

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Sistema de Monitorización Inalámbrico de Señales de Vibración en Máquinas Rotativas**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**José Alberto Zúñiga Chaves**

**Cartago, 26 junio de 2013**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Laura Cabrera Quirós

Profesor lector



Ing. Jorge Castro Godínez

Profesor lector



Ing. Juan Andrés Alfaro

Barrantes

Profesor asesor


Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 24 de junio del 2013

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



---

José Alberto Zúñiga Chaves  
Cartago, junio, 2013  
Céd: 1-11454-0066

## Resumen

En un plan de mantenimiento predictivo la falta de herramientas de monitorización en línea para máquinas rotativas genera gran cantidad de averías imprevistas, debido a la existencia de lapsos de tiempo en los cuales los equipos no son revisados y no se conoce su estado de funcionamiento hasta la próxima revisión programada; son en estos períodos donde se presentan fallos inesperados. Por lo tanto, el fin primordial de la implementación de sistemas de mantenimiento en línea, es aumentar la disponibilidad de los equipos que intervienen en la industria y con ello aumentar la productividad, reduciendo el número de averías imprevistas y mediante la detección temprana de fallos aumentar la vida útil de los equipos. Dicha problemática se pretende resolver mediante un sistema inalámbrico de monitorización que permita tomar muestras de los valores globales de vibración e interpretar a través del tiempo el comportamiento del equipo mediante gráficas de tendencia y así, el momento indicado programar su revisión o mantenimiento.

**Palabras clave:** fallas, inalámbrico, mantenimiento, monitorización, predictivo, vibraciones.

## **Abstract**

In a predictive maintenance plan, the lack of online monitoring tools for rotating machines generates a huge number of unexpected failures, due to the existence of periods of time in which machines are not monitored and their operating status is not known until the next scheduled date; in these unmonitored periods unexpected failures appear. Therefore, the primary purpose of the implementation of online maintenance systems is to increase the availability of the equipment involved in the industry and thereby increase the productivity by reducing the number of unexpected failures, through early detection of failures which increases the useful life of the equipment. This problem is to be solved by a wireless system that allows monitoring samples of vibration values and interpret through time the equipment performance using trend charts and in the right time to schedule the inspection or maintenance.

**Keywords:** failures, maintenance, monitoring, predictive, wireless.

A mis queridos padres...

# Agradecimientos

En primer lugar le doy gracias a Dios por brindarme sabiduría, tranquilidad y fortaleza para cumplir con todos los objetivos que me he propuesto en mi vida, siendo uno de los más importantes la posibilidad de concluir mis estudios en la carrera Ingeniería en Electrónica.

Además, le doy gracias a mis padres porque sin ellos este sueño no habría podido ser realidad, por siempre brindarme apoyo incondicional con los retos que tenga por delante y por estar siempre pendientes de mi progreso.

Agradezco a mis amigos y a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería en Electrónica por toda la ayuda brindada y el conocimiento transmitido, y por haberme permitido compartir una etapa muy agradable en estos años de estudio.

José Alberto Zúñiga Chaves

Cartago, 26 junio, 2013

# Índice General

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Problema existente e importancia de su solución.....	1
1.2. Solución seleccionada.....	3
1.2.1. Acondicionamiento.....	5
1.2.2. Transmisión/recepción.....	5
1.2.3. Interfaz de usuario.....	6
Capítulo 2: Meta y objetivos .....	7
2.1. Meta.....	7
2.2. Objetivo(s) general(es).....	7
2.3. Objetivos específicos .....	7
Capítulo 3: Marco teórico.....	8
3.1. Descripción del sistema o proceso a mejorar .....	8
3.2. Antecedentes Bibliográficos.....	14
3.2.1. Definición de mantenimiento.....	14
3.2.2. Función del mantenimiento dentro de la industria .....	15
3.2.3. Tipos de Mantenimiento.....	15
3.2.4. Análisis de vibraciones .....	20
3.2.5. Clasificación de la maquinaria.....	22
3.2.6. Normas de severidad de la vibración. ....	23
3.3. Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema. ....	25
3.3.1. Vibraciones .....	25
3.3.2. Métodos para el análisis de señales.....	26
3.3.3. Análisis de los niveles de vibración .....	27
3.3.4. Señales generadas por las vibraciones mecánicas en máquinas rotativas .....	29
3.3.5. Planos de medición.....	30
Capítulo 4: Sistema de monitorización inalámbrico de vibraciones mecánicas .....	33
4.1. Descripción de hardware .....	34
4.1.1. Acondicionamiento.....	34
4.1.2. Transmisión/recepción.....	49
4.2. Descripción de software.....	51



4.2.1.	Acondicionamiento.....	51
4.2.2.	Transmisión/recepción.....	52
4.2.3.	Interfaz de usuario.....	56
Capítulo 5:	Resultados y Análisis .....	64
Capítulo 6:	Conclusiones y Recomendaciones .....	79
6.1.	Conclusiones.....	79
6.2.	Recomendaciones.....	80
Bibliografía.....		81
Anexos .....		85

# Índice de figuras

<b>Figura 1.1</b>	Diagrama de bloques del sistema de monitorización.....	5
<b>Figura 3.1</b>	Diagrama del sistema de monitorización fuera de línea.....	11
<b>Figura 3.2</b>	Curva P-F de mantenimiento.....	18
<b>Figura 3.3</b>	Criterios de severidad de vibración (10 Hz - 1 000 Hz) VDI 2056, ISO 10816-3, BS 4675. [16].....	24
<b>Figura 3.4</b>	Diagrama de planos de medición.....	31
<b>Figura 4.1</b>	Sensor ICP 608A11. ....	35
<b>Figura 4.2</b>	Conjunto de configuraciones de montaje y sus efectos a alta frecuencia. ....	37
<b>Figura 4.3</b>	Base de montaje de sensor ICP 608A11. ....	38
<b>Figura 4.4</b>	Acondicionador de señales de vibración, ICP 682B03. ....	39
<b>Figura 4.5</b>	Diagrama interno de placa de circuito impreso, 682B03. ....	40
<b>Figura 4.6</b>	Configuración para alimentación de sensor ICP 608 <sup>a</sup> 11. ....	42
<b>Figura 4.7</b>	Arduino Uno .....	43
<b>Figura 4.8</b>	Diagrama eléctrico del sistema.....	48
<b>Figura 4.9</b>	Kit de desarrollo Xbee Pro XSC (S3B). [20] .....	50
<b>Figura 4.10</b>	Diagrama de flujo de rutina de muestreo. ....	51
<b>Figura 4.11</b>	Diagrama de flujo de programación de módulos XBEE PRO XSC. ....	55
<b>Figura 5.1</b>	Interfaz de prueba de rango del X-CTU.....	65
<b>Figura 5.2</b>	Jumper de loop-back de tarjeta XBIB-U-DEV.....	65
<b>Figura 5.3</b>	Diagrama de la planta AVCR para pruebas de rango. ....	67
<b>Figura 5.4</b>	Circuito para prueba de conexión del nodo periférico. ....	70
<b>Figura 5.5</b>	Algoritmo para prueba de conexión.....	71
<b>Figura 5.6</b>	Montaje de sensores de vibración 608A11.....	74
<b>Figura 5.7</b>	Gabinete del sistema de monitorización de vibraciones.....	75
<b>Figura 5.8</b>	Montaje de Xbee PRO XSC en panel. ....	75
<b>Figura 5.9</b>	Interfaz gráfica del sistema de monitorización de vibraciones.....	76

