendo que el consumo normal de 1[mA] se reduzca a solo 5 [ $\mu\text{A}$ ].

Este sensor, no requiere componentes adicionales para su funcionamiento, solo se recomienda el uso de un capacitor de desacople de 100 [nF] entre los pines de alimentación.

### 3.1.7. Módulo de comunicaciones por RF

Para enviar la información obtenida de los sensores hacia el Data-Logger Gateway, se optó por una comunicación inalámbrica utilizando el módulo transceptor nRF24L01+, que trabaja en la banda de 2.4 [GHz].

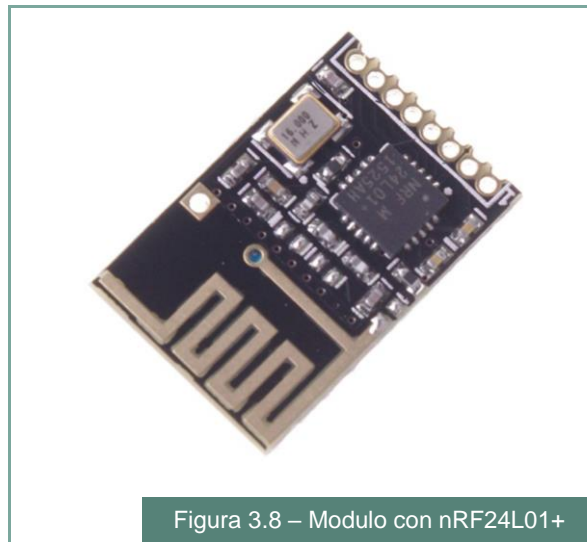


Figura 3.8 – Modulo con nRF24L01+

Entre las razones consideradas para su selección, se encuentran: su bajo consumo de energía, su potencia y tasa de transmisión configurable, las funcionalidades especiales incorporadas, la necesidad de pocos componentes externos y la baja carga de procesamiento que se requiere en el microcontrolador.

Las características más sobresalientes del nRF24L01+ son:

- Sistema Automático de Acuse de Recibo (Auto Acknowledgement) y Sistema Automático de Retransmisión (ART), sin intervención del microcontrolador, gracias al sistema Enhanced ShockBurst
- Sistema de identificación y verificación del paquete de datos mediante una dirección (entre 3 y 5 Bytes) y un código CRC (si se activa, de 1 o 2 Bytes)
- Sistema de múltiple de recepción de datos (MultiCeiver) con 6 Pipes de llegada
- Tasa de transmisión de datos por aire (RF) de 1 o 2 [Mbps]
- Tasa de transmisión SPI de entre 0 y 10 [Mbps]
- 125 canales de RF seleccionables

La estructura del paquete de datos incluye un preámbulo, la dirección del receptor, un campo para el control de paquetes, el payload y un CRC.

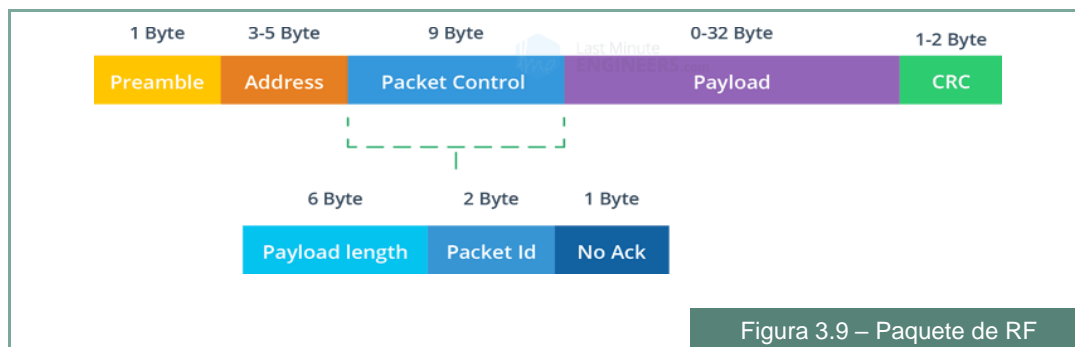


Figura 3.9 – Paquete de RF

### 3.1.7.1. Funcionalidad Enhanced ShockBurst.

Para entender en que consiste la tecnología Enhanced ShockBurst, se analizan los siguientes casos:

- El dispositivo TX inicia el envío de un paquete de datos y espera que finalice su transmisión. Luego, cambia al estado de recepción RX durante 130[ $\mu$ s] en espera del acuse de recibo enviado por el dispositivo que recibió la información. Si el dispositivo TX recibe ese comprobante, emite la interrupción IRQ y pasa a modo stand-by. En caso contrario, vuelve a repetir el proceso.
- El dispositivo en modo RX, monitoriza el aire constantemente hasta encontrar un paquete válido, es decir, que tenga la dirección esperada y un CRC correcto. Si esto ocurre, se activa la interrupción IRQ y se cambia al estado de transmisión durante 130 [ $\mu$ s] para enviar el acuse de recibo (un identificador del paquete de datos).

### 3.1.7.2. Funcionalidad MultiCeiver

El nRF24L01+ dispone de un canal transmisión y de 6 canales de recepción, que le permiten recibir datos de 6 dispositivos diferentes, cuyo origen está identificado por la dirección del paquete. De esta manera, a pesar de que sólo es posible la comunicación por una única dirección a la vez, establecer una red entre dispositivos es sencillo, ya que solamente es necesario reconfigurar el dispositivo transmisor. La siguiente ilustración muestra esta posible configuración entre un dispositivo receptor y seis transmisores, todos trabajando a la misma frecuencia. La Figura 3.10, muestra un ejemplo de una posible asignación de las direcciones de los módulos.

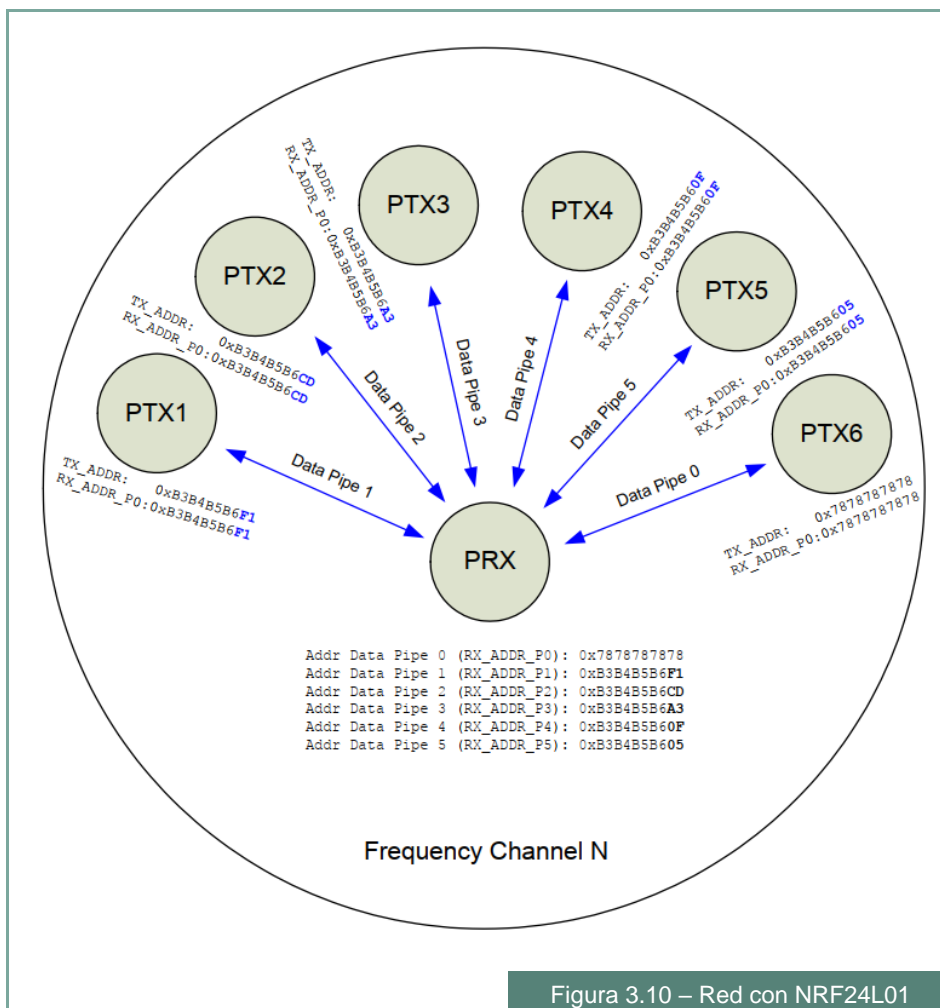


Figura 3.10 – Red con NRF24L01

### 3.1.7.3. Conexión del módulo al microcontrolador

Para acceder a los registros del nRF24L01+, se utiliza el protocolo SPI. Además, este integrado posee un pin adicional, CE, que se utiliza para cambiar entre el modo stand-by y los modos transmisión/recepción.

El pin IRQ, en el modo RX, genera una señal de interrupción cuándo se ha recibido un paquete y; en el modo TX, cuándo se ha finalizado el envío de información (ya sea porque el dispositivo RX lo ha recibido o porque se ha alcanzado un número máximo de retransmisiones permitidas).

### 3.1.7.4. Configuración del modulo

Se establecen las siguientes configuraciones de funcionamiento:

- Se escriben las direcciones de transmisión y recepción
- Se habilita el modo Auto- Acknowledgement
- Se habilita el Pipe0
- Se configura un tiempo de espera de 500 [ $\mu$ s] entre repeticiones.
- Se establece el número máximo de repeticiones en 10
- Se selecciona el canal de RF numero 40
- Se habilita un CRC de 2 bytes
- Se selecciona una tasa de transmisión de 2 [Mbps]
- Se selecciona una potencia de transmisión de 0 [dBm]

La configuración de registros para los otros nodos pertenecientes a la misma red, es igual, solo se debe modificar el número de Pipe habilitado y asignar la dirección correspondiente.

Para la potencia y tasa de transmisión seleccionadas, el módulo posee un consumo de 11.3 [mA] en modo TX y 13.5 [mA] en modo RX. Sin embargo, se puede disminuir el consumo a 0.9 [ $\mu$ A] habilitando el modo Power Down.

### 3.1.8. Placa de circuito impreso (PCB)

Uno de los objetivos principales fue lograr un diseño compacto, para lo cual se optó por el uso de componentes SMD y una placa doble faz. Las dimensiones finales de la placa son 30 [mm] x 55 [mm].



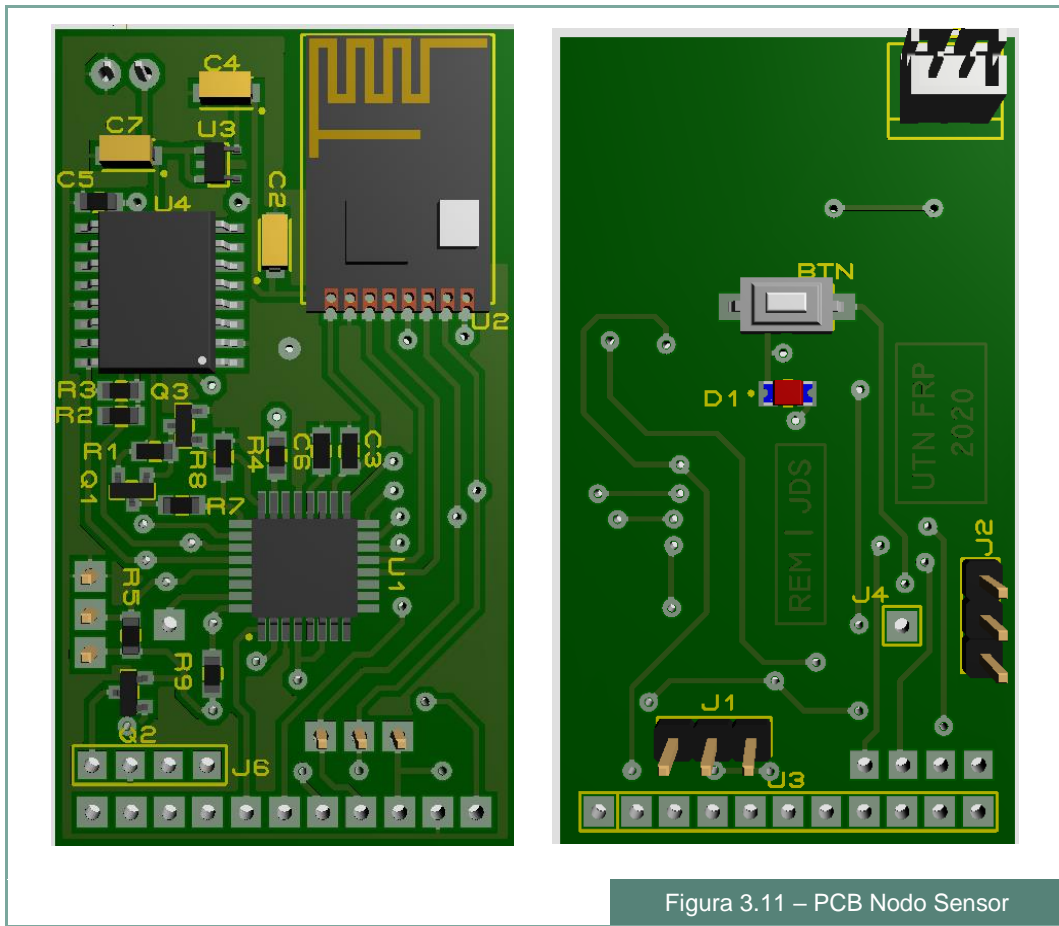
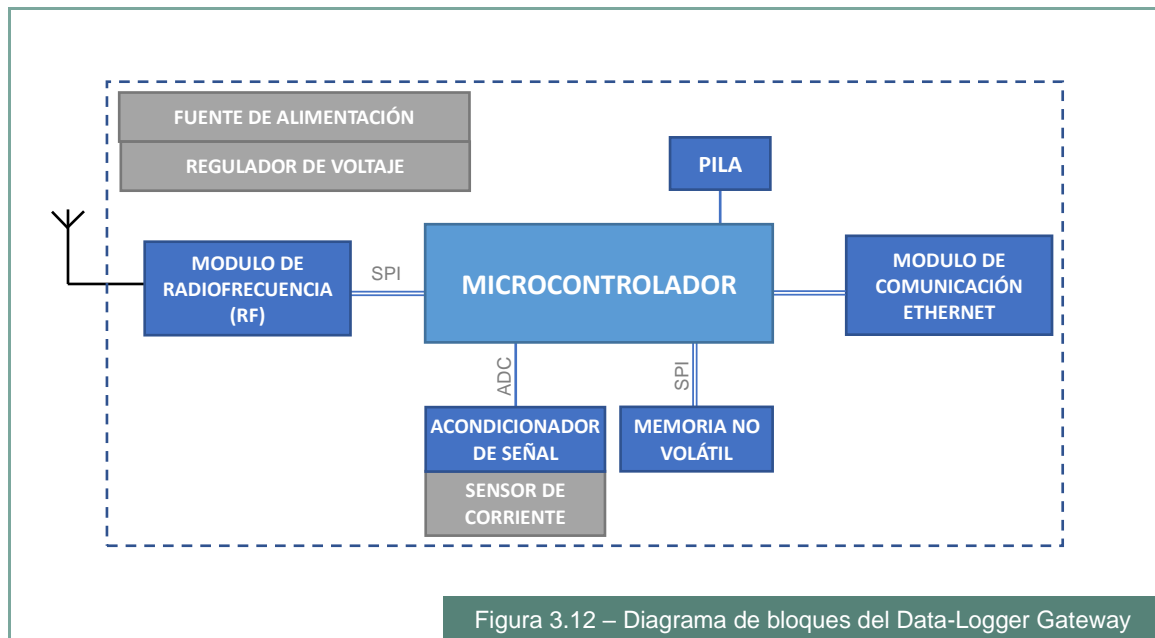


Figura 3.11 – PCB Nodo Sensor

### 3.2. Data-Logger Gateway

Es el responsable de recibir toda la información enviada por los nodos y capturar muestras de los sensores de corriente. Todos estos datos, son almacenados en una memoria no volátil, en función de la fecha en que fueron capturados. También, el Gateway deberá enviar la información solicitada por el software de análisis, cuando este lo requiera.

En la Figura 3.12 se observa un diagrama general del Data-Logger Gateway.



En el diagrama anterior, se observa la presencia de una pila. Su función es mantener energizado el reloj de tiempo real (RTC) interno del microcontrolador, ante la pérdida de energía externa. Con ello, se garantiza la sincronización horaria del sistema en todo momento.

La lógica de funcionamiento, será:

- El microcontrolador configura los ADC para lectura de los sensores de corriente
- El microcontrolador configura los periféricos para que estén listo para trabajar
- El microcontrolador configura la alarma en el RTC, la cual activa la interrupción que habilita un timer para lectura de sensores de corriente.
- El microcontrolador espera la recepción de un paquete UDP por parte del gestor. Al recibir un paquete este lo identifica, procesa y responde acorde a lo solicitado por el gestor.
- El microcontrolador espera una interrupción al recibir datos provenientes de los nodos sensores. Al activarse esta interrupción el microcontrolador procesa y almacena los datos en la memoria SD.

Como se mencionó, el programa contara con diferentes interrupciones que serán descriptas a continuación:

- Interrupción al recibir datos RF: el módulo nRF24I01 al recibir datos activará una interrupción la cual se encargará en primer lugar de identificar a que nodo sensor

pertenecen los datos que está recibiendo. Cada nodo podrá pedir al Gateway su configuración, ya sea la hora y fecha actuales, así como también la hora a la cual debe realizar la toma de datos. Seguido de esto se procesarán los datos recibidos desde el nodo, los cuales pueden ser de aceleración o temperatura. En caso de tratarse de datos de aceleración los almacenará en un primer buffer, al llenarse el primer buffer los datos recibidos por RF se empezarán a almacenarse en un buffer secundario, mientras que los datos guardados en el primero serán escritos en la memoria SD. Esto se hace con el propósito de no perder datos recibidos mientras se escribe la memoria SD. Para el caso que los datos recibidos sean de temperatura solo se utilizara un buffer debido a que la cantidad de datos es menor.

- Interrupción para lectura de corriente: el programa contara con una interrupción que se activa mediante una alarma utilizando el RTC interno del microcontrolador. Al activarse esta interrupción se setea nuevamente la alarma para que se vuelva ejecutar dentro de 24 horas, y además habilita otra interrupción, la cual utiliza un timer, para realizar la lectura de 2048 datos de corriente por fase. Una vez realizada la lectura de esta cantidad de datos, se almacenan en la memoria SD y se detiene la interrupción por timer. Este ciclo se repite la siguiente vez que se activa la alarma antes mencionada.

### 3.2.1. Fuente de alimentación. Regulador de voltaje

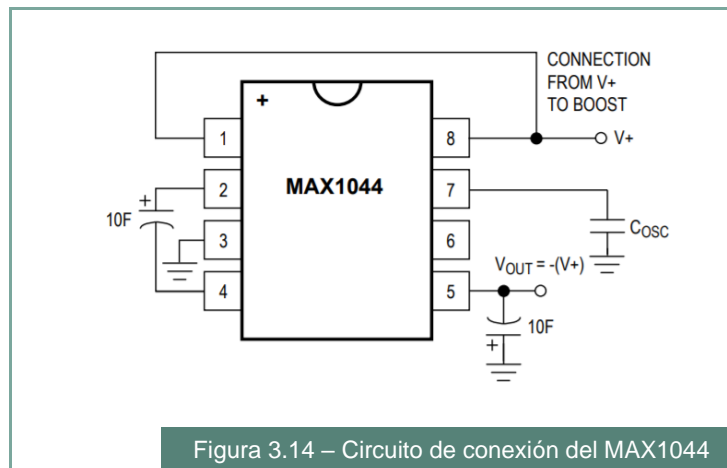
Se utiliza una fuente de alimentación compacta que integra todo lo necesario para su funcionamiento, con una entrada de 220 [VAC] y una salida de corriente continua regulada y estabilizada a 5 [V], entregando una corriente de hasta 600[mA].



Figura 3.13 – Fuente de alimentación

#### 3.2.1.1. Fuente de tensión negativa.

Es necesario contar con una tensión negativa para el adecuado funcionamiento de los amplificadores operacionales. Para obtener la tensión de -5[V] a partir de la tensión positiva, se utiliza el circuito integrado MAX1044, capaz de entregar una corriente máxima de 10 [mA] con una caída de tensión de 100[mV].



### 3.2.2. Microcontrolador

El microcontrolador STM32F103C8T6 será el responsable de gestionar los periféricos, realizar lecturas analógicas y ejecutar la lógica de control del Data-Logger Gateway. Entre sus características, se destacan:

- Arquitectura: ARM Cortex M3 32-bit
- Frecuencia máxima: 72 [MHz]
- Memoria FLASH: 64 [kB]
- Memoria SRAM: 20 [kB]
- Tensión de trabajo: 2.0 [V] a 3.6 [V]
- Comunicaciones: 3 x USART, 2 x I<sup>2</sup>C, 2 x SPI, CAN, USB
- Timer: 3x 16 bit
- ADC: 12 bits

Se utiliza la placa de desarrollo de la Figura 3.16, la cual contiene los componentes necesarios para su funcionamiento, conectores y LEDs indicadores.



La placa de desarrollo, integra un cristal de 8 [MHz], utilizado para el funcionamiento de la CPU y los periféricos internos del microcontrolador y, además, un cristal de 32.768 [kHz] para el funcionamiento del RTC interno. La placa incorpora un regulador de 3.3 [V] y

los capacitores de desacople necesarios para su funcionamiento, por lo que puede energizarse con 5 [V].

### 3.2.2.1. Interfaz SPI

El microcontrolador posee 2 interfaces SPI. La interfaz SPI-2, es utilizada para acceder a la memoria no volátil y, la interfaz SPI-1, para acceder a los registros internos del módulo de comunicaciones por RF y el módulo de comunicaciones Ethernet. De esta manera, se optimiza el almacenamiento y lectura de datos en memoria, evitando tener que cambiar el dispositivo que accede al bus SPI.

### 3.2.2.2. Modulo ADC (Analog-Digital Converter)

Para realizar las lecturas analógicas, el microcontrolador posee dos módulos ADC, accesibles desde 10 canales externos. De los cuales, serán utilizados 3, para la adquisición de datos de los sensores de corriente. Para realizar el muestreo, se configura el disparo del ADC por Timer y, para indicar la finalización de la conversión, se utiliza una interrupción.

El Timer, tiene configurado un periodo de 100 [ $\mu$ s], con lo cual se obtiene la frecuencia de muestro de 10[KHz].

### 3.2.2.3. Modulo DMA (Direct Memory Access)

Para optimizar el funcionamiento del sistema durante la adquisición de datos del ADC, se habilita el uso del módulo DMA. Esto, permite mover directamente los resultados de la conversión del ADC a la memoria flash del microcontrolador, sin intervención de la CPU y, en consecuencia, reduciendo el tiempo de la operación.

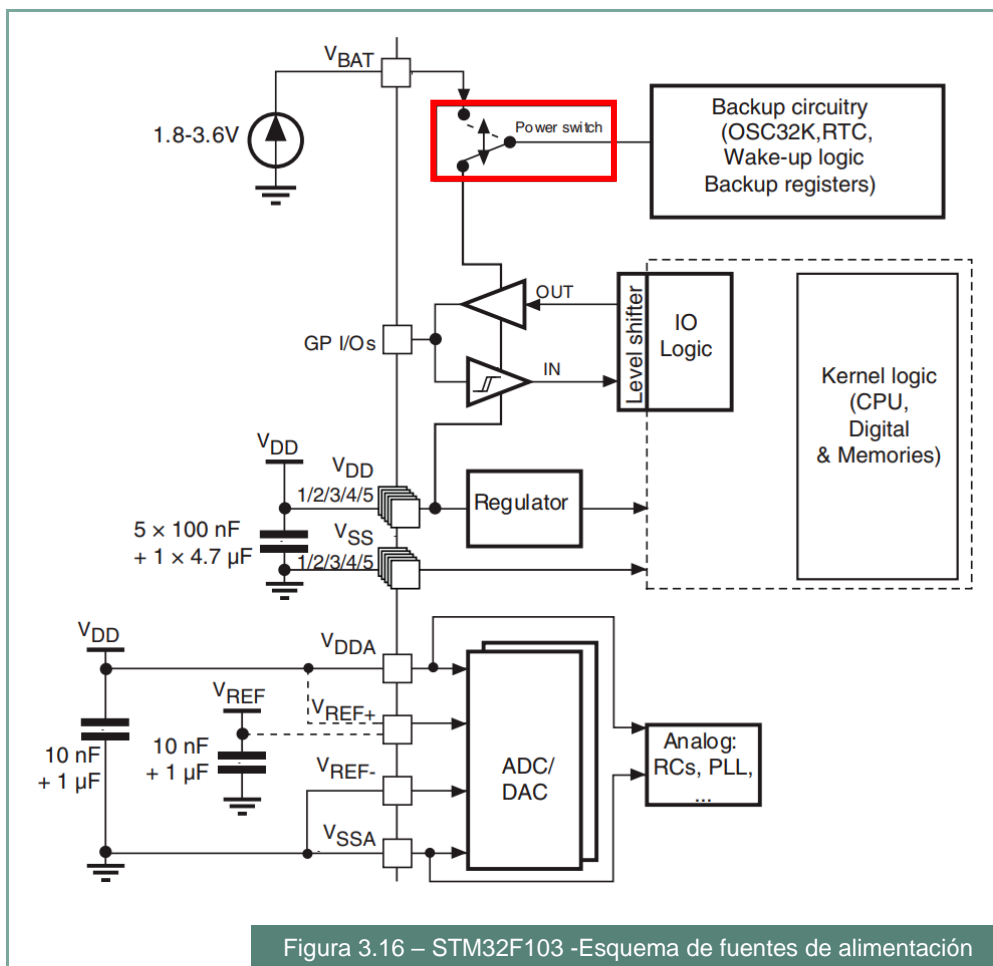
Para su configuración, se debe definir el lugar en la memoria flash donde se alojará el buffer y su tamaño. Además, se habilita:

- **Autoincremento de la dirección de memoria:** Luego de guardar un dato en el buffer, automáticamente se avanza a la siguiente posición de memoria, en espera de que finalice la siguiente conversión.
- **Modo circular:** Cuando el DMA almacena un dato en la última posición del buffer, automáticamente se posiciona en la posición inicial del buffer.
- **Interrupción:** Se genera cuando se completa la mitad del buffer o todo el buffer

La generación de la interrupción por parte del DMA, nos permite dividir el buffer a la mitad y simular el comportamiento de un doble buffer. De manera que, mientras el DMA llena una mitad del buffer, podemos almacenar la otra mitad en memoria no volátil, sin preocuparnos de que exista sobrescritura y pérdida de datos.

### 3.2.2.4. Real time clock (RTC)

El microcontrolador STM32F103, posee un reloj de tiempo real (RTC) interno que se alimenta desde la tensión VDD, y ante su ausencia, conmuta internamente al pin VBAT. Para el funcionamiento del RTC, se utiliza un cristal externo de 32.768 [kHz].



El pin VBAT soporta tensiones entre 1.8 [V] y 3.6 [V]. Por lo tanto, para mantener energizado el RTC y conservar la sincronización horaria en ausencia de alimentación externa, se conecta una pila CR2032 que posee una tensión de 3[V].

La capacidad típica de estas pilas es de 220 [mAh]. Considerando que el microcontrolador consume 1.4[ $\mu$ A] por el pin VBAT, el equipo conservara la configuración horaria durante más de 10 años ante ausencia de alimentación externa.

### 3.2.3. Módulo de comunicaciones por RF

Al igual que los nodos sensores, el Data-Logger Gateway contará con un módulo tranceptor nRF24L01+, el cual recibirá los datos enviados por todos los nodos.

Existen algunas diferencias en cuanto a la configuración del módulo, respecto a los nodos sensores, las cuales son:

- Se habilita la generación de interrupción ante la recepción de nuevos datos.
- No se hace uso de los modos de ahorro de energía
- Se definen las direcciones de recepción y tamaño de payload para poder recibir datos desde cualquiera de los 6 nodos
- Por defecto, el módulo se encuentra configurado como receptor. Cuando se debe enviar información a determinado nodo, se cambia a modo transmisor y se modifican

las direcciones de transmisión y recepción con la dirección del nodo para establecer la comunicación. Luego, se vuelve a modo receptor.

#### 3.2.4. Sensor de corriente

Para la medición de la corriente, se optó por la utilización de un transformador de corriente, puesto que, proporciona tres ventajas clave: aislamiento del voltaje de línea; medición de corriente sin pérdida y cierta inmunidad al ruido.

Se ha seleccionado un transformador de corriente de núcleo partido SCT-013-100, fabricado por la empresa YHDC, que entregan una salida proporcional a la corriente circulante por el centro del sensor, en relación 100[A]: 50[mA].

Entre las características técnicas del sensor, tenemos:

- Agujero pasante: 13 [mm] de diámetro
- Rango de frecuencia: 50[Hz] – 1.5[KHz]
- Entrada nominal (rms): 100[A]
- Entrada máxima: 120[A]
- Salida nominal: 0 - 50[mA]
- Exactitud:  $\pm 1\%$



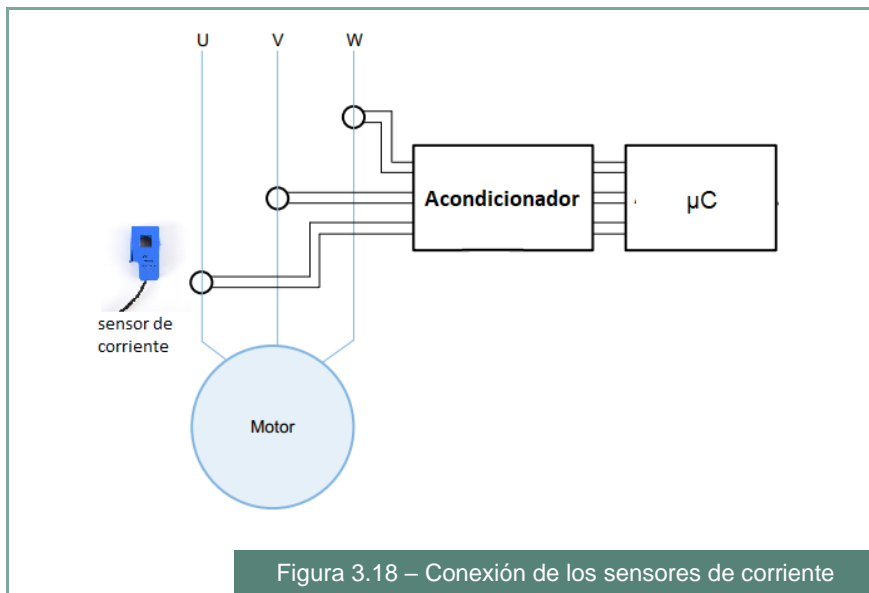
Figura 3.17 – Sensor de corriente

El transformador de corriente tiene un rango de 0 a 100[A], con una salida de 0 a 50[mA] en su secundario. De esta manera, la relación de transformación es de 2000:1.