# Índice de tablas

<b>Tabla 4.1</b>	Configuraciones de DIP Switch, transmisor 682B03 .....	41
<b>Tabla 4.2</b>	Simbología de diagrama eléctrico.....	47
<b>Tabla 4.3</b>	Comandos AT de configuración Xbee PRO XSC.....	54
<b>Tabla 5.1</b>	Comandos de configuración para prueba de rango. ....	66
<b>Tabla 5.2</b>	Resultados de pruebas de rango. ....	68
<b>Tabla 5.3</b>	Secuencia de datos simulados.....	70

# Capítulo 1: Introducción

En este apartado se expone el problema existente en la planta de Abbott Vascular Costa Rica debido a la falta de herramientas de monitorización en línea para las máquinas rotativas y se presenta la técnica que utilizan previo al desarrollo del proyecto, así como sus respectivas implicaciones. Además, se incluyen los principales beneficios que trae la implementación del sistema, y de forma general, la solución propuesta.

## 1.1. Problema existente e importancia de su solución

El proyecto de graduación se realizó en la empresa Abbott Vascular, del área médica, dedicada al cuidado cardíaco y vascular con productos líderes en el mercado y en la industria de ductos vasculares. Dicha empresa está comprometida a avanzar en el cuidado del paciente mediante la transformación del tratamiento de la enfermedad vascular a través de: innovaciones de dispositivos médicos, inversiones en investigación, desarrollo, formación médica y educación.

Se incursionó en el área de mantenimiento industrial, en un proyecto a la medida solicitado por la empresa, se desarrolló un sistema para la monitorización continua de señales de vibración en máquinas eléctricas rotativas, que permita interpretar el estado actual de la maquinaria involucrada en el proceso industrial. De esta manera, se trata de una herramienta de supervisión, control y adquisición de datos enfocada al mantenimiento predictivo.

En la planta de Abbott Vascular, el departamento de facilidades cuenta con un programa de mantenimiento predictivo de vibraciones, una de las técnicas que permiten detectar fallas tempranas en sus equipos. A pesar de lo anterior, las máquinas presentan averías imprevistas debido a que realizan una monitorización fuera de línea, es decir, basados en un cronograma el personal técnico toma mediciones de espectros de vibración y facilitan los reportes de estado de la maquinaria.

Dichas revisiones se realizan con un colector de datos de estado de la maquinaria, Emerson CSI 2130, utilizado para la detección temprana de defectos en equipos críticos y que permite al personal planear y priorizar el mantenimiento para evitar interrupciones costosas en los cronogramas de producción. Por lo tanto, como se trata de un instrumento portable, existen lapsos de tiempo en los cuales los equipos no son revisados y no se conoce su estado de funcionamiento hasta la próxima revisión programada; son en estos períodos donde se presentan fallos inesperados.

Por lo tanto, el fin primordial de la implementación de sistemas de mantenimiento en Abbott, es aumentar la disponibilidad de los equipos que intervienen en la cadena productiva y con ello aumentar la productividad, reduciendo el número de averías imprevistas y mediante la detección temprana de fallos aumentar la vida útil de los equipos. Además, los directivos pretenden mejorar la planificación en el mantenimiento de sus equipos, mediante la adquisición de herramientas predictivas.

En la planta, las fallas imprevistas en los equipos críticos traen consigo pérdidas en el ámbito económico y en la producción, debido a que máquinas como compresores y manejadoras de aire, son las encargadas de mantener las condiciones de temperatura dentro de los cuartos limpios a niveles aceptables para la manipulación de la materia prima, caso contrario, vuelve inaceptable el ambiente para laborar. Lo anterior, se manifiesta en paro de labores o planes de contingencia para reducir el impacto en la producción debido a una falla, hasta que se pueda reestablecer el daño.

También, con la adición de herramientas de mantenimiento predictivo, específicamente sistemas de detección de fallos, se evalúan los datos que se adquieren midiendo los procesos del sistema con el fin de aislar fallos incipientes en estados de degradación prematuros y así evitar la propagación de fallos y el

cambio de elementos con porcentajes todavía altos de vida útil. Lo anterior constituye otro de los aspectos por los cuales desean invertir en este rubro. Otras razones: generar independencia de un operador, facilidad de instalación, mayor seguridad en espacios confinados, eliminar desmontajes innecesarios.

De acuerdo a lo anterior, la idea del proyecto surge porque la empresa ha solicitado al departamento de facilidades un manejo más eficiente de los recursos destinados al mantenimiento de las máquinas industriales mediante un monitoreo continuo a las de mayor criticidad, con el fin de disminuir las pérdidas debido a fallas mecánicas, tanto en la producción como en sus equipos. Por tal razón, la compañía requiere la búsqueda de una solución mediante el monitoreo continuo de las máquinas rotativa más críticas, sin la necesidad de frecuentar el cuarto de máquinas.

El problema surge por la falta de planificación y herramientas predictivas para el mantenimiento en la empresa, lo cual trae consigo pérdidas en el ámbito económico y en la producción, debido a costos por reparaciones, paro de labores e incluso daño permanente en la maquinaria y/o en el operador. Por lo tanto, se enumeran una lista de beneficios con el desarrollo del sistema de monitorización: permite eliminar desmontajes innecesarios en las máquinas y daños en la estructura de las mismas, manejo eficiente del plan de mantenimiento predictivo de vibraciones, herramienta de monitorización para detección de fallas tempranas o presencia de anomalías en el comportamiento de las máquinas, mantenimiento basado en la condición para máquinas con mayor criticidad, sistema en línea independiente de un operador y tiene la característica de portabilidad.

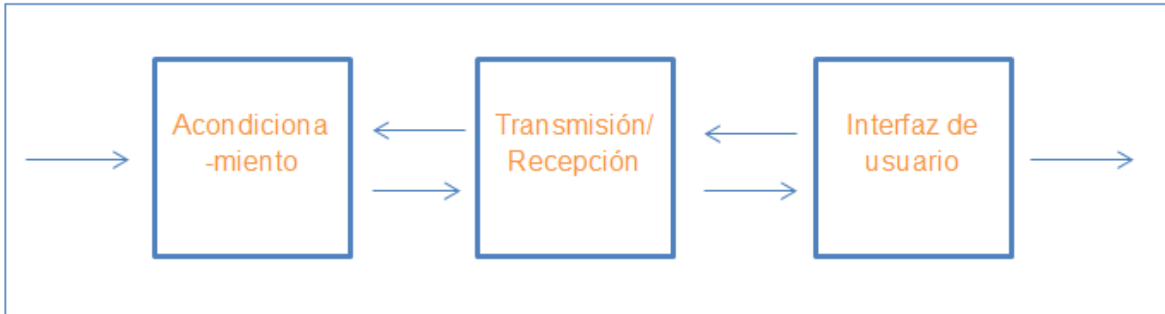
## **1.2. Solución seleccionada**

Para el desarrollo del proyecto, Abbott Vascular CR estableció una serie de restricciones y requerimientos en cuanto a los resultados esperados del mismo, a continuación se presentan los fundamentales:

1. El sistema de mantenimiento basado en la condición debe ser inalámbrico con alcance en toda el área de mezzanine.
2. El sistema debe ser portable que permita su instalación en diferentes tipos de máquinas rotativas.
3. Crear una interfaz de usuario para interpretar las muestras de los valores de vibración mediante gráficas de tendencia.
4. El proyecto debe contar con una base de datos para almacenar el historial de muestras adquiridas de las diferentes máquinas.
5. Los niveles de alarma las gráficas de tendencia deben ser configurados por el usuario.
6. Para generar reportes del estado de la maquinaria, el sistema debe permitir exportar las gráficas.