Parámetros de diseño:

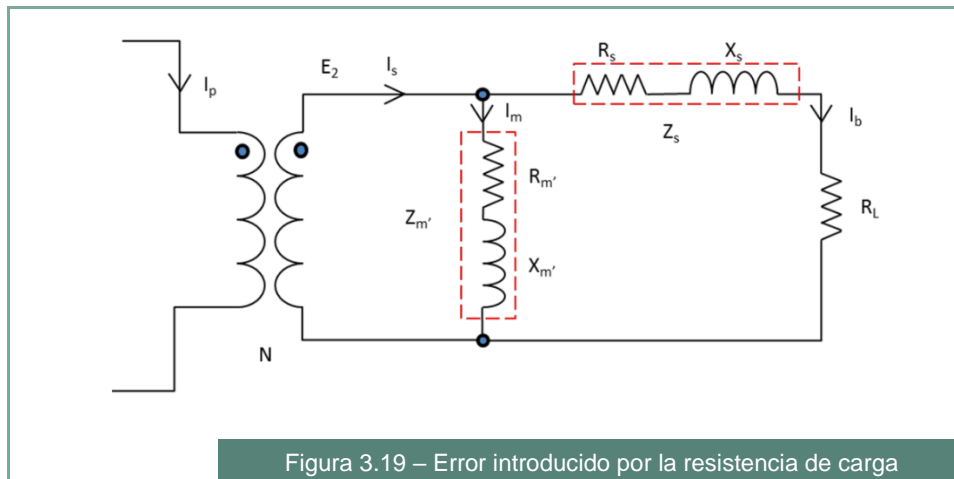
- Corriente eficaz máxima en el primario: 15[A].
- Frecuencia máxima de la señal 500[Hz]
- Frecuencia de muestreo: 10[kHz]
- Filtro DM: 100[kHz]

Los sensores de corriente serán cableados hasta el Gateway, donde la señal será previamente acondicionada y procesada por el microcontrolador.



### 3.2.4.1. Circuito acondicionador de señal

Para poder convertir la corriente entregada por el secundario del transformador en una tensión, se utiliza una resistencia de carga (*burden resistor*). La selección de dicha resistencia debe ser cuidadosa debido a que afecta la precisión del CT; cuando se incrementa su valor, la exactitud de la medición disminuye. Para demostrar lo dicho, consideremos la Figura 3.19, donde se observa que la impedancia magnética del núcleo se encuentra en paralelo con la resistencia de carga. Cuando se incrementa el valor de  $R_L$ , aumenta la corriente  $I_m$ , obteniendo un error de medición y una alinealidad para todo el rango de medición.



Si elegimos un valor pequeño de  $R_L$ , tenemos una excursión de voltaje muy pequeña. En consecuencia, debemos introducir una etapa amplificadora para obtener una mejor SNR. Un amplificador inversor, tendría errores debido a la tensión de offset y la corriente de bias. Para obtener mejores prestaciones en cuanto a CMRR, se utiliza un amplificador de instrumentación AD623, cuyas características se detallan a continuación:

- Excursión de salida *rail to rail*:  $-V_s + 0,2$  a  $+V_s - 0,5$



- Ancho de banda:  $800[kHz]$  @  $G = 1$
- Offset de entrada:  $25[\mu V]$
- Error de ganancia:  $0,10\%$  @  $G = 10$

Comenzamos calculando la corriente pico que circula por el secundario, cuando la corriente eficaz en el primario es de  $20[A]$ .

$$I_s = \frac{I_p}{N} = \frac{20[A]\sqrt{2}}{2000} = 14,1[mA] \quad (13)$$

Fijamos la resistencia de carga en  $10[\Omega]$ , por lo tanto, la tensión en la misma será:

$$V_b = R_L I_s = 141[mV] \quad (14)$$

Debemos ajustar el rango dinámico de la señal al soportado por el ADC. De esta manera, limitamos la excursión de la señal entre  $0,1$  y  $3,2[V]$ . La amplitud máxima de la señal deberá ser de  $1,55[V]$ . La ganancia necesaria será:

$$G = \frac{V_{o(max)}}{V_b} = \frac{1,55[V]}{141[mV]} = 11 \quad (15)$$

La resistencia  $R_g$ , necesaria para obtener dicha ganancia es:

$$R_g = \frac{100[k\Omega]}{G - 1} = 10[k\Omega] \quad (16)$$

Recalculamos para un valor comercial de  $R_g = 10[k\Omega]$

$$G = \frac{100[k\Omega]}{R_g} + 1 = 11 \quad (17)$$

$$V_b = \frac{V_{o(max)}}{G} = 141[mV] \quad (18)$$

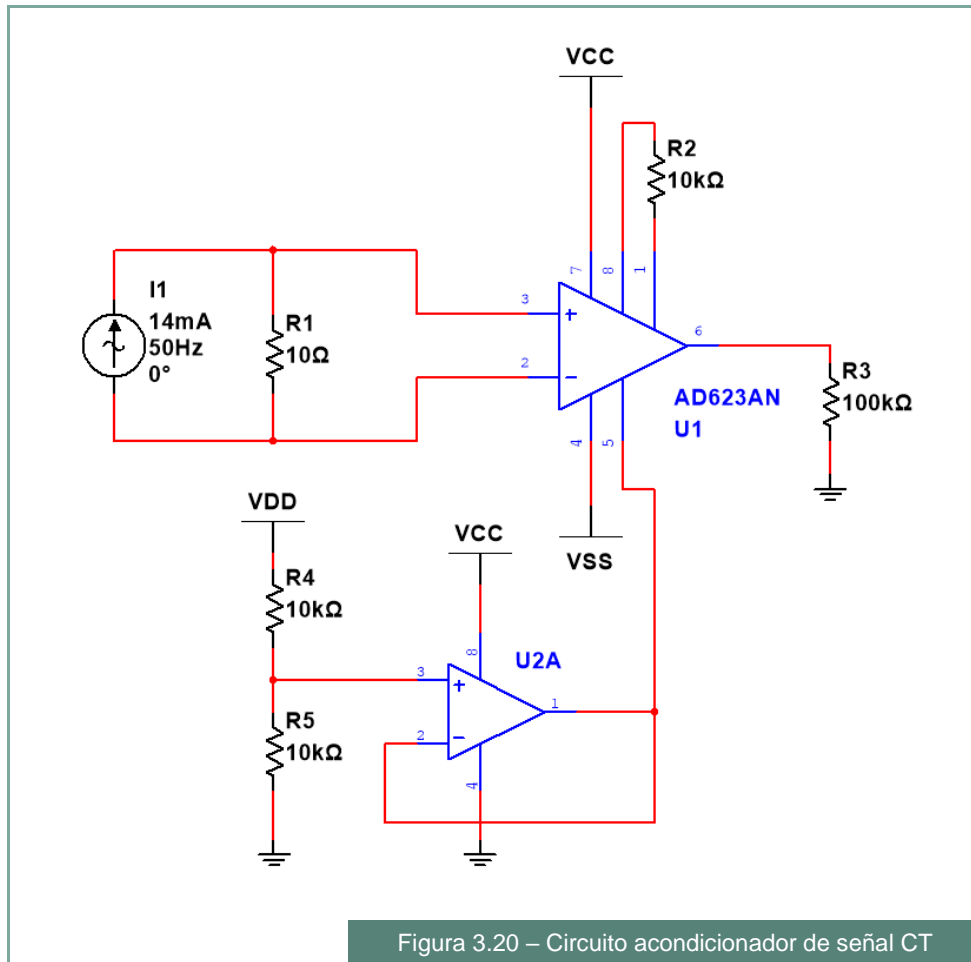
$$I_s = \frac{V_b}{R_L} = 14,1[mA] \quad (19)$$

$$I_p = I_s N = 28,2[A] \quad (20)$$

$$I_{p(rms)} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} = 19,9[A] \quad (21)$$

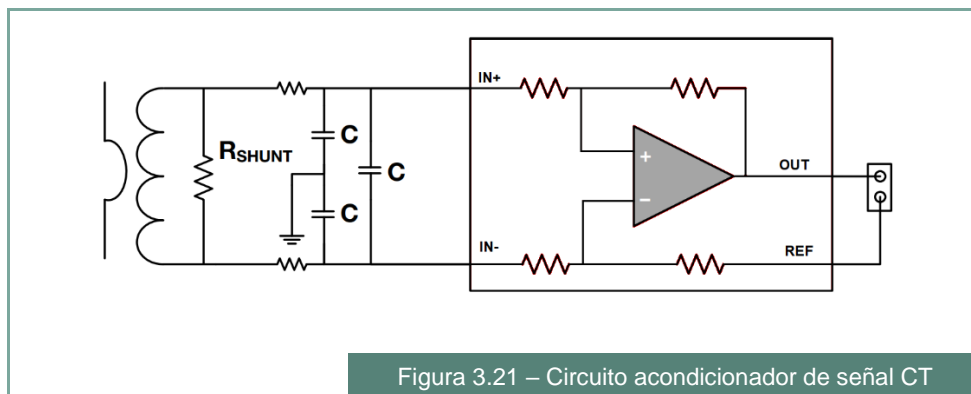
De esta manera, con la configuración del circuito mostrado a continuación, podemos medir corrientes pico de hasta  $28[A]$ .

Como tensión de referencia, se utiliza un divisor de voltaje con buffer.



### 3.2.4.2. Filtro para rechazo de señales en modo común

El AD623 ofrecen una relación de rechazo de modo común de 100 dB (para  $G=10$ ), para las señales en modo común presentes en los terminales de entrada. Sin embargo, la relación de rechazo de modo común disminuye con la frecuencia. En consecuencia, una señal de RF puede ser rectificadora por la etapa de entrada del amplificador y luego aparecer como un error de offset. Las señales de alta frecuencia se pueden filtrar con una red R-C pasa bajo colocada a la entrada del amplificador de instrumentación como se ve en la imagen siguiente:



La frecuencia de corte del filtro diferencial está dada por:

$$f_{DM} = \frac{1}{2\pi R(2C_D + C_C)} \quad (22)$$

Donde  $C_D \geq 10 C_C$

El ancho de banda del filtro diferencial debe ser al menos 100 veces el ancho de banda de la señal de entrada.

Seleccionando:

$$C_D = 3.3[nF]$$

$$C_C = 100[pF]$$

$$R = 220[\Omega]$$

Se obtiene:

$$f_{DM} = \frac{1}{2\pi R(2C_D + C_C)} \cong 106[kHz] \quad (24)$$

### 3.2.4.3. Filtro anti-aliasing

Para obtener un filtro de bajo orden y sencillo de implementar, se utiliza la técnica del *oversampling*, la cual consiste en muestrear la señal de entrada a una frecuencia mucho mayor a su ancho de banda. De esta manera, la frecuencia de Nyquist, también será elevada y se podrá utilizar un filtro con un corte menos agudo.

El ancho de banda de interés de la señal analógica está comprendido entre 0 [Hz] y 1 [kHz]. La señal será muestreada a una frecuencia de 20 [kHz]. Para evitar el aliasing se debe obtener una atenuación de -74[dB] (para un ADC ideal de 12 bits) a 10 [kHz].

Se usarán tres parámetros de diseño para implementar el filtro anti-aliasing:

- La frecuencia de corte para el filtro debe ser de 1 [kHz] o superior.
- El filtro atenúa la señal a -74[dB] a 10 [kHz].
- La señal analógica solo será filtrada, no será amplificada ni invertida.

El filtro se diseña con el software Filter Solutions, utilizando la siguiente configuración:

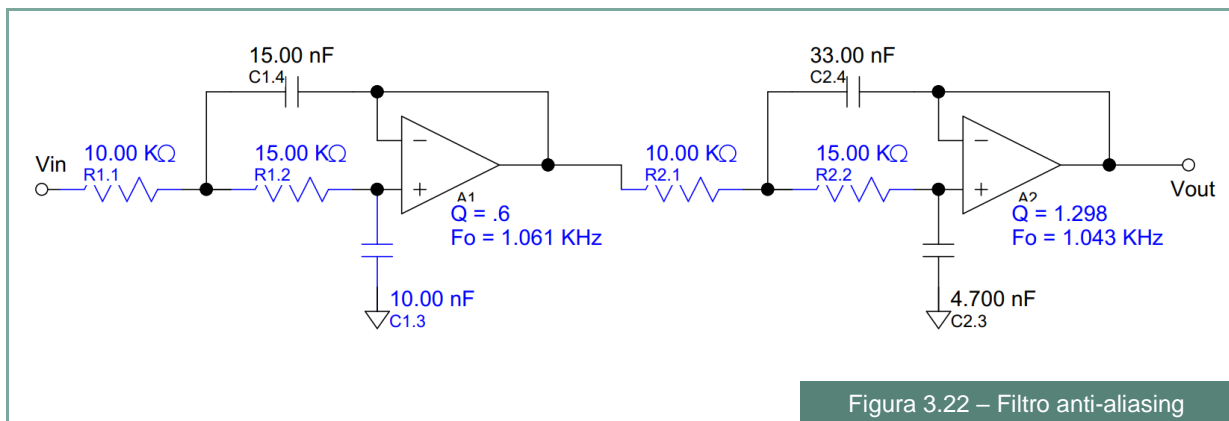


Figura 3.22 – Filtro anti-aliasing

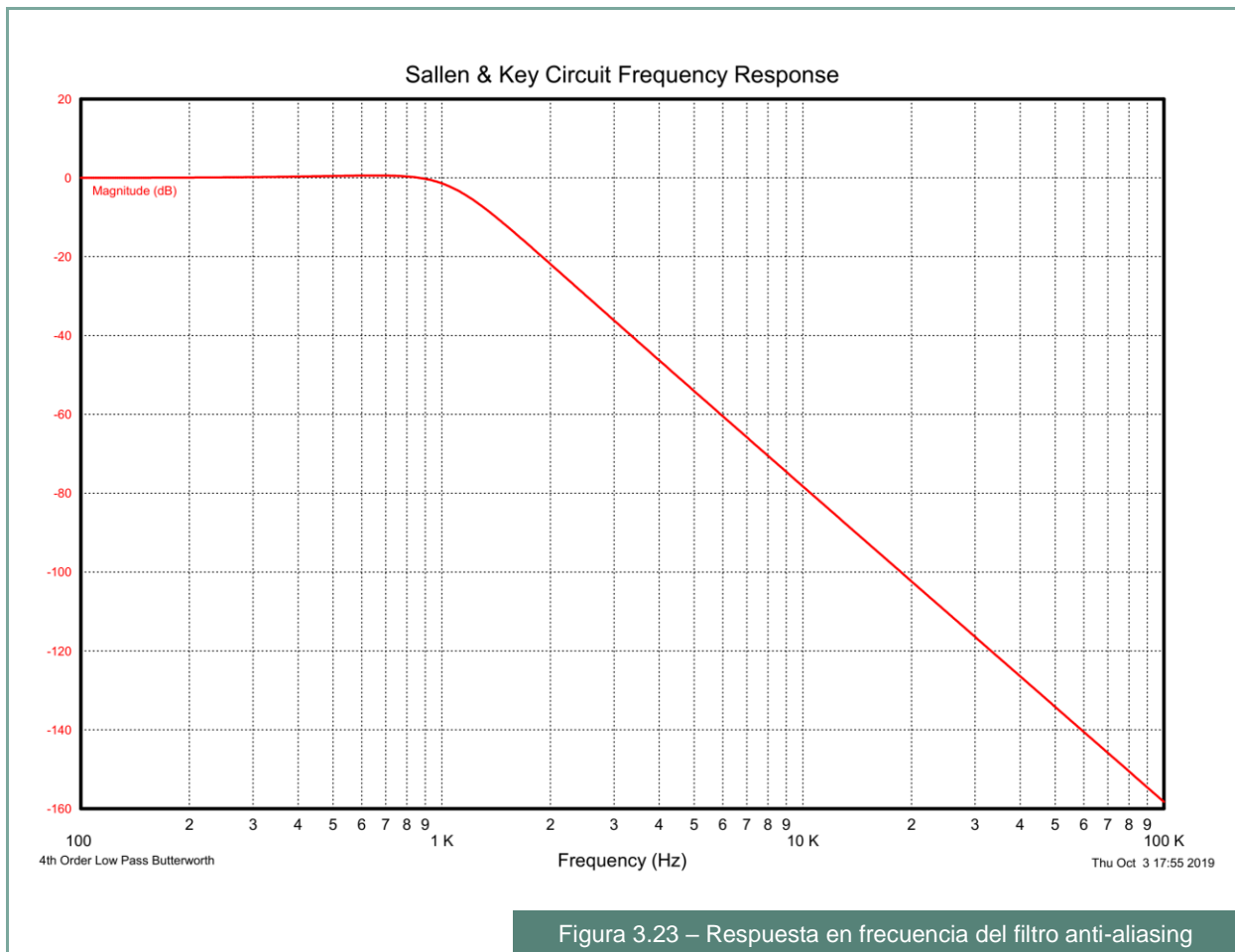


Figura 3.23 – Respuesta en frecuencia del filtro anti-aliasing

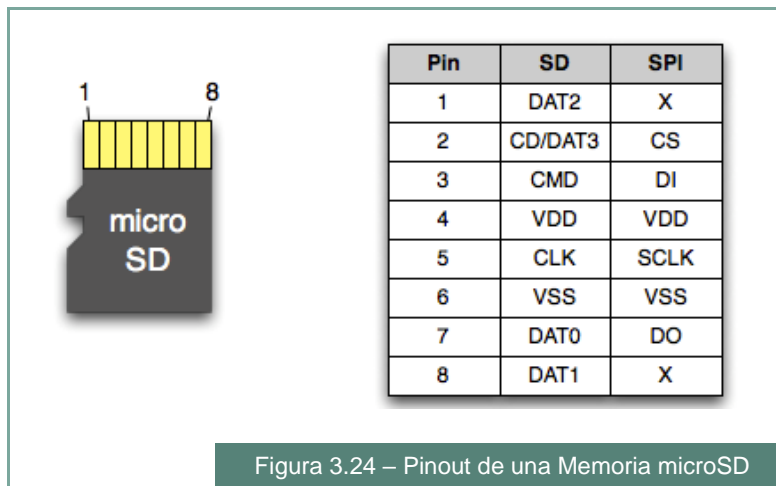
#### 3.2.4.4. Memoria no volátil.

Teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento, reducido tamaño y baja carga para el microcontrolador, se hará uso de una memoria microSD como medio de almacenamiento de datos no volátil.

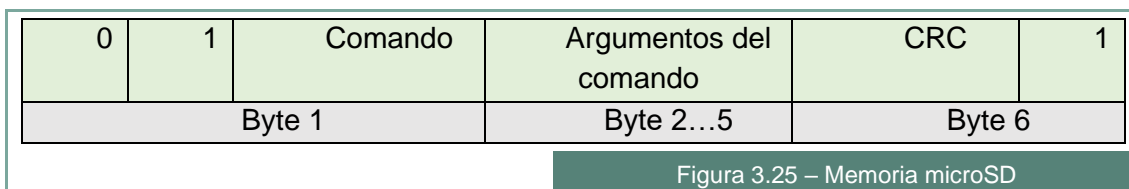
Los datos serán almacenados sin utilizar un formato específico (FAT16 o FAT32), sino que, se accederá directamente a los bloques de memoria de 512 Bytes. Debido a esto, los datos no pueden ser visualizados como archivos, introduciendo la memoria SD en un lector de una PC. Pero, nos permite más flexibilidad en cuanto a la forma de organizar los datos y un mayor aprovechamiento del espacio disponible.

Las memorias microSD pueden ser alimentadas con un voltaje de entre 2.7 [V] y 3.6 [V]. Internamente, la tarjeta posee chips de memoria flash como medio de almacenamiento y un microcontrolador que gestiona estos recursos.

El pinout de la memoria puede observarse en la Figura 3.24.



El acceso a la memoria para lectura y escritura se realizará mediante la interfaz SPI. Un comando valido consta de 6 Bytes, con el formato indicado en la figura.



- **Comando:** Este valor resulta de la suma del número de comando y el numero 64 (0x40).
- **Argumentos del comando.** Estos argumentos generalmente contienen la dirección de un dato o la longitud de un bloque.
- **CRC.** Es un código de detección de errores.

Los comandos más utilizados son:

- **Comando 0 (CMD0):** Reset de la memoria
- **Comando 1 (CMD1):** Inicialización de la memoria
- **Comando 16 (CMD16):** Configuración del bloque de 512 bytes
- **Comando 17 (CMD17):** Lectura de un bloque de 512 bytes
- **Comando 24 (CMD24):** Escritura de un bloque de 512 bytes
- El primer byte es la suma del número de comando y el número 64

Una vez enviado el respectivo comando, la memoria responde el resultado de la operación por medio de un registro llamado R1. La memoria debe responder con 0x00 para todos los comandos, excepto el comando 0 (CMD0), donde la memoria responde con 0x01 debido a su estado inicial.

Para inicializar la memoria se debe seguir la siguiente secuencia:

- Enviar el comando CMD0, para entrar en modo SPI.
- Enviar el comando CMD1, para comenzar el proceso de inicialización de la memoria.
- Enviar el comando CMD16 para configurar el bloque de escritura y lectura, indicando en los argumentos el tamaño del bloque.

Para realizar una escritura de un único bloque debemos enviar el comando CMD24, indicando la dirección del bloque en el argumento.

Para realizar una lectura debemos enviar el comando CMD17, indicando la dirección del bloque en el argumento.

#### 3.2.4.4.1. Organización de los datos.

El ordenamiento de los datos en la memoria microSD se hará en función de la fecha en que fueron capturados. La segmentación de la memoria es rígida, donde los datos de determinado día calendario tienen reservados bloques de almacenamiento donde deben ser alojados. La fórmula matemática utilizada para ubicarlo, son:

$$\text{Bloque} = (\text{año} - 2020) * 125000 + (\text{mes} - 1) * 10000 + (\text{día} - 1) * 300$$

Ejemplo:

A modo de ejemplo, supondremos que recibimos un dato la fecha 04/10/2020. Realizando los cálculos, obtendremos:

$$\text{Bloque} = (2020 - 2020) * 125000 + (10 - 1) * 10000 + (4 - 1) * 300 = \mathbf{91200}$$

A partir de ese bloque, se guardarán los datos siguiendo la secuencia que se muestra en la siguiente tabla:

Bloques	Cantidad	Dato
<b>0 ... 24</b>	25	Aceleración N1
<b>25 ... 49</b>	25	Aceleración N2
<b>50 ... 74</b>	25	Aceleración N3
<b>75 ... 99</b>	25	Aceleración N4
<b>100 ... 124</b>	25	Aceleración N5
<b>125 ... 149</b>	25	Aceleración N6
<b>150</b>	1	Temperatura N1
<b>151</b>	1	Temperatura N2
<b>152</b>	1	Temperatura N3
<b>153</b>	1	Temperatura N4
<b>154</b>	1	Temperatura N5
<b>155</b>	1	Temperatura N6
<b>156 ... 199</b>	44	Reservado
<b>200 ... 299</b>	100	Corriente

Tabla 3.4 – Organización de datos en memoria SD

Utilizando una memoria microSD de 2 [GB], se podrán almacenar datos durante 30 años, específicamente, entre 2020 y 2050.

### 3.2.5. Módulo de comunicaciones Ethernet

La comunicación con el gestor (software de análisis), se llevará a cabo utilizando la red de área local (LAN) de la empresa donde se instale el equipo. Para ello, el Gateway contará con un puerto RJ45 para la conexión ethernet.

El Gateway recibirá paquetes UDP desde el software gestor y responderá a las solicitudes. Estos, pueden ser:

- Establecimiento de conexión
- Configuraciones de fecha y hora
- Configuración de alarmas de capturas de muestras
- Solicitud de datos de temperatura, aceleración o corriente; capturados en una fecha determinada

Para el establecer la conexión con la red Ethernet, se hará uso del módulo ethernet USB-ES1, que es controlado por el chip W5500. Este módulo cuenta con las siguientes características:

- Interfaz SPI de alta velocidad 80 [MHz].
- Admite hasta 8 puertos independientes.
- Soporta protocolo TCP, UDP, ICMP, IPv4, ARP, IGMP, PPPoE.
- Búfer interno de recepción de 32 [KB].
- Capa física Ethernet 10BaseT / 100BaseTX
- Voltaje de trabajo de 3.3 [V].
- WOL (Wake on LAN).
- Modo de apagado para reducir consumo de energía.

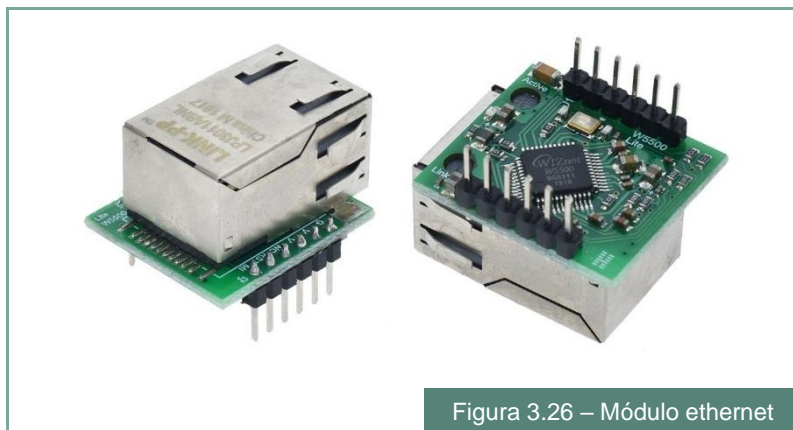
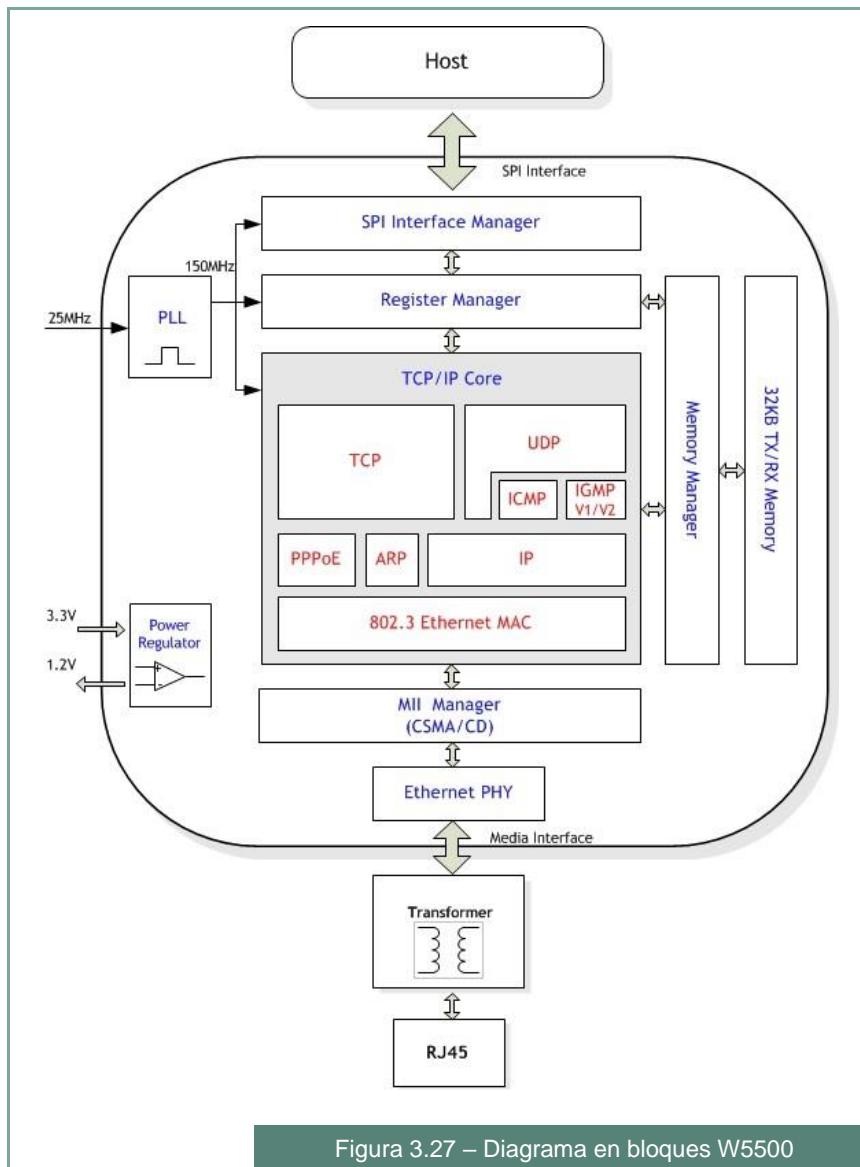


Figura 3.26 – Módulo ethernet



### 3.2.5.1. Configuración W5500

#### 3.2.5.1.1. Configuración básica

Para la operación del W5500, se deben utilizar los registros apropiados que se muestran a continuación:

- Mode Register (MR)
- Interrupt Mask Register (IMR)
- Retry Time-value Register (RTR)
- Retry Count Register (RCR)

#### 3.2.5.1.2. Configuración de información de red

Configuración básica de la información de red para la comunicación, debe configurarse la información básica de la red:

- SHAR (Registro de dirección de hardware de origen)
- GAR (Registro de dirección de puerta de enlace)



- SUBR (registro de máscara de subred)
- SIPR (registro de dirección IP de origen)

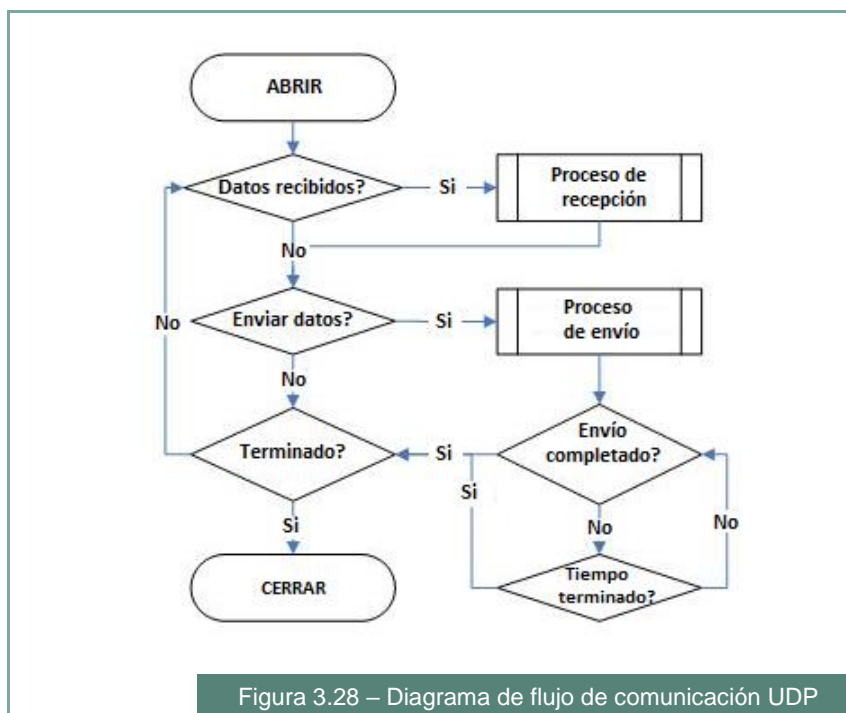
### 3.2.5.1.3. Establecer información de memoria de socket

Esta etapa establece la información de memoria de los puertos Tx/Rx. La dirección base y la dirección de la máscara de cada conexión se fijan y se guardan en esta etapa.

### 3.2.5.1.4. Transmisión de datos

Después del proceso de inicialización, W5500 puede transmitir y recibir los datos con otros 'abriendo' los puertos en modo TCP, UDP, IPRAW y MACRAW. El W5500 admite 8 conexiones que se pueden utilizar de forma independiente y simultánea. Para nuestro proyecto se configurará en modo UDP.

El UDP es un protocolo sin conexión. Se comunica sin establecer conexión previa. El protocolo TCP garantiza una comunicación de datos confiable, pero el protocolo UDP utiliza una comunicación de datagramas que no tiene garantías de comunicación de datos. Debido a que el UDP no establece una conexión previa, puede comunicarse con muchos otros dispositivos con la dirección IP del host y el número de puerto conocidos. Esta es una gran ventaja, comunicación con muchos otros utilizando solo un puerto, pero también tiene muchos problemas como la pérdida de datos transmitidos, datos no deseados recibidos de otros, etc. Para evitar estos problemas y garantizar la confiabilidad, el host retransmite los datos dañados o ignora los datos no deseados que se recibe de los demás. El protocolo UDP es compatible con la comunicación unicast, broadcast y multicast. Sigue el siguiente flujo de comunicación:

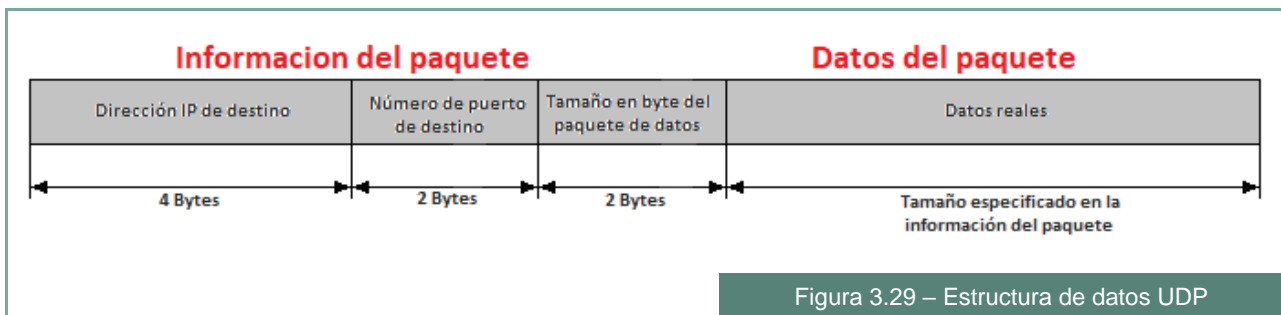


### 3.2.5.1.5. Unicast y Broadcast

Para la comunicación de datos UDP, se requiere la inicialización de un puerto; este se abre. El proceso de apertura del puerto es el siguiente. Al principio, se elige un puerto entre los 8 del W5500, luego se configura el modo de protocolo (Sn\_MR (P3: P0)) del puerto elegido y se configura el número de puerto de origen Sn\_PORT0 para la comunicación. Finalmente, se ejecuta el comando OPEN. Después del comando OPEN, el estado de Sn\_SR se cambia a SOCK\_UDP. Entonces se completa la inicialización del puerto.

### 3.2.5.1.6. Proceso de recepción

Se procesan los datos UDP recibidos en la memoria RX interna. La estructura de los datos UDP recibidos es la siguiente:



Los datos UDP recibidos constan de 8 bytes de información de paquete y un paquete de datos. El paquete de información contiene información del transmisor (dirección IP, número de puerto) y la longitud del paquete de datos. El UDP puede recibir datos UDP de muchos otros. El usuario puede clasificar el transmisor por la información del transmisor del paquete de información. También recibe el puerto de difusión utilizando la dirección IP "255.255.255.255". Por lo tanto, el host debe ignorar la recepción no deseada mediante el análisis de la información del transmisor. Si el tamaño de datos del puerto "n" es mayor que el tamaño libre de la memoria RX interna, el usuario no puede recibir esos datos y tampoco puede recibir datos fragmentados.

### 3.2.5.1.7. Proceso de envío

El tamaño de los datos que el usuario desea transmitir no puede ser mayor que la memoria interna de TX. Si es más grande que MTU, se divide automáticamente por unidad de MTU y se transmite. El Sn\_DIPR0 se establece en "255.255.255.255" cuando el usuario quiere transmitir. Para transmitir los siguientes datos, el usuario debe verificar que se haya completado el comando SEND anterior. Cuanto mayor sea el tamaño de los datos, mayor será el tiempo para completar el comando SEND. Por lo tanto, el usuario debe dividir adecuadamente los datos a transmitir.

### 3.2.5.1.8. Cierre del puerto

Si ya no se necesita la comunicación, se cierra el puerto con el comando CLOSE.

### 3.2.6. Placa de circuito impreso (PCB)

El diseño de esta placa no presentaba restricciones de tamaño, por lo que se optó por utilizar componentes through-hole, debido a que contábamos con amplificadores operacionales y demás componentes con esta tecnología de montaje. La placa integra todos los componentes necesarios para el funcionamiento del Data-Logger, tales como la fuente de alimentación, la pila, la memoria SD, entre otros. El tamaño final del diseño resultó de 100 [mm] x 120 [mm].

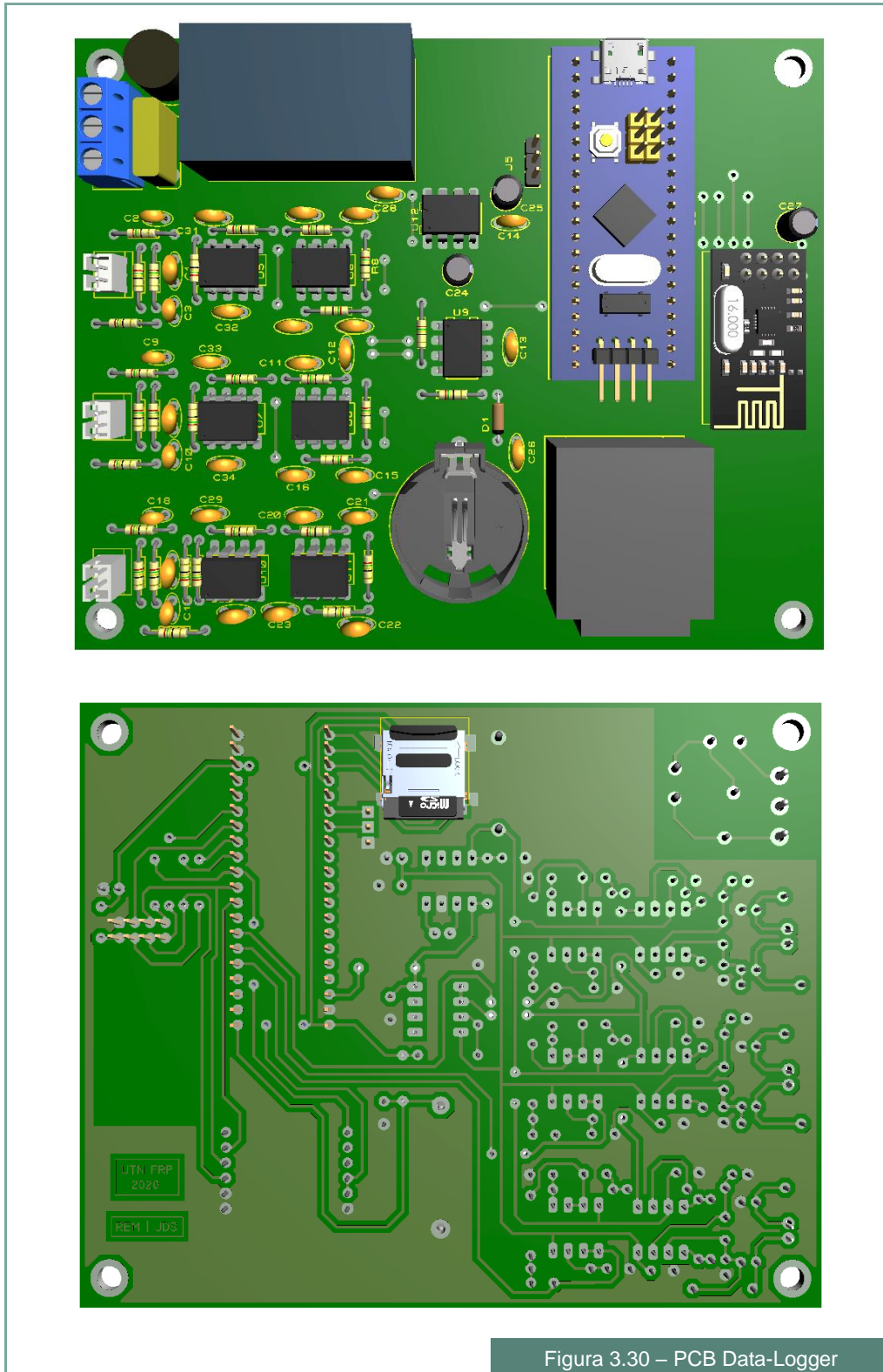


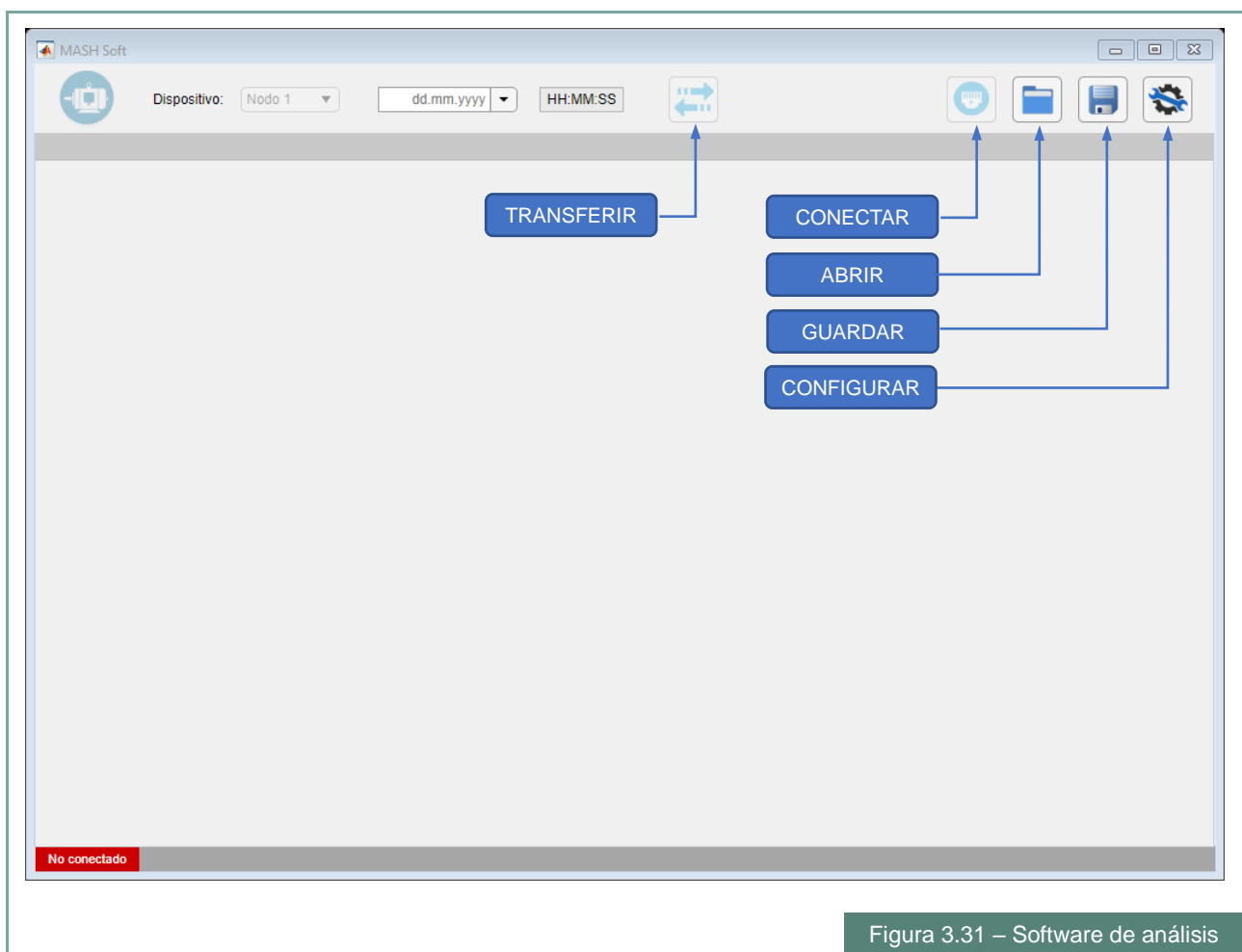
Figura 3.30 – PCB Data-Logger

### 3.3. Software de análisis: MASH Soft

El software fue desarrollado en App Designer, que es un entorno de MATLAB destinado a la creación de aplicaciones web y de escritorio. Este entorno de programación, integra las dos tareas principales en la creación de una app: la organización de los componentes visuales de una interfaz gráfica de usuario (GUI) y la programación del comportamiento de la app.

La gran ventaja de desarrollar la aplicación en App Designer, es la posibilidad de contar con las funciones y el motor de cálculo de MATLAB, lo que permite realizar cálculos muy potentes.

Una vez ejecutada la aplicación, se deben ajustar los parámetros del sistema, haciendo clic en el botón configurar.



A continuación, se abre una ventana donde se deben habilitar los nodos instalados e ingresar la información relacionada al motor que tendrán asociado, para permitir un correcto diagnóstico del estado de la máquina. Además, se debe configurar el horario de activación de las distintas alarmas para la captura de datos.

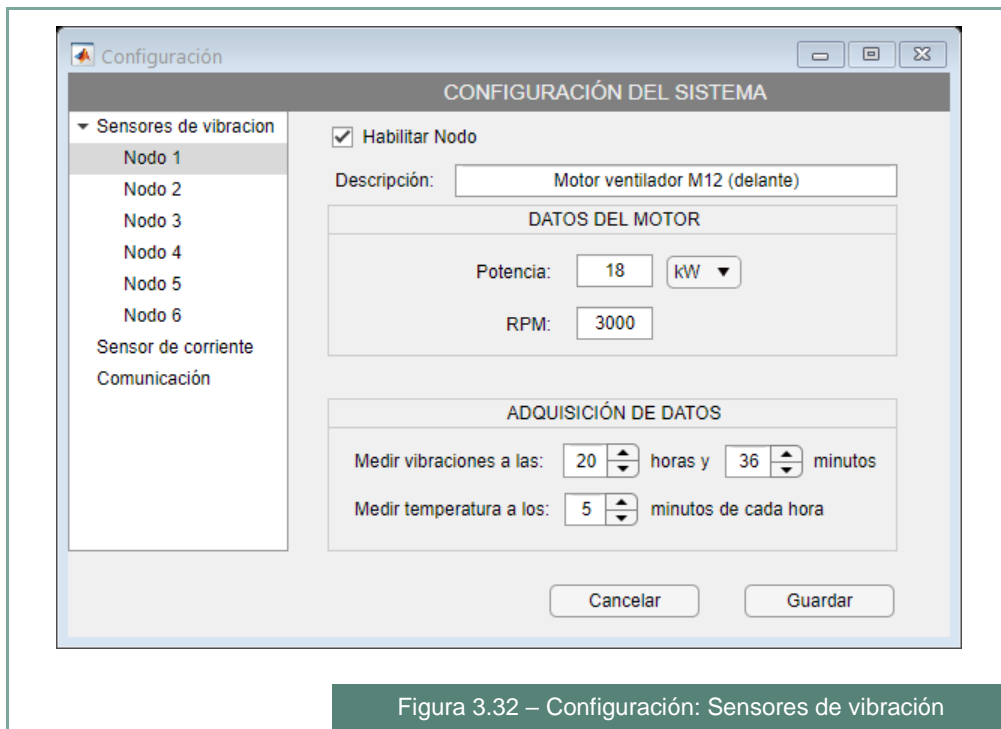


Figura 3.32 – Configuración: Sensores de vibración

En la sección **Sensor de corriente**, se configura la alarma para captura de datos de corriente.