En dicho proyecto se realizó un sistema en línea enfocado al mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones mecánicas generadas por las máquinas que presentan mayor criticidad de funcionamiento dentro de la industria, debido a que afecta directamente el proceso productivo. También, facilita en gran dimensión las labores del personal técnico, pues deben realizar rondas continuamente para verificar su estado, y además, realizar un análisis exhaustivo de dichas señales para verificar la presencia de fallas.

El sistema está dividido a grandes rasgos en tres etapas: la primera corresponde al muestreo de la magnitud de la señal de vibración generada por los sensores y el acondicionamiento de dicha señal para que pueda ser enviada. La segunda etapa corresponde a una red inalámbrica de radio frecuencia para enviar las señales digitales correspondientes a la magnitud del valor global de vibración de la máquina hacia un punto de control. La última etapa es la de adquisición de datos, almacenamiento, graficación y generación de reportes. En la figura 1.1 se muestra el diagrama de bloques de la solución seleccionada:



**Figura 1.1** Diagrama de bloques del sistema de monitorización.

### **1.2.1. Acondicionamiento**

Dicha etapa tiene la función de tomar lecturas de los valores globales de vibración en las máquinas rotativas, mediante un muestreo y luego realizar la conversión a señales digitales. Las entradas corresponden a los puntos de medición de los sensores de vibración con respecto al eje del equipo, en las posiciones axial, horizontal y vertical, tanto internos como externos, por lo tanto, se requieren al menos seis lecturas analógicas. La salida de dicho módulo es un valor digital de 8 bits (1 byte) proporcional al nivel de vibración presente al momento de la lectura, esto cada uno de los canales.

### **1.2.2. Transmisión/recepción**

Dicha etapa se encarga de la transmisión inalámbrica de las muestras digitales de la magnitud de los valores globales de vibración. La entrada corresponde a los datos provenientes del microcontrolador través del puerto serial, enviados como tramas de 8 bits. La salida del bloque es por el puerto serial, los datos se envían hacia un computador.

Para el envío de la información al dispositivo de visualización, se configuró un enlace punto a punto, que permite la comunicación desde cualquier localidad en el mezzanine. Los datos enviados corresponden a los valores digitales de la magnitud de la señal de vibración, los cuales, son muestreados periódicamente. Corresponde a un enlace estable de comunicación, de manera que si por algún



factor sufre desconexión de uno de sus nodos, se puede reestablecer nuevamente.

### **1.2.3. Interfaz de usuario**

Como receptor de la información se empleó un PC, en el cual se almacenan continuamente los datos provenientes de los sensores de vibración que representan la amplitud de los valores globales, únicamente por un periodo de tiempo definido por el usuario, mientras está monitorizando un equipo en específico.

Para el manejo del usuario de mantenimiento se desarrolló una interfaz gráfica que presenta funciones como: estado de conexión de la red, menú de navegación para la búsqueda de muestras en períodos determinados, gráficas de tendencias de alarmas, reporte de alarmas, configuración de base de datos y niveles de alarmas.

El estado de conexión de la red es un recurso para verificar la existencia de comunicación entre los dispositivos de radio frecuencia. Con respecto al menú de navegación, se trata de dos entradas calendario para seleccionar un período en específico en el cual se desea conocer el comportamiento de las vibraciones del equipo. Las figuras de tendencia corresponden a gráficas en el tiempo de los valores globales de vibración en magnitud, con la posibilidad de superponer en una misma el comportamiento de dos o más sensores. Además, los niveles de alarma son parte de la configuración del usuario, pues varían de una máquina a otra, y representan los valores límite a los cuales un nivel de magnitud de vibración se considera como advertencia, y en el peor de los casos crítica.

. Para el caso de las alarmas, se desarrolló una ventana adicional donde se muestran detalladamente los sensores conectados al sistema, su estado de criticidad y la fecha de notificación del evento.

# Capítulo 2: Meta y objetivos

## 2.1. Meta

Implementar un sistema de mantenimiento predictivo de máquinas rotativas industriales mediante el análisis de vibraciones.

## 2.2. Objetivo(s) general(es)

2.2.1. Desarrollar un sistema de monitorización de fallas en máquinas rotativas para la implementación del mantenimiento predictivo.

## 2.3. Objetivos específicos

### a. Objetivos de hardware

1. Desarrollar un enlace inalámbrico para el envío de valores globales de vibración de máquinas rotativas.
2. Diseñar un circuito para el acondicionamiento de las señales de vibración.

### b. Objetivos de software

3. Desarrollar la interfaz para la adquisición de datos, el almacenamiento y la graficación de tendencias.
4. Implementar una rutina para la digitalización y muestreo de los valores globales de vibración.

## Capítulo 3: Marco teórico

### 3.1. Descripción del sistema o proceso a mejorar

En la planta de Abbott Vascular Costa Rica (AVCR), el departamento de facilidades posee un programa de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones, una de las técnicas que permiten detectar fallas tempranas en sus máquinas industriales. Se le denomina también mantenimiento basado en la condición, el cual se basa en realizar mediciones periódicas de los niveles de vibración de cada equipo mediante los sensores adecuados y, con los datos obtenidos, se puede evaluar el estado de confiabilidad de los mismos. El objetivo de dicha planificación es ofrecer información suficiente, precisa y oportuna para la toma de decisiones, de esta manera, con el conocimiento de la condición de cada equipo podemos hacer el “mantenimiento adecuado en el momento adecuado”. [1]

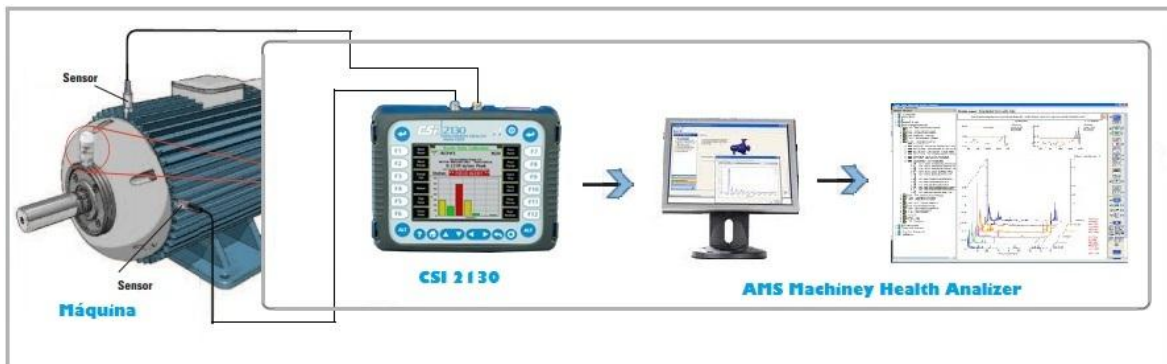
Los sistemas de mantenimiento predictivo permiten detectar los fallos antes de que sucedan, para dar tiempo a corregirlos sin tener consecuencias directas sobre la producción, como principal ventaja pueden utilizarse durante el funcionamiento normal del equipo y permite planificar de forma óptima las acciones de mantenimiento. La razón de peso por la cual se enfoca en su mayoría al análisis de vibraciones, es porque esta técnica permite detectar aproximadamente el 80 % de las fallas presentes en los equipos. [1]

El análisis de vibraciones está constituido por dos etapas: la primera corresponde a la adquisición de los datos y la segunda es la interpretación y análisis de los mismos. Se muestran en detalle los pasos seguidos en la compañía para implantar el sistema de mantenimiento predictivo en los equipos mecánicos.

1. Análisis de sistema bajo estudio: consiste en el listado de máquinas que fueron incluidas en el programa de mantenimiento predictivo, en un principio se trata de un pequeño grupo de los equipos más críticos. Posteriormente el programa se extenderá progresivamente al resto de los equipos.
2. Selección de parámetros: los parámetros que se miden corresponden a los niveles de vibración de los equipos en diferentes puntos, de acuerdo a la necesidad del tipo de problema que se pretenda detectar. Dicha etapa puede variar conforme se conozca mejor la maquinaria y del estado de la misma, incluso antes de la toma de datos.
3. Adquisición de datos: los datos obtenidos con un sensor de aceleración son la materia prima del programa de monitoreo basado en la condición, y su calidad asegura la veracidad del análisis. Los acelerómetros se caracterizan por ser robustos, pequeños y ligeros. En cuanto al equipo de medición se trata del CSI 2130 Machinery Health Analyzer, es decir, es un sistema fuera de línea (offline).
4. Análisis e interpretación de los datos: después de la toma de medidas es necesario generar un informe de las mismas para filtrar la gran cantidad de información adquirida en el campo. Para dicho fin se utiliza un programa informático denominado AMS Health Analyzer, luego de exportar los datos almacenados en el CSI 2130. Dicho software utiliza recursos visuales para facilitar el análisis e interpretar de resultados.

5. Evaluación del estado del equipo: el análisis frecuencial es la técnica más utilizada para determinar la salud de las máquinas rotativas, porque permite determinar la mayoría de las posibles averías. Por citar un ejemplo los espectros muestran frecuencias asociadas al desequilibrio del rotor y desalineamiento, daños en rodamientos, bandas, acoplamientos, engranajes, desgastes, entre otras.
  
6. Generación de avisos y toma de decisiones: la información obtenida luego de la evaluación del equipo, debe quedar al alcance de todo el personal encargado de la operación y mantenimiento en la planta. Dicho procedimiento es fundamental porque marca una brecha entre: que un fallo progrese, sea costosa su reparación y represente un riesgo para la operación del equipo, o que se ataque con rapidez para evitar el avance del mismo y permita ahorrar recursos de tipo económicos, materiales y principalmente humanos.
  
7. Órdenes de trabajo y retroalimentación: luego de la evaluación del equipo se genera una orden de trabajo en la cual se especifican puntos como: nombre y tipo del equipo, anomalía detectada, el procedimiento que debe realizarse y clasificar la prioridad de la intervención. Por último se realiza la retroalimentación del sistema, que consiste en evaluar el estado de las partes sustituidas y por último, hacer una medición post-reparación para verificar el correcto funcionamiento de la máquina, por lo tanto, se vuelve al paso 3 de adquisición de datos, y así sucesivamente conforme se vayan presentando fallas. [1]

Con respecto a los pasos del plan de mantenimiento predictivo implementados en Abbott Vascular, una vez analizado el sistema bajo estudio y seleccionados los parámetros a medir, el proceso desde la adquisición de datos hasta generar las órdenes de trabajo de mantenimiento para las máquinas, se muestra en el diagrama de la figura 3.1.



**Figura 3.1** Diagrama del sistema de monitorización fuera de línea.

En el diagrama de la figura 3.1 se muestran los elementos que constituyen el sistema de monitorización periódica fuera de línea (offline), con el cual las máquinas se examinan regularmente para lograr un conocimiento cada vez más profundo del estado normal de la misma, permitiendo así la detección fácil de las desviaciones. Para el modelo de monitorización desempeña un papel decisivo la selección de los puntos de medición, los accesorios utilizados y la definición del período de medición, por citar ejemplos: semanal (W), bisemanal (BW), mensual (M), trimestral (Q), semi-anual (SA) y anual (A).

Una vez finalizado el análisis del sistema bajo estudio, en Abbott Vascular se cuenta con una lista definida de equipo al cual se le debe realizar análisis de vibraciones con una determinada frecuencia, con el fin de conocer su estado y darle el respectivo seguimiento. Para dicho propósito, se cuenta con un cronograma de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones que contiene los siguientes elementos:

- Lista de equipo: se trata de las máquinas con su respectivo modelo, incluidas al plan de mantenimiento predictivo. Están estratificadas de acuerdo a tipo y función.
- Calendario anual: se cuenta con un calendario del respectivo año con las semanas enumeradas y sus divisiones.

- Cronograma: en el mismo calendario se incluyen los mantenimientos predictivos de todo el año para cada uno de sus equipos. Se utiliza simbología para diferenciar los períodos de medición, con diferentes tonos de color y caracteres.

A cada una de las máquinas, de acuerdo al cronograma de mantenimiento predictivo, se le realizan mediciones de los niveles de vibración utilizando el equipo mostrado en el diagrama. Se trata del colector de datos de vibración Emerson CSI 2130 el cual proporciona: análisis avanzado de vibración, análisis con varios canales (cross-channel), análisis de transiente, balanceo dinámico, alineación de ejes con láser y monitorización de motores. Entre sus características se encuentra la durabilidad que lo hace un instrumento ideal para el trabajo en campo en una variedad de aplicaciones industriales.

Es un equipo pequeño y liviano diseñado para largas rutas de medición, además, genera reportes en el campo utilizando un código de colores para las alarmas en un determinado punto. Ofrece la posibilidad de utilizar uno o dos canales para el análisis de vibración, lo cual permite opciones de análisis avanzados y un incremento significativo en la eficiencia. También, es de fácil operación y requiere de un entrenamiento mínimo para una operación efectiva; adicionalmente a la recolección de datos dicho equipo permite convertir datos a información procesable acerca de la condición de la máquina. Por citar un ejemplo, el CSI 2130 puede automáticamente distinguir entre desequilibrio y una falla en un rodamiento. De esta manera, el usuario es instantáneamente notificado acerca de la naturaleza del desarrollo de la falla al momento de la medición, por lo tanto, se centra la atención en aspectos críticos de la máquina. [2]

Para el análisis e interpretación de los datos y la evaluación del estado del equipo se utiliza el programa AMS Suite: Machiney Health Mananager, última etapa del proceso como se observa en el diagrama de la figura 3.1, el cual puede integrar múltiples tecnologías de diagnóstico predictivo para monitorizar diferentes

tipos de activos mecánicos e identificar síntomas de falla únicos. Las aplicaciones de tecnología modular incorporan diagnósticos y reportes en una base de datos para el análisis de condición de la máquina a través de toda la planta.

Dicha herramienta cuenta con un módulo avanzado de análisis de vibraciones que permite entre sus características: análisis de transiente, canal cruzado de fase (cross- channel phase), coherencia, funciones de transferencia, procesamiento de transientes para mostrar las características de la frecuencia de vibración durante el arranque o desaceleración de la máquina. Además, otra de sus funciones es crear un modelo de la máquina y lecturas de vibración animadas para generar documentación robusta de las fallas de la maquinaria. [3]

En Abbott Vascular Costa Rica se fabrican catéteres, unos tubos delgados y flexibles que pueden ser insertados en una cavidad del cuerpo, un conducto o vaso. Éstos se dejan en el interior del cuerpo, ya sea temporal o permanentemente, y actúan como una sonda. Son fabricados de una gama de polímeros como goma de silicona, látex y elastómeros termoplásticos. [4]

Para la producción de este tipo de dispositivos médicos se requieren áreas de trabajo en donde se puedan llevar a cabo las actividades con riguroso control del ambiente, comúnmente denominadas cuartos limpios (cleanrooms), en los cuales se controlan aspectos como: temperatura, humedad, descarga electrostática (ESD), partículas en el ambiente y presión. La operación básica de un cuarto limpio debe estar completamente aislado del ambiente de sus alrededores, esto se logra con un presión interna superior a la de sus periferias.

Las máquinas consideradas críticas en la producción son las que no tienen un sistema análogo que se encuentre inactivo o en espera en caso de una falla, es decir, no tienen redundancia. Además, una limitación del CSI 2130 al ser un instrumento fuera de línea, es que existen lapsos de tiempo en los cuales los



equipos no son revisados y no se conoce su estado de funcionamiento hasta la próxima revisión programada; son en estos períodos donde se presentan fallos inesperados.

Por lo tanto, el fin primordial de la implementación de un sistema en línea de monitorización inalámbrica en Abbott es aumentar la disponibilidad de los equipos que intervienen en la cadena productiva y con ello aumentar la productividad, reduciendo el número de averías imprevistas y mediante la detección temprana de fallos aumentar la vida útil de los equipos. Además, los gerentes pretenden mejorar la planificación en el mantenimiento de sus equipos, mediante la adquisición de herramientas predictivas.

Para finalizar, el sistema de monitorización en línea desarrollado se considera una herramienta adicional al plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones, especialmente para casos en concreto en que se detecta una anomalía en el funcionamiento de una máquina rotativa al cual debe dársele el seguimiento respectivo para tener la posibilidad de intervenirlo a tiempo y con el procedimiento más adecuado.

## **3.2. Antecedentes Bibliográficos**

### **3.2.1. Definición de mantenimiento**

Se define mantenimiento como “la función empresarial a la que se le encomienda el control constante de las instalaciones, así como el conjunto de trabajos de reparación y revisión, que son necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de las instalaciones productivas, servicios e instrumentos de los establecimientos.”

[5]

Dicho de otra manera más simple se define como un conjunto de actividades que permiten mantener un equipo o sistema en condición

operativa normal, de tal forma que cumplan las funciones para las cuales fueron diseñados y designados, el fin es restablecer dicha condición cuando esta se pierde. [6]

### **3.2.2. Función del mantenimiento dentro de la industria**

Actualmente el papel del mantenimiento en la industria no solo se limita a encontrar las fallas en las máquinas, sino a prevenir la aparición de las mismas, con el objetivo de maximizar la productividad, optimizar el rendimiento de la máquina y brindar un ambiente de seguridad a los usuarios. Esta tarea corresponde a un tipo de mantenimiento denominado predictivo, el cual se detallará más adelante.

### **3.2.3. Tipos de Mantenimiento**

El mantenimiento se clasifica principalmente en tres tipos, se citan a continuación:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo

#### **3.2.3.1. Mantenimiento correctivo**

Se le conoce como mantenimiento en crisis, durante mucho tiempo fue la técnica dominante del mantenimiento, la característica principal de las empresas que practican esta filosofía es producir sin parar hasta que algún componente falle, es decir, no existe mantenimiento alguno, ya que existe una división marcada entre las áreas de producción y mantenimiento. En los programas actuales de mantenimiento, el mantenimiento en crisis debe representar una pequeña fracción de los programas implementados.

Entre las características de este tipo de mantenimiento tenemos:

- Deterioro de más componentes y con mayor frecuencia.
- Paros prolongados del equipo.
- Requiere mayor cantidad de recursos entre repuestos y mano de obra.
- Genera mayores costos.

### **3.2.3.2. Mantenimiento preventivo**

Se denomina mantenimiento basado en el tiempo, su objetivo disminuir el tiempo que están los equipos fuera de funcionamiento producto de averías. En primer lugar se analiza el historial de cada máquina, se programan inspecciones periódicas antes de que ocurran los problemas que estadísticamente son probables. Así mismo, grupos de máquinas similares van a tener proporciones de fallas que se pueden predecir hasta cierto punto, si se toman promedios durante un largo tiempo, este comportamiento produce la llamada "curva de la bañera" que relaciona la proporción de fallas al tiempo de operación.

Este tipo de mantenimiento se basa en la inspección de la condición de los equipos, específicamente en sus componentes, con el fin de programar oportunamente el cambio de las partes. Entre sus características tenemos:

- Reemplazo de equipos programado con regularidad.
- Costos laborales programados con regularidad.
- Disminución en los costos de producción, los paros de equipo son programados con regularidad.
- Las máquinas pueden fallar entre revisiones programadas.

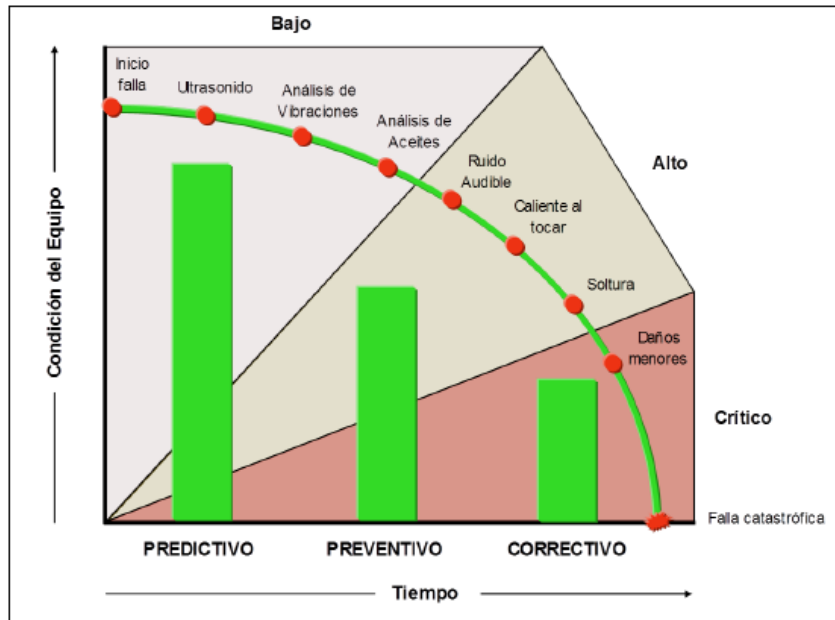
### **3.2.3.3. Mantenimiento predictivo**

Según la norma ISO 13372:2004 el mantenimiento predictivo es el mantenimiento enfocado en la predicción de la falla y en la toma de decisiones basadas en la condición del equipo para prevenir su degradación o falla [7]. Por su parte la EPRI – Electric Power Research Institute, define el mantenimiento predictivo como: un proceso que requiere de tecnologías y personal capacitados para integrar todos los indicadores disponibles de la condición de los equipos (diagnóstico, rendimiento y registros de datos del operador), históricos de mantenimiento y el conocimiento de diseño para tomar decisiones oportunas sobre los requerimientos de mantenimiento de equipos fundamentales. [8]

Utilizando ambos conceptos se deduce que el mantenimiento predictivo se maneja como un proceso, el cual debe estar adecuadamente fundamentado, con los procedimientos respectivos, personal capacitado y definida su implementación, tomando en cuenta los equipos y los costos que implican el desarrollo de las actividades.

Las tareas de mantenimiento preventivo revelan que en promedio: 30% no tienen valor agregado y deberían ser eliminadas, 30% deberían ser reemplazadas por tareas de mantenimiento predictivo y 30% podrían agregar valor si se rediseñan. El restante 10% representan a las tareas realmente útiles, y el 90% especificado son sobrecostos, los cuales pueden ser disminuidos a través de técnicas predictivas que evitan el progreso rápido de las fallas y la causa de un paro catastrófico. Se trata, por ende, de un mantenimiento más eficiente porque se determina el estado de la máquina de forma más exacta y confiable.

La evolución de las fallas en un equipo se representa mediante la curva P-F con los diferentes momentos donde aplica cada uno de los tipos de mantenimiento, se muestra en el gráfico de la figura 3.3.



**Figura 3.2** Curva P-F de mantenimiento.

Para explicar un poco la figura anterior, al inicio de cualquier falla se presentan síntomas muy leves, imperceptibles por el oído humano, pero que pueden ser detectados a través de algunas técnicas predictivas, tratándose así de una falla incipiente que representa un riesgo bajo en la operación del equipo. Al no tener implementado el mantenimiento predictivo, las fallas en los equipos evolucionan y se hacen perceptibles a los sentidos como ruidos particulares o incremento inusual de la temperatura. En este punto, debido a que la falla ya es perceptible, por lo general se toma la decisión de intervención, aunque en muchos casos la evolución del daño ha sido tan rápida que al detener el equipo ya se aproxima a la falla catastrófica, y ya se trata de un mantenimiento correctivo y no preventivo.

Las principales ventajas del mantenimiento predictivo son: [9]

- Incremento en la vida en la vida útil y disponibilidad (aproximadamente el 30%) de los equipos. [10]
- Permite acciones correctivas de manera preventiva. Las fallas inesperadas se reducen en un 55% y tiempo de reparación en un 60%.
- Incremento en un 33% en el tiempo de funcionamiento.

- Disminuye costos y mano de obra en aproximadamente un 50%.
- Incrementa la seguridad al medio ambiente.
- Reducción del tiempo de reparación en aproximadamente 60%.
- Incremento del 30% en el MTBF (Mean Time Between Failures) de equipos, es decir, se refiere al tiempo promedio entre ocurrencias de fallas que aumenta lo cual implica una menor frecuencia.
- Es la técnica de mantenimiento más efectiva.

Además, existen otros beneficios indirectos o menos visibles alrededor de un programa de mantenimiento predictivo, entre ellos: Extractos de charlas con personal de mantenimiento y operación involucrados en el cambio cultural de reparar a ser proactivos. [11]

- Menor estrés.
- Mayor tranquilidad.
- Facilita el trabajo.
- Mejores relaciones laborales.

Sin embargo, como todo procedimiento ingenieril, tiene algunas desventajas dentro de las cuales puedo citar:

- Aumenta la inversión en equipos de diagnóstico o subcontratación para realizar las rutinas.
- Mayor inversión en la capacitación del personal involucrado debido a que deben conocer las técnicas por aplicar y las alarmas que presentan con el fin de tomar decisiones asertivas.
- El potencial de ahorro no es fácilmente visto por la dirección.

Entre algunas de sus limitaciones tenemos:

- No se aplica a aquellos sistemas en los que existen reglamentos o normas que estipulan el número máximo de horas de funcionamiento de las

instalaciones o máquinas; en este caso se aplica el mantenimiento preventivo programado según dichos intervalos.

- Tampoco se aplica en aquellos sistemas en los que la detección de avería es costosa y/o poco fiable, ni en aquellos en los que la reposición se puede realizar a bajo costo y de forma inmediata [12]

En la siguiente sección se explica la principal técnica de mantenimiento predictivo de la cual se basa el sistema desarrollado, el análisis de vibraciones mecánicas.

#### **3.2.4. Análisis de vibraciones**

El mantenimiento predictivo mediante análisis de vibraciones es actualmente una de las técnicas en las que más se ha avanzado dentro de las tecnologías de mantenimiento de tercera generación. El estado de una máquina se puede conocer con una eficaz base de datos, un análisis de tendencias y comparaciones con espectros patrones de vibración con el fin de programar la intervención de los equipos en el momento en que realmente es necesaria, es decir, cuando las condiciones de deterioro se detectan y antes de que se llegue a producir una avería. [13]

Pasos para la aplicación del mantenimiento predictivo basado en el análisis vibraciones mecánicas.

Un programa de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones en máquinas rotativas inicia con la selección adecuada del conjunto de equipos que deben ser incluidos para preparar la monitorización. Para el éxito del programa la selección debe ser dirigida hacia aquellos equipos que están generando a la empresa altos costos de mantenimiento, o aquellos cuya posible avería podría resultar catastrófica para el proceso de producción.

1. Una vez seleccionadas las máquinas se busca información como: espectros de referencia, historial de mantenimiento, datos técnicos del equipo, condiciones de operación.
2. Luego a cada máquina seleccionada en el paso 1, se le definen los siguientes rubros: Puntos de medición (axial, radial, horizontal, vertical), magnitud a medir (desplazamiento, velocidad o aceleración), selección adecuada del sensor para abarcar el rango de frecuencias de operación.
3. Definición del intervalo de frecuencia a medir mediante la familiarización con los espectros característicos de cada máquina. En la medida de lo posible se obtendrán los cambios de espectros y amplitudes ante variaciones o desviaciones en las condiciones de operación.

Para cada máquina es preciso establecer los criterios de severidad, clasificados con frecuencia en tres tipos:

- ALARMA - nivel de vibración severo.
- PARADA/ADVERTENCIA - nivel de vibración no aceptable.
- NORMAL – nivel de vibración aceptable.

En caso de no disponer de criterios del fabricante de los equipos se acudirá, como punto de partida, a las normas existentes (ISO 2372). El conocimiento de la máquina y su historial, serán la base más segura para la redefinición de los niveles óptimos de la máquina en funcionamiento.

La frecuencia de muestreo no está regida por alguna regla que establezca cuál debe ser el intervalo entre dos mediciones consecutivas de la máquina, pero sí está sujeta a factores como los siguientes:

- Importancia de la máquina en el proceso productivo.
- Características específicas de la propia máquina, eléctricas y de fabricación.



- Estabilidad de las gráficas de tendencia.
- Historial de averías.

Dicha frecuencia de muestreo de los equipos monitorizados se establece en primer lugar de acuerdo a estos criterios y será el proceso dinámico de optimización del programa quién defina el intervalo más adecuado para cada máquina. Así mismo, sobre la base de información obtenida y como síntesis para la toma de decisiones, se realizarán las siguientes fuentes de información:

- Curva de análisis de tendencia que representa la variación de la amplitud de la vibración total en el tiempo.
- Curvas de análisis de tendencia de frecuencias típicas y armónicos más significativos del espectro.
- Mapas espectrales en función de las condiciones de operación. [14]

### **3.2.5. Clasificación de la maquinaria**

Sin importar la naturaleza de la planta, las máquinas que conforman el proceso productivo se pueden clasificar ya sea según su tamaño o su importancia, la clasificación basada en la importancia de las mismas en el proceso establece los siguientes tipos:

#### **3.2.5.1. Maquinaria crítica**

Las máquinas críticas ante un fallo, son capaces de detener toda la cadena de producción. Debido al impacto en la producción de estos equipos, son debidamente vigilados. Además, la reparación o reconstrucción de estos equipos son realizadas bajo elevados estándares de calidad, incluso en algunos casos con la supervisión de la empresa de fabricación. Sin embargo, aunque son máquinas vitales para la operación de la planta, éstas únicamente representan entre el 10% y 15% del total de la maquinaria de la empresa, el mantenimiento otorgado bajo operación es mínimo, salvo paradas programadas por mantenimiento preventivo.

Un parámetro para clasificarlos es la potencia de operación, donde se consideran equipos críticos aquellas máquinas de potencia mayor a los 300 hp.

### **3.2.5.2. Maquinaria semi-crítica**

Las máquinas semi-críticas se caracterizan por causar pérdida parcial de la producción ante un siniestro, sin embargo, hacer el cambio de estos equipos no representa un problema tan serio como lo son las máquinas críticas, aunque el mantenimiento de estos equipos es prioridad dentro de la empresa.

Las máquinas semi-críticas representan aproximadamente entre un 10% y un 15%, por lo tanto, estos equipos son monitorizados por personal especializado con mucha experiencia. El rango de potencia para considerar una máquina como semi-crítica está entre los 150 hp y los 300 hp.

### **3.2.5.3. Maquinaria de proceso**

Usualmente la distribución está gobernada por los equipos pequeños, los cuales no tienen ninguna consecuencia negativa sobre la producción, por lo tanto, son equipos que reciben muy poco mantenimiento, por situaciones como redundancia o despilfarros, y si el equipo falla, se reemplaza inmediatamente.

Un estimado indica que las máquinas de proceso representan entre un 70% y un 80%, generalmente estos equipos son monitoreados esporádicamente por el personal menos calificado. Las máquinas con potencia menor a 150 hp se consideran de proceso. [15]

### **3.2.6. Normas de severidad de la vibración.**

Las normas sobre severidad de las vibraciones mecánicas constituyen una guía para comenzar un acercamiento a lo que representa la condición normal de operación de la máquina, la norma ISO 2372 es la norma de referencia, actualmente sustituida por la norma ISO 10860 establece los diferentes límites de

condición mecánica de la máquina con base en la potencia y el tipo de soporte, dichos niveles de referencia aplican para valores globales de velocidad RMS de la vibración, para el rango de frecuencias definido entre los 10 Hz y los 1 000 Hz.

Las normas anteriores representan únicamente un acercamiento a la condición de la máquina, por lo tanto, la condición real del equipo está dada por las variaciones sufridas en los niveles de vibración respecto a los niveles de referencia de la misma.

Velocidad RMS (mm/s)	45	No permisible	No permisible	No permisible	No permisible	Velocidad RMS (mm/s)																															
	28						Apenas tolerable	Apenas tolerable	Apenas tolerable	Apenas tolerable																											
	18										Aceptable	Aceptable	Aceptable																								
	11,2													Bueno	Bueno	Bueno																					
	7,1																Bueno	Bueno	Bueno																		
	4,5																			Bueno	Bueno	Bueno															
	2,8																						Bueno	Bueno	Bueno												
	1,8																									Bueno	Bueno	Bueno									
	1,12																												Bueno	Bueno	Bueno						
	0,71																															Bueno	Bueno	Bueno			
	0,45																																		Bueno	Bueno	Bueno
	0,28																																				
0,18	Bueno	Bueno	Bueno																																		
				<b>Grupo K</b>	<b>Grupo M</b>	<b>Grupo G</b>	<b>Grupo I</b>																														
				Máquinas pequeñas, hasta 15 kW	Máquinas medianas, de 15 kW a 75 kW, o hasta 300 kW wn fundaciones especiales	Máquinas grandes con fundaciones rígidas y pesadas con frecuencias naturales mayores a la velocidad de la máquina	Máquinas grandes que operan a velocidades por encima de la frecuencia natural, turbomáquinas																														

**Figura 3.3** Criterios de severidad de vibración (10 Hz - 1 000 Hz) VDI 2056, ISO 10816-3, BS 4675. [16]

### **3.3. Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.**

#### **3.3.1. Vibraciones**

Un cuerpo vibra cuando experimenta cambios alternativos, de manera que sus puntos oscilen sincrónicamente en torno a sus posiciones de equilibrio, sin que el campo cambie de lugar. También, se define como un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual surge de una entrada de energía dependiente del tiempo. [17]

##### **3.3.1.1. Parámetros de una vibración**

- Frecuencia: permite localizar el tipo de defecto que existe en una máquina y el elemento donde se ha producido el error. La frecuencia de la vibración es el inverso del periodo y su unidad característica es CPM (ciclos por minuto), Hertz (Hz) o CPS (ciclos por segundo). Las diferentes fallas son detectadas por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o de sus múltiplos. Cada tipo de problema muestra una frecuencia de vibración en específico. Las causas que producen la vibración se identifican comparando la frecuencia de ésta con la velocidad de giro de la máquina, dicha frecuencia puede no ser única, pero la mayoría de las frecuencias a las que se da la vibración serán iguales a la velocidad de giro o alguno de sus múltiplos. [18]
- Amplitud: es un indicador de la gravedad del problema, esta característica da una aproximación del estado de la máquina. La amplitud de desplazamiento, velocidad o aceleración se puede medir en valores pico, pico- pico y RMS (Root Mean Square). [18]

### **3.3.2. Métodos para el análisis de señales**

#### **3.3.2.1. Análisis de una señal en el tiempo**

Una señal en el tiempo describe el comportamiento de la vibración en el transcurrir de un período de tiempo. Aunque la señal no es tan útil como la que se obtiene de otros tipos, un análisis de señal de tiempo puede proveer una pista en la condición de la máquina que no siempre es evidente en un espectro de frecuencia. Una señal de tiempo, se obtiene colocando un acelerómetro o un sensor de velocidad y graficando la amplitud versus el tiempo. [19]

#### **3.3.2.2. Nivel de vibración Overall**

El nivel de vibración overall es la medida total de la energía asociada con todas las frecuencias que componen el espectro de la vibración. El valor de vibración overall o global es comparado con el valor tomado cuando la máquina se encuentra en condiciones normales de operación y con los valores de alarmas establecidos. Los valores overall son graficados para observar los cambios en la condición de operación en períodos de tiempo determinado. La medida de vibración overall es la técnica de vibración más rápida para evaluar la condición de la maquinaria, pero es una técnica que suministra poca información para realizar un diagnóstico de la causa de la vibración.

La medida de vibración overall es un buen inicio cuando las lecturas son comparadas con lecturas anteriores, ya que permiten determinar cuando la máquina está vibrando más de lo usual. Sin embargo, medidas de valor overall no son precisas para medir señales de vibración de bajas frecuencias. [19]

### **3.3.2.3. Análisis de espectros de frecuencia**

Un espectro FFT suministra información relevante para determinar la localización y la causa de la falla en una máquina rotativa, esto corresponde a una de las tareas más difíciles en el análisis de condición de la maquinaria. El método de análisis espectral es el recomendado para resolver los problemas de vibración debido a que éstos se presentan a lo largo de todo el rango espectral. A partir del análisis espectral se determinan las causas de la vibración, el nivel de criticidad, las medidas a tomar, además, observando la tendencia se conocerá cuando estos problemas se convertirán en críticos.

El análisis espectral corresponde a la descomposición del valor overall en las diferentes frecuencias que componen la señal, las cuales corresponden a las armónicas de un movimiento periódico. Los espectros de frecuencia generalmente se refieren a la frecuencia de operación del equipo que se está analizando, corresponde al múltiplo 1X. Si existen armónicos o subarmónicos de la frecuencia de giro, éstos se denominarán 2X, 3X, 4X, ..., entre otros múltiplos.

Las fallas en las máquinas rotativas se determinan mediante análisis de vibraciones de espectros de frecuencia, técnica mediante la cual se compara con espectros típicos del problema o con el conocimiento de la forma de onda. [19]

### **3.3.3. Análisis de los niveles de vibración**

La determinación de los niveles normales de vibración es uno de los parámetros más importantes en el análisis de vibraciones en máquinas de una industria. Una incorrecta determinación de estos parámetros puede conducir a consecuencias irreversibles para los equipos, y por ende, para los métodos de producción en las industrias. En la determinación del nivel normal de vibración para una máquina en específico, existen una serie de factores relacionados con la experiencia del operador en el campo de mantenimiento y en la operación de las

mismas, las características vibracionales previas y su evolución. Como referencia deben conocerse los valores de máquinas análogas, o también, los valores recomendados por las normas internacionales ISO sobre vibraciones mecánicas son un parámetro de comparación.

Un método común para la determinación de los niveles normales de vibración es el análisis de tendencia, es un método muy simple el cual se basa en la graficación de los valores globales de vibración de la máquina durante su funcionamiento a través del tiempo. Se puede implementar de dos maneras: manual tomando muestras continuamente o automático mediante un sistema en línea de mantenimiento basado en la condición. Si el estado actual es normal, los niveles de vibración mantienen sus valores constantes a través de las muestras almacenadas, caso opuesto, si aparece alguna anomalía dichos valores empiezan a crecer lo cual genera una advertencia del estado de la máquina.

El análisis de tendencia tiene aplicación en el estudio preliminar de la máquina, se establece como regla la toma de mediciones periódicas para obtener la tendencia de los valores de vibración de la misma. Además, con el análisis de tendencia se puede determinar el momento de posible rotura tomando como referencia el valor máximo permisible del nivel vibración.

También, el análisis de tendencia tiene como restricción que las mediciones se efectúen sobre los mismos puntos de medición, establecidos según la estrategia previa para el estudio de la máquina, sin alterar las mismas condiciones del muestreo. El análisis se realiza tanto sobre los valores globales de la vibración, como sobre los espectros de vibración. [14]

### **3.3.4. Señales generadas por las vibraciones mecánicas en máquinas rotativas**

En la etapa de análisis de vibraciones mecánicas se utilizan espectros de frecuencia o espectros FFT (Fourier Fast Transform), mediante la relación entre amplitud y frecuencia es posible determinar la causa de las fallas; dicha relación se basa en el hecho de que existen fallos que se presentan a una determinada frecuencia múltiplo de la frecuencia de operación del equipo, y al existir un aumento en la amplitud, existe un aumento en la severidad del fallo.

Las vibraciones mecánicas se comportan como una partícula con movimiento armónico simple, por ende, la vibración tiene las siguientes características:

- Desplazamiento.
- Velocidad.
- Aceleración.

#### **3.3.4.1. Desplazamiento**

Corresponde a la distancia relativa entre el objeto medido y un nivel de referencia, es utilizada preferiblemente en máquinas rotativas de bajas revoluciones, el desplazamiento pico-pico representa la distancia total recorrida por la partícula vibratoria. Debe ser mide con sensores de corrientes parásitas. Su unidad de medida son los micrones o mils (milésimas de pulgada).

Debido a que el desplazamiento mide la distancia relativa entre objetos, si la máquina y el apoyo del sensor se mueven juntos, el desplazamiento resultante es cero, aunque la máquina vibre considerablemente.



#### **3.3.4.2. Velocidad**

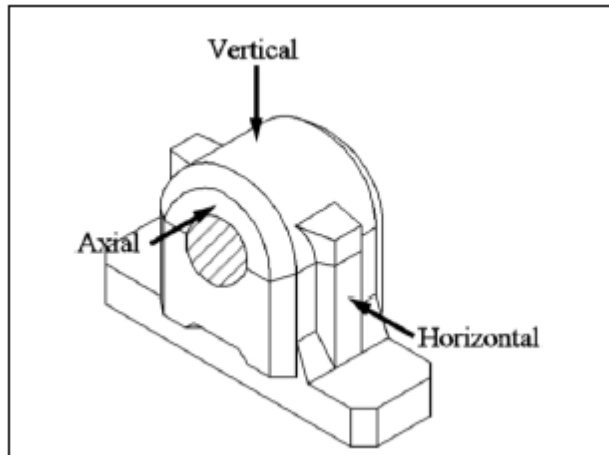
Se considera la velocidad como la medición general para la detección de problemas en las máquinas, esto se debe a que la mayoría de los problemas de los equipos generan vibraciones en baja y media frecuencia, por ende, es adecuada la medición de velocidad en dicho rango de frecuencias. La velocidad de la vibración tiene distintas unidades, se mide en mm/s o in/s (IPS), las normas ISO 2372, ISO 10816, VDI 2056 (norma alemana) y BS 4675(norma británica) se encuentran en unidades de velocidad RMS, sin embargo, también se puede medir la velocidad pico o pico a pico.

#### **3.3.4.3. Aceleración**

Las mediciones de aceleración son utilizadas para analizar fallas en alta frecuencia y baja amplitud incluso hasta 40 kHz; comúnmente se utiliza para medir las señales generadas por rodamientos y engranajes, así