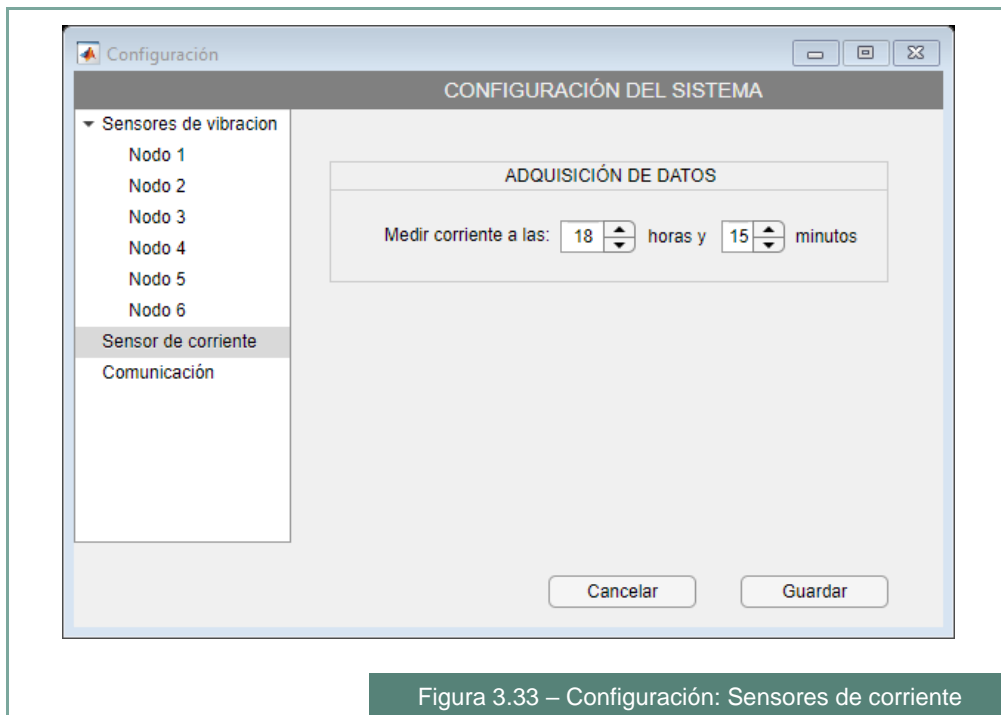
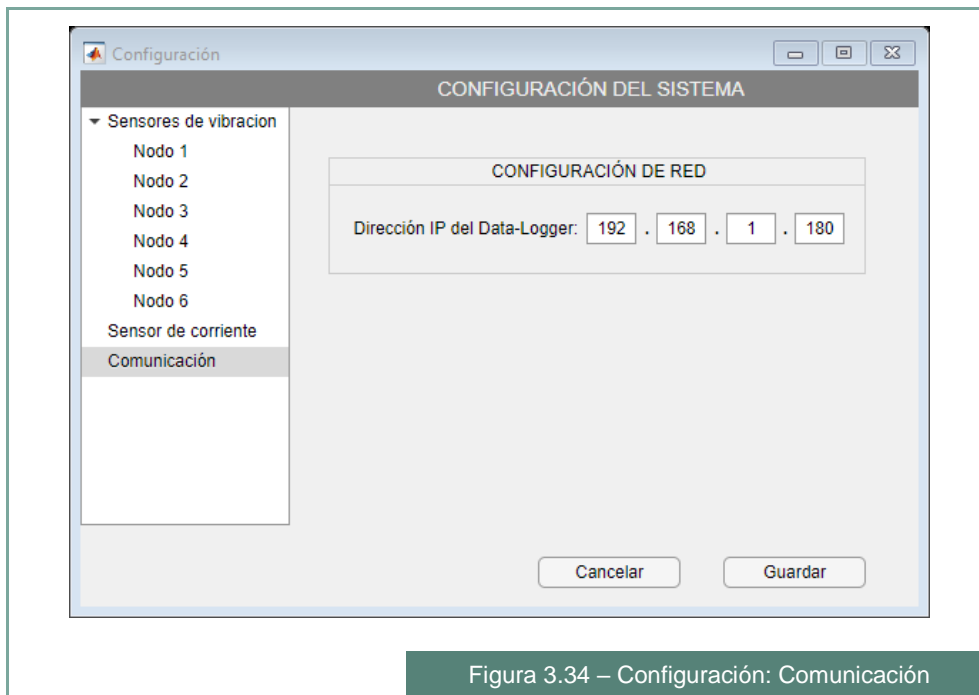


Figura 3.33 – Configuración: Sensores de corriente

Finalmente, en la sección **Comunicación**, es posible configurar la dirección IP del Data-Logger.



Para confirmar las configuraciones realizadas, se hace clic en **Guardar** y la ventana se cierra.

Luego, mediante el botón **Conectar**, el sistema intentara comunicarse con el Gateway para enviarle la información configurada anteriormente. Si la comunicación es exitosa, en la barra de estado aparecerá un recuadro verde con el mensaje “*Conectado*”.

De no ser así, aparecerá un mensaje: “*ERROR! MASH-20 Data-Logger no encontrado*”.

Luego, aparecerá en pantalla una tabla mostrando el estado general de los nodos, la fecha en la cual se recibió el último dato y el estado de la batería.

DISPOSITIVO	DESCRIPCIÓN	BATERÍA	ULTIMO DATO	ESTADO
NODO 1	Motor ventilador M12 (delante)	OK (3.97V)	30/10/2020	ACTIVO
NODO 2	Motor ventilador M12 (atras)	-	-	INACTIVO
NODO 3	Motor 3	-	-	INACTIVO
NODO 4	Motor 4	-	-	INACTIVO
NODO 5	Motor 5	-	-	INACTIVO
NODO 6	Motor 6	-	-	INACTIVO

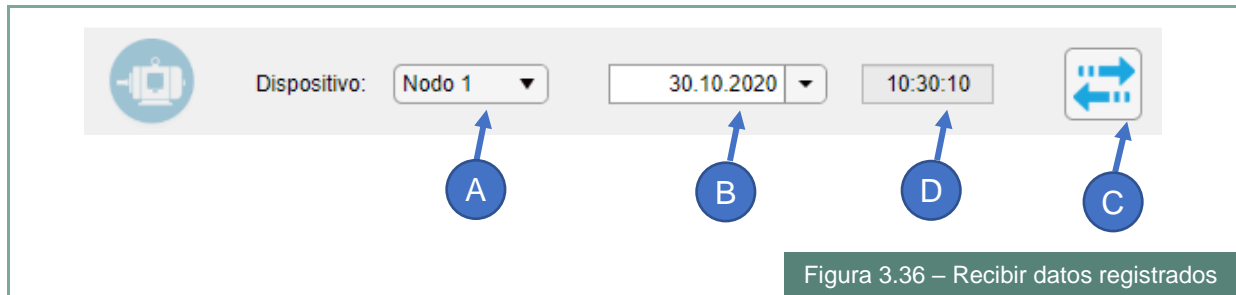
ESTADO DE LA CONEXIÓN CON EL DATA-LOGGER

Conectado

Figura 3.35 – Estado del sistema

Para analizar la información registrada, se debe:

- Seleccionar el nodo o sensor de corriente
- Seleccionar la fecha de interés
- Hacer clic en el botón **Transferir** y esperar a que finalice la recepción de los datos

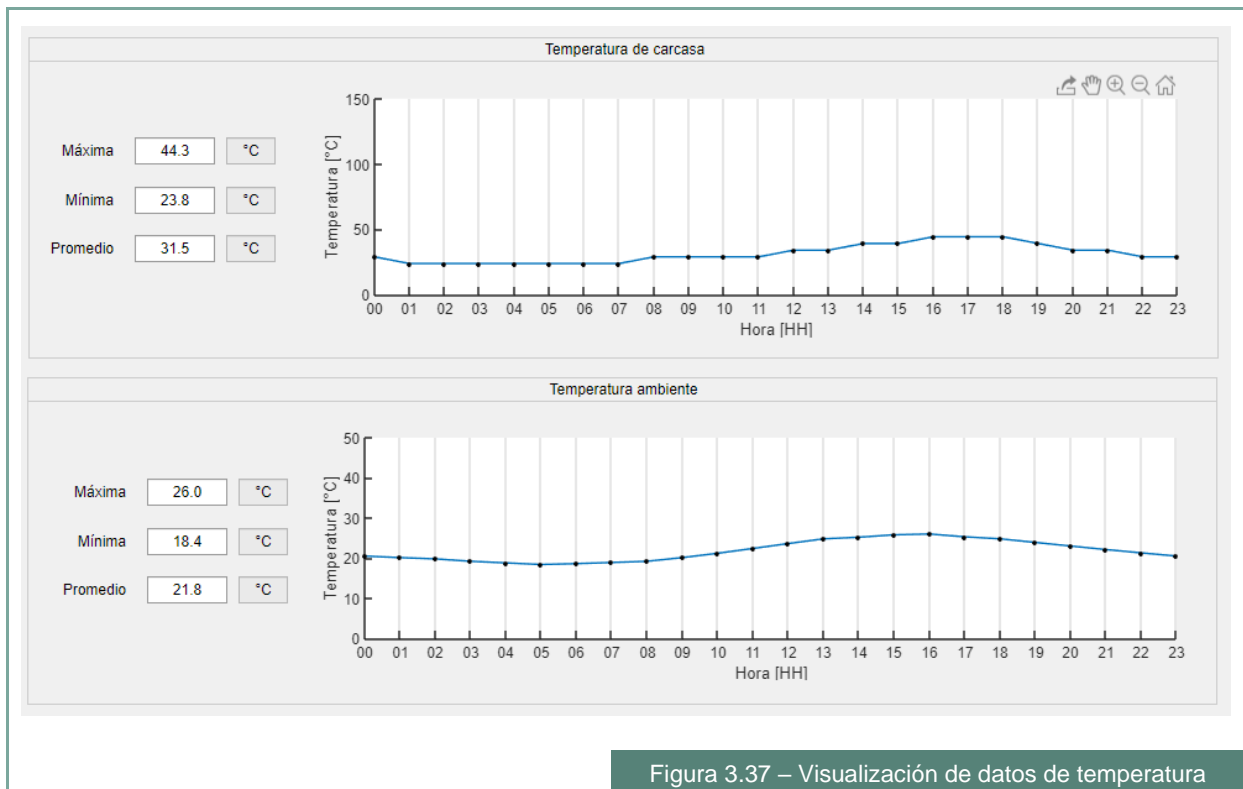


En el recuadro (D) aparecerá la hora en la cual fueron capturados los datos recibidos.

### 3.3.1. Selección de dispositivo: Nodo

Una vez completada la recepción de datos y su posterior procesamiento, aparecerán las pestañas con los resultados del análisis de los datos de vibración y temperatura.

En la pestaña **TEMPERATURA**, se observan dos gráficos con la evolución de las temperaturas de carcasa y ambiente, a lo largo del día.



En la pestaña **VIBRACIÓN - Análisis de severidad**, el sistema realiza un diagnóstico del estado de la máquina, considerando la información del motor configurada previamente y la velocidad de las vibraciones.



Figura 3.38 – Diagnostico según ISO 10816

Cabe mencionar, que el diagnóstico realizado es aplicable a un motor asíncrono trifásico estándar, funcionando bajo condiciones normales.

Además, se puede cambiar el eje de interés y visualizar los valores característicos de la aceleración, velocidad y desplazamiento de las vibraciones.

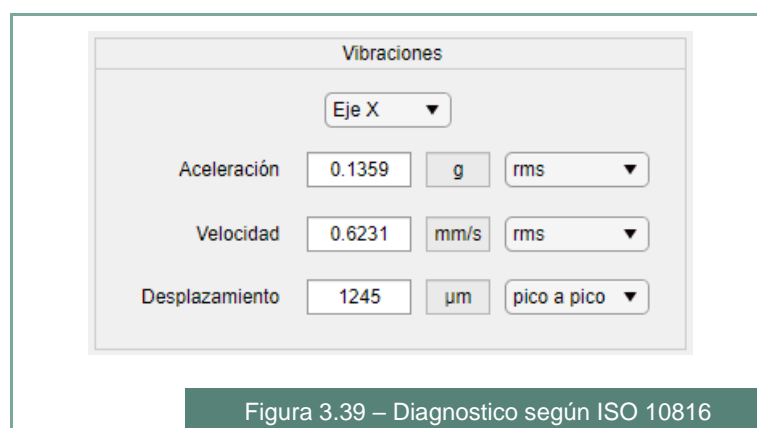


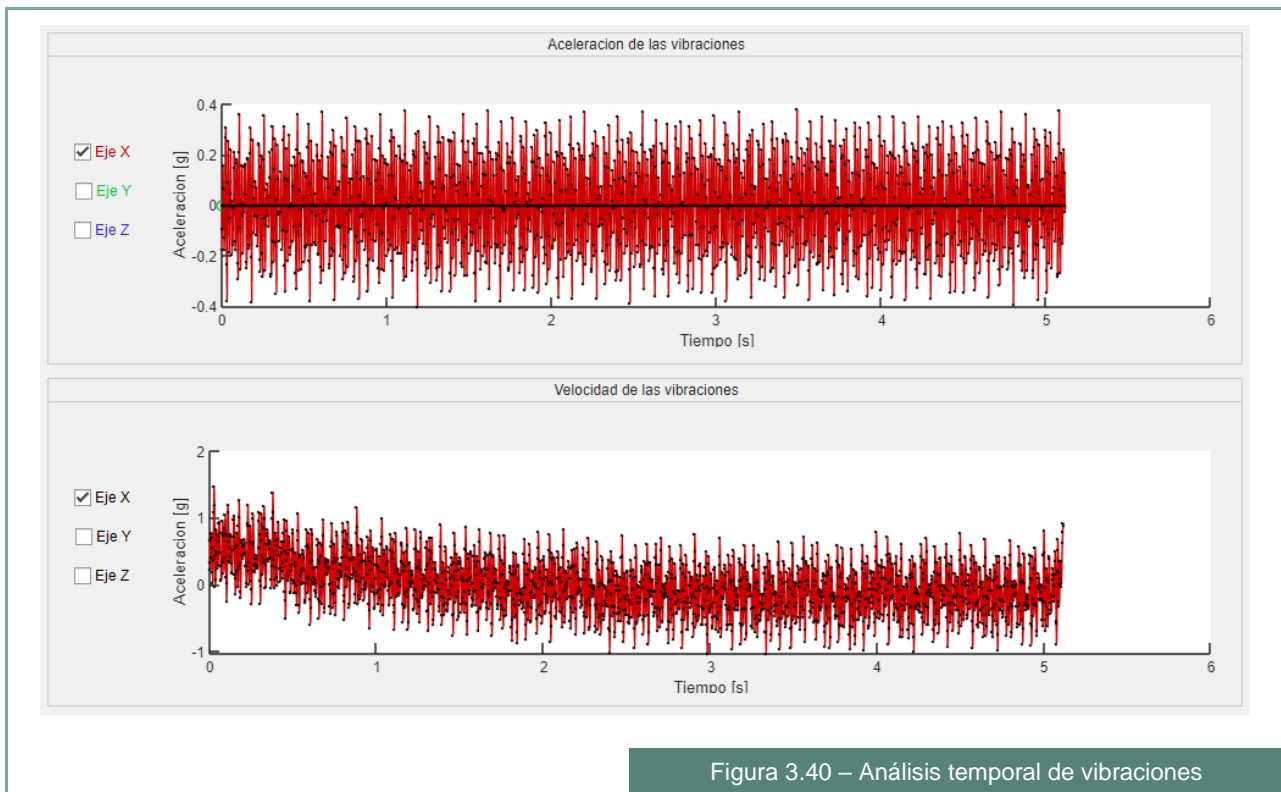
Figura 3.39 – Diagnostico según ISO 10816

Por otro lado, aparecen las pestañas para análisis de los datos en los dominios de tiempo y frecuencia.

En la pestaña **VIBRACIÓN - “Análisis temporal”**, podemos ver la representación gráfica de las muestras obtenidas por el acelerómetro en cada uno de sus tres ejes. Además,



se observa la representación gráfica de la velocidad de las vibraciones, obtenida por integración numérica de los datos de aceleración.



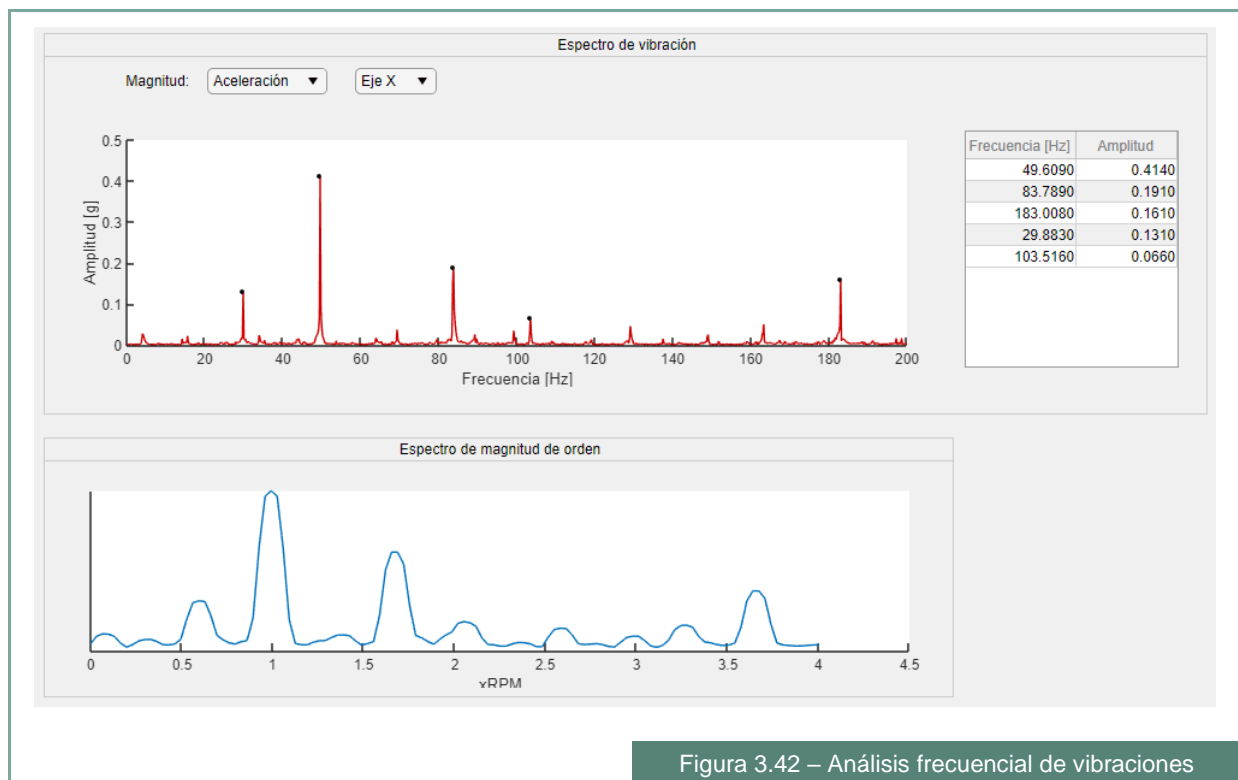
Apoyando el cursor sobre la gráfica, aparecerán un set de herramientas en la parte superior derecha, lo que nos permitirá realizar zoom y visualizar con más detalle ciertos áreas de la señal. Además, con la herramienta Guardar, es posible exportar la imagen visualizada en los formatos JPG, PNG o PDF.

Haciendo clic sobre cualquier punto de la señal, podemos visualizar sus coordenadas X e Y.



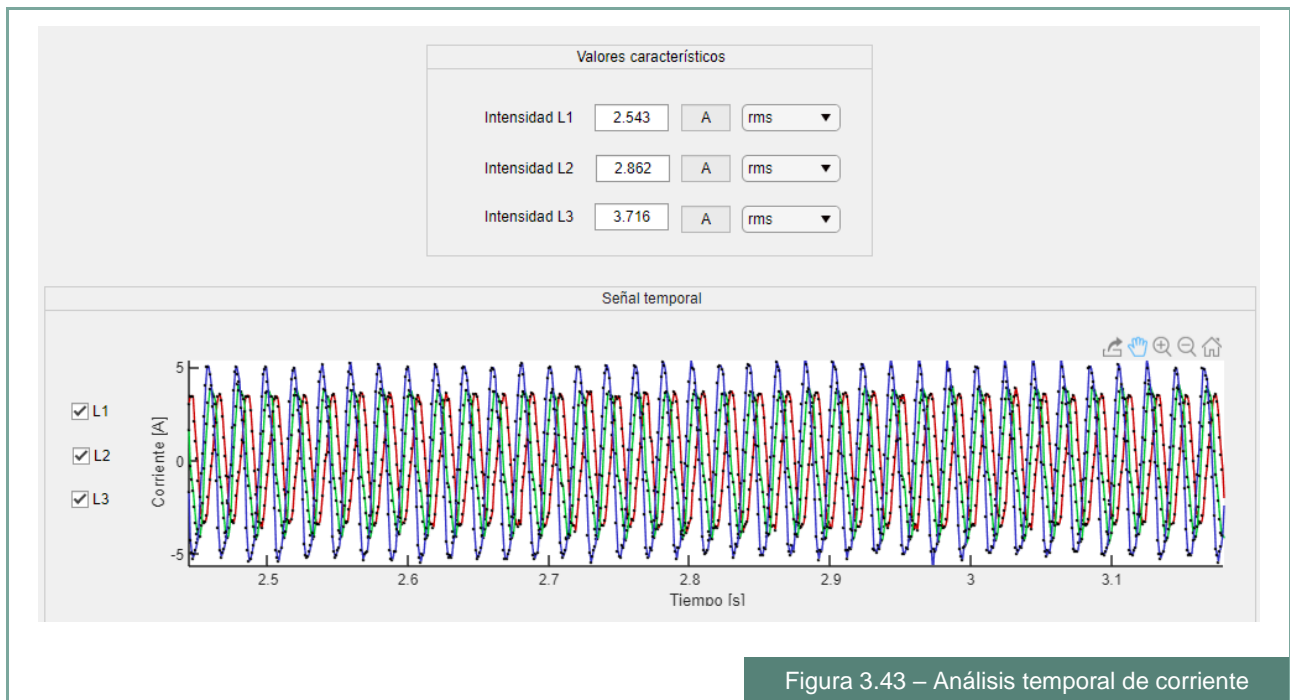
En la pestaña **VIBRACIÓN – “Análisis frecuencial”**, vemos en el gráfico superior el espectro de frecuencia de las señales de aceleración, velocidad o desplazamiento de las vibraciones; en cualquiera de los ejes. El sistema identifica los picos más significativos (aquellos con una amplitud mayor al 10% del pico más alto), listándolos en la tabla derecha en orden decreciente según su magnitud.

En el gráfico inferior, vemos un análisis de espectro de ordenes (Order Spectrum Analysis), que nos relaciona la magnitud de las vibraciones en función de las RPM del motor, lo cual resulta muy útil para identificar la causa de las vibraciones.

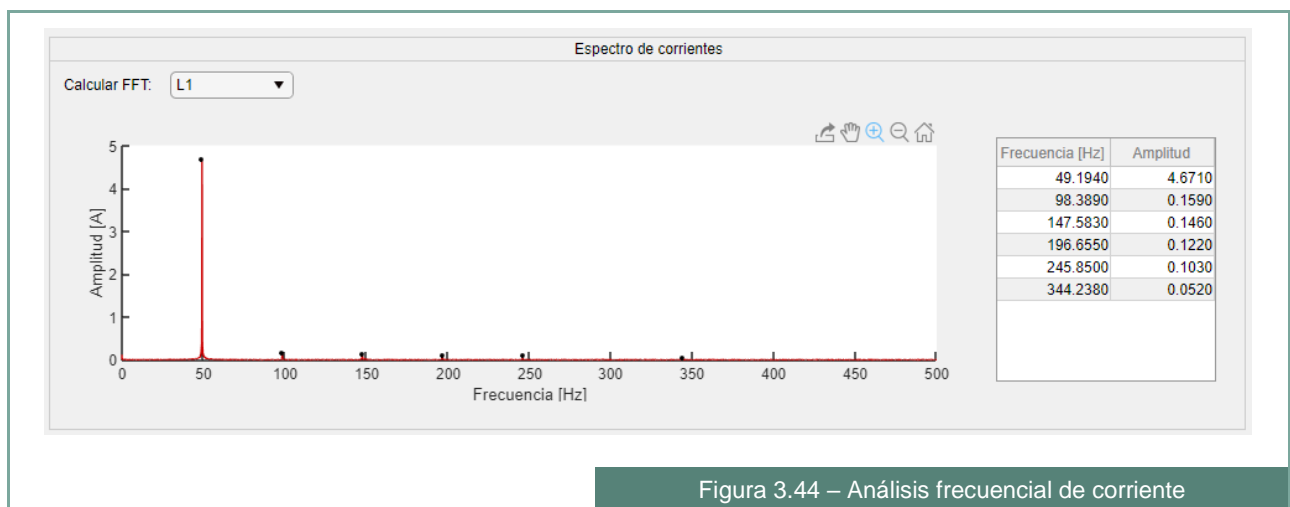


### 3.3.2. Selección de dispositivo: Sensor de corriente

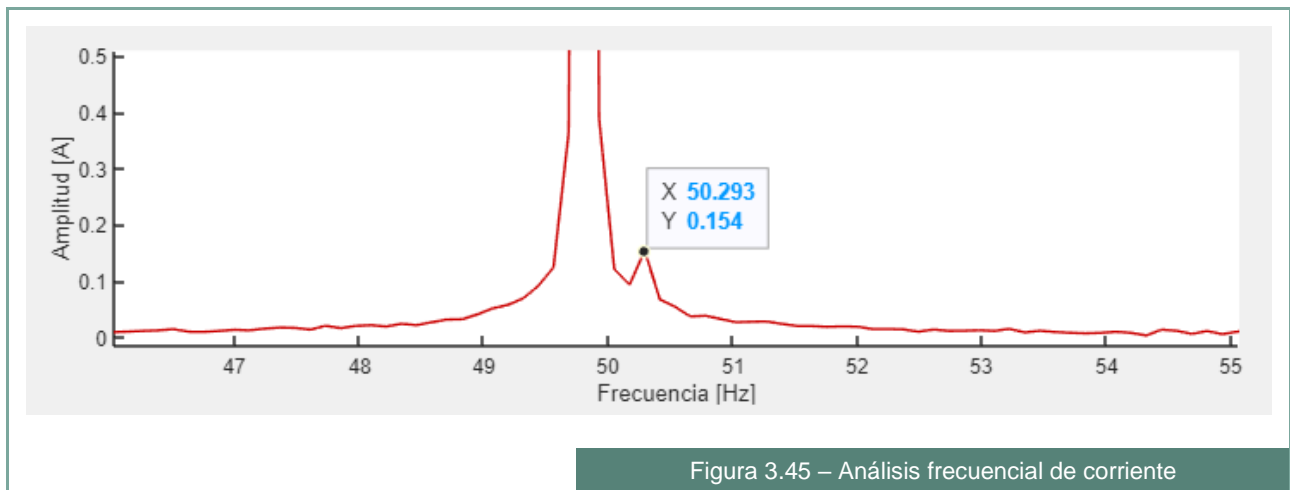
En lo que respecta a la medición de la corriente consumida por el motor, la pestaña **CORRIENTE – Análisis temporal** muestra los valores característicos de las señales correspondientes a cada una de tres fases y su representación gráfica en el dominio temporal.



Finalmente, en la pestaña **CORRIENTE – Análisis frecuencial** vemos la señal obtenida como resultado de aplicar la FFT, pudiendo seleccionar la fase visualizada.



En este punto, resulta importante ampliar la zona de la frecuencia fundamental de las tensiones aplicadas al motor, para visualizar la amplitud de las bandas laterales indicativas de problemas de rotor.



### 3.3.3. Funciones de MATLAB utilizadas

La aplicación fue desarrollada en MATLAB 2019a, específicamente utilizando el módulo App Designer. A continuación, se hará una breve descripción de las funciones utilizadas para el procesamiento de las señales:

- mean: para calcular el valor medio
- rms: para calcular el valor eficaz
- max: para hallar el valor pico
- fft: para hallar el espectro de frecuencia aplicando la transformada rápida de Fourier
- findpeaks: para hallar los picos en las gráficas del espectro
- cumtrapz: para hallar la velocidad y desplazamiento de las vibraciones, aplicando una integración numérica trapezoidal

En lo que respecta a la comunicación UDP, se utilizaron las siguientes funciones:

- udp: crea un objeto UDP y asigna los puertos de host y remoto
- fopen: abre el puerto de comunicaciones
- fwrite: escribe datos en el puerto de comunicaciones
- BytesAvailable: indica si hay datos sin leer en el buffer de entrada
- fread: permite leer el buffer de entrada
- flushinput: vacía el buffer de entrada
- DatagramAddress: permite conocer la dirección IP del paquete recibido
- fclose: cierra el puerto de comunicaciones

## Capítulo 4: Resultados

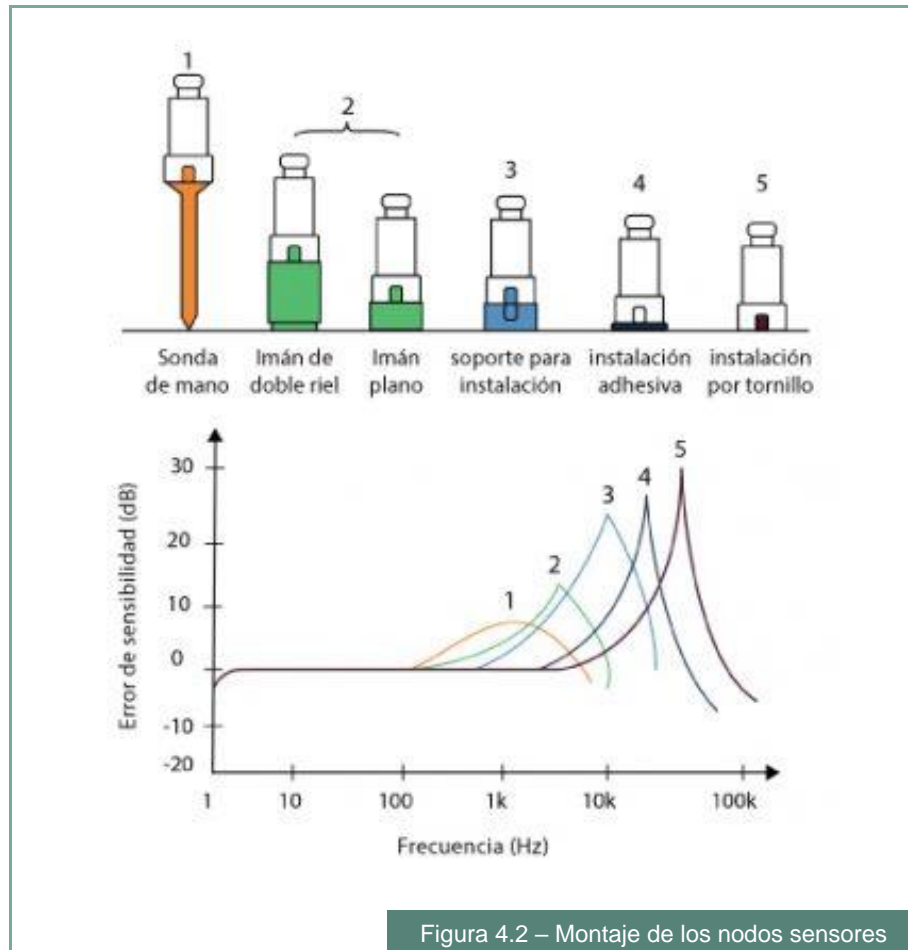
En la Figura 4.1 se presenta el equipo terminado, de construcción robusta y reducidas dimensiones. El nodo posee un orificio en su base de aluminio, a través del cual se realiza la lectura de temperatura y, en su parte frontal (a), se encuentra el LED indicador de transmisión y el pulsador de RESET. Además, en su parte posterior (b), se indican los sentidos de los ejes para interpretación de datos de vibración.



Figura 4.1 – Equipo MASH: Nodo y Data-Logger

### 4.1. Puesta en funcionamiento

Los Nodos sensores deben ser montados en la carcasa del motor, utilizando pernos de fijación (stud) o pegamento. En la Figura 4.2, se observa que un montaje deficiente puede afectar la sensibilidad de la lectura, por lo que no se recomienda la utilización de otros métodos.



Luego, se debe instalar el Data-Logger, colocar los sensores de corriente y energizar el equipo. La IP por defecto es de 192.168.1.180, por lo que debemos asegurarnos que la IP de la PC pertenezca a la misma para poder conectarnos con el software MASH Soft. Una vez establecida la comunicación, podemos modificar la IP del Data-Logger, en caso de ser necesario.

En el software, deben configurarse las alarmas de captura de datos y, posteriormente, pulsar en el icono de **Conectar** para enviar la configuración al Data-Logger.

Los nodos se encuentran energizados y en modo Stand-By, por lo que es necesario pulsar botón de RESET para recibir la configuración desde el Data-Logger y comenzar la captura de datos.

## 4.2. Características técnicas del Nodo sensor

- **Material constructivo:** plástico de alta durabilidad con base de aluminio
- **Dimensiones:** 35 [mm] x 35 [mm] x 70 [mm]
- **Consumo total en stand-by:** 20 [uA]
- **Consumo total en modo Tx:** 10 [mA]
- **Consumo total en modo Rx:** 6 [mA]
- **Interfaz:** LED indicador + pulsador de RESET
- **Lectura de vibraciones una vez al día** (horario configurable)
- **Lectura de temperatura una vez cada hora** (horario configurable)
- **Lectura del estado de la batería**

### Mediciones de vibraciones:

- **Ejes de medición:** 3
- **Rango:**  $\pm 2$  g
- **Resolución:** 1 [mg]
- **Ruido:** 220 [ $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]
- **Ancho de banda:** 400 [Hz]

### Medición de temperatura:

- **Tipo:** sin contacto (sensor de infrarrojos)
- **Rango temperatura ambiente:**  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$
- **Rango temperatura objeto:**  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $380^{\circ}\text{C}$
- **Resolución:**  $0.02^{\circ}\text{C}$
- **Exactitud:**  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  (para el rango de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ )

### Comunicación por RF:

- **Frecuencia de operación:** 2.4 [GHz] (Canal 40)
- **Potencia:** 0 [dBm]
- **Tasa de transferencia:** 2 [Mbps]
- **Alcance:** 40 [m] (en espacios abiertos)

### Batería:

- **Batería:** 3.7 [V] / 2600 [mAh] (tamaño 14500)
- **Duración de batería:** Aproximadamente 8 años

## 4.3. Características técnicas del Data-Logger

- **Material constructivo:** plástico de alta durabilidad
- **Tensión de alimentación:** 100 a 240 [V]
- **Conexión Ethernet/IP:** puerto RJ45
- **IP configurable**
- **Capacidad de memoria:** 30 años de registros de datos
- **Pila interna para mantener sincronización horaria**

- **Lectura de corriente una vez al día** (horario configurable)

Medición de corriente:

- **Cantidad de sensores:** 3
- **Tipo:** no invasivo (transformador de corriente de núcleo partido)
- **Rango:** 0 a 15 [A]
- **Exactitud:**  $\pm 1.5$  %

Comunicación por RF:

- **Cantidad máxima de nodos sensores:** 6
- **Frecuencia de operación:** 2.4 [GHz] (Canal 40)
- **Potencia:** 0 [dBm]
- **Tasa de transferencia:** 2 [Mbps]
- **Alcance:** 40 [m] (en espacios abiertos)

#### 4.4. Características del software MASH Soft

- **Tamaño:** 5 MB (Runtime 750 MB)
- Interfaz amigable y de fácil uso
- Visualización del estado actual del sistema
- Posibilidad exportar gráficos
- Posibilidad de configurar los horarios de captura de muestra de los sensores
- Diagnóstico del estado del motor



## Capítulo 5: Análisis de Costos

### 5.1. Costos de materiales del Data-Logger

En la siguiente tabla, se detallan los costos unitarios y cantidades utilizadas para cada uno de los materiales utilizados en la construcción del Data-Logger.

Ítem	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo (USD)
Placa desarrollo Blue Pill STM32F103	1	7.23	7.23
Fuente HikLink 5V 3W	1	3.95	3.95
Mini modulo ethernet USR-ES1 w5500	1	5.94	5.94
Módulo nRF24L01	1	3.34	3.34
Amplificador de instrumentación AD623	3	3.32	9.96
Circuito integrado TL072	4	0.5	2
Circuito integrado MAX1044	1	1	1
Resistencias 1/4 W 1% varios valores	29	0.01	0.29
Capacitores cerámicos varios valores	32	0.02	0.64
Capacitores electrolíticos	3	0.03	0.09
Socket memoria micro SD	1	4.72	4.72
Zócalo batería 3V	1	3	3
Conectores 2 pines	3	0.5	1.5
Conector 3 pines	1	0.7	0.7
PCB	1	2	2
Gabinete y detalles estéticos	1	15	15
<b>TOTAL</b>			<b>61.36</b>

Tabla 5.1 – Costo de materiales: DataLogger Gateway

El costo total de materiales para el Data-Logger es de USD61.36, que al cambio actual (USD1 = \$83.5 según BNA) se corresponde con \$5123.56 pesos argentinos.

### 5.2. Costos de materiales del Nodo sensor

Para el caso de un nodo sensor, se utilizaron los siguientes materiales:

Ítem	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo [USD]
Microcontrolador ATMEGA328P SMD	1	4	4
Módulo nRF24L01	1	3.34	3.34
Acelerómetro LIS3DH	1	2.87	2.87
Sensor temperatura MLX90614BAA	1	9.08	9.08
RTC DS3231	1	4.72	4.72
Resistencias SMD	9	0.04	0.36
Capacitores SMD	7	0.07	0.49

<b>Pulsador SMD</b>	1	0.04	0.04
<b>LED SMD</b>	1	0.05	0.05
<b>PCB doble faz</b>	1	3.6	3.6
<b>Batería 14500 3,6V 2000mAh</b>	1	5.89	5.89
<b>Gabinete y detalles estéticos</b>	1	10	10
<b>TOTAL</b>			<b>44.44</b>

Tabla 5.2 – Costo de materiales: Nodo

El costo de materiales para cada nodo sensor es de U\$D44.44, que sería equivalente a \$3674 pesos argentinos.

### 5.3. Costos totales

En cuanto a las horas dedicadas en el desarrollo de este proyecto, se tomó un costo por hora promedio de un técnico electrónico sin experiencia de \$180 = U\$D2.15.

Teniendo en cuenta que trabajamos dos personas y contemplando el diseño, ejecución, pruebas y ajustes del proyecto realizado, la carga horaria fue de 620hs cada uno, obteniendo un costo por horas de trabajo de U\$D2666 = \$222611.

Dada la descripción de costos vista anteriormente, podemos concluir que el costo final del proyecto realizado es de U\$D2772 = \$231462.

El producto final sería vendido a sectores industriales que requieran de un monitoreo predictivo. Se estima un costo de venta de U\$D800 = \$66800 del Data-Logger con un nodo sensor, con un extra de U\$D200 por cada nodo sensor adicional. Se ofrecería la capacitación de empleados para manipulación e interpretación de datos obtenidos en el software gestor.

La amortización de la inversión se lograría con la venta de cuatro equipos de monitoreo, teniendo en cuenta el kit básico compuesto por el Data-Logger y un nodo sensor.

## Capítulo 6: Discusión y Conclusión.

### 6.1. Resultados obtenidos

Se innovo en cuanto al uso de acelerómetros de tecnología MEMS, obteniendo muy buenos resultados, y una gran ventaja en cuanto a reducción de peso y dimensiones respecto a sus rivales piezoeléctricos utilizados en los equipos del mercado. Además de la posibilidad de configurar su funcionamiento para ajustarlo a nuestra área de aplicación.

Las dimensiones finales del nodo fueron inferiores a las pensadas en un principio. Se trabajo mucho y se realizaron múltiples mejoras hasta conseguir optimizar el tamaño del PCB.

Por otro lado, el consumo total del nodo inferior a 20 [μA] ha superado ampliamente las expectativas, poniendo en evidencia nuestra buena selección de componentes, excelente diseño de hardware y la correcta programación del firmware para la configuración de los periféricos.

Integrar la medición y análisis de corrientes, fue otro punto de innovación del equipo, dando la posibilidad al usuario final detectar fallas eléctricas en el motor.

En lo que respecta a los costos, es un equipo que tranquilamente puede competir en el mercado nacional. Debemos considerar, que los costos indicados en el Capítulo 5, son valores minoristas de componentes obtenidos en el mercado regional. Por lo tanto, pensando en una producción masiva y adquisición de componentes en distribuidores directos, es posible reducir los costos en materiales significativamente y, en consecuencia, impactar en el precio de venta del equipo.

En una etapa inicial, se pensó en el uso de LabView como entorno de desarrollo del software de análisis, pero las dificultades para lograr un adecuado procesamiento matemático de las señales y el aumento exponencial de la complejidad a medida que se agregaban funcionalidades, nos forzaron a dejarlo de lado. En búsqueda de alternativas, nos topamos con App Designer, un entorno de MATLAB implementado hace muy poco tiempo, pero que en sus últimas versiones introduce importantes mejoras que permiten el desarrollo de una interfaz visual agradable, funcional y fácil de implementar.

#### 6.1.1. Seguridad operativa

Los equipos comerciales portátiles, como el Dsp Logger Expert o Pocket VibPro, requieren que el operador apoye el acelerómetro (fijado por imán) en el motor a analizar estando movimiento. Esto conlleva riesgos para su seguridad, debido a que la maquina se encuentra funcionando a régimen normal y, en muchos casos se requiere ingresar dentro de la misma para acceder al motor, habiendo elementos mecánicos en movimiento y, en algunos casos, vapor. Podríamos pensar en fijar los acelerómetros y cablearlos hasta el exterior, pero resulta invasivo para la instalación y no es viable en muchos casos.

Nuestro equipo elimina estos riesgos, dado que la instalación de los nodos se realiza con la maquina detenida y no necesita ningún cableado.

## 6.2. Futuras mejoras

Entre las posibles mejoras que pueden implementarse y ser motivo de futuros proyectos finales, mencionamos:

- Integración de salidas relé o protocolos de comunicación con PLC (RS485, Profibus, Ethernet/IP, etc), para emitir alertas en caso de anomalías graves.
- Incorporar en el software otras técnicas para el análisis de los datos, tales como: análisis Wavelet, análisis espectral de energía, Park's vector approach, entre otros. De esta manera, se busca brindar más herramientas que permitan diagnosticar la causa del problema.

La evolución que ha tenido la inteligencia artificial en los últimos años, fundamentalmente en el campo del Machine Learning y las redes neuronales, nos hace pensar la posibilidad de incorporar estas técnicas de aprendizaje en el software desarrollado. Estos modelos requieren de gran cantidad de datos para lograr el aprendizaje del sistema, por lo que sería necesario realizar múltiples pruebas simulando fallas en los motores bajo estudio. Una vez logrado esto, el sistema podría diagnosticar automáticamente la causa de falla más probable, en base a los datos analizados y el aprendizaje logrado, sin necesidad de intervención humana.

## Capítulo 7: Literatura Citada.

- (1) *5W Ultra small series power module*. (2018). Hi-Link Electronic. [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1912111437\\_HI-LINK-HLK-5M05\\_C209907.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1912111437_HI-LINK-HLK-5M05_C209907.pdf)
- (2) Castelli, M., & Andrade, M. (2007). *Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción*. Universidad de Montevideo. ALFEX S.A.
- (3) Castro Guerrero, O. (2010). *Prevención de las fallas de los motores trifásicos de inducción mediante una adecuada selección*. Tecnología en Marcha.
- (4) Díaz-Iza, H. (2011). *Diseño y construcción de un sistema para el monitoreo de condición de generadores sincrónicos y motores trifásicos de inducción*. Universidad politécnica de Valencia.
- (5) *El motor asíncrono trifásico Generalidades y oferta de ABB para la coordinación de las protecciones*. Asea Brown Boveri, SA.
- (6) Estévez Cruz, A. M. (2013). *Estudio de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones implantado en instalaciones de bombeo y generación*. Universidad de Sevilla.
- (7) García, J. R., García, E. R., & Romeral, J. L. (2011). *Detección de fallas en máquinas de inducción basada en stft y transformada wavelet*. Visión Electrónica.
- (8) González, B. A. (s. f.). *¿Qué es Machine Learning?* – Cleverdata. cleverdata. <https://cleverdata.io/que-es-machine-learning-big-data/>
- (9) *Levantamiento de Temperatura en Motores Eléctricos*. (2010). Oscar Núñez Mata. <http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2010%20OCT%20-%20Levantamiento%20de%20temperatura%20de%20motores%20electricos.pdf>
- (10) *LIS3DH. MEMS digital output motion sensor: ultra-low-power high-performance 3-axis «nano» accelerometer*. (2016). ST. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00274221.pdf>
- (11) *Mantenimiento Predictivo. Análisis de Firma de Corriente de Motores Eléctricos (MCSA)*. <https://motoresygeneradores.com/ensayos/electricos/online/184-mantenimiento-predictivo-analisis-de-firma-de-corriente-de-motores-electricos>
- (12) *MAX1044. Switched-Capacitor Voltage Converters*. (2015). maxim integrated. <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/ICL7660-MAX1044.pdf>
- (13) Mejía Morales, J. E. (2009). *Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- (14) Miljković, D. *Brief review of motor current signature analysis*. [https://hrcak.srce.hr/file/218882#:~:text=Motor%20Current%20Signature%20Analysis%20\(MCSA,hazardous%20areas%2C%20%5B13%5D](https://hrcak.srce.hr/file/218882#:~:text=Motor%20Current%20Signature%20Analysis%20(MCSA,hazardous%20areas%2C%20%5B13%5D)
- (15) *MLX90614. Termómetro sin contacto por infrarrojos con comunicaciones SMBus*. <https://polaridad.es/mlx90614-termometro-infrarrojos-sin-contacto-smbus-i2c-arduino/>

- (16) *nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver*. (2008). Nordic. [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf)
- (17) Oviedo, S. J., Quiroga, J. E., & Ordóñez Plata, G. (2014). *Validación Experimental de la Metodología MCSA para un Motor de Inducción de 2 HP*. <https://www.redalyc.org/pdf/430/43030033010.pdf>
- (18) Rico Maestro, A. F., & Tristancho Caballero, M. G. (2011). *Detección de fallas en un motor de inducción usando MCSA (Motor Current Signature Analysis)*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- (19) *Sensor de movimiento de salida digital MEMS: acelerómetro «nano» de tres ejes de alto rendimiento y potencia ultra baja*. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3dsh.pdf>
- (20) *SPI to Ethernet Module.USR-ES1*. (2010). USR IOT. <https://www.pusr.com/download/ES1/USR-ES1-EN-V1.0.pdf>
- (21) *Split core current transformer. SCT-013*. (2014). YHDC. [https://www.mcielectronics.cl/website\\_MCI/static/documents/Datasheet\\_SCT013.pdf](https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf)
- (22) *STM32F103x8. Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces*. (2015). ST. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
- (23) *Tecnología de medición de corriente y energía*. WAGO. <http://www.dicomat.com/wp-content/uploads/2015/04/Medicion-esp%C3%B1ol.pdf>
- (24) Wildi, T. (2006). *Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. <https://lc.fie.umich.mx/~jorgeahb/Pagina/materias/Libro2.pdf>
- (25) Yarborough, B. (2015). *Components and Methods for Current Measurement*. Vishay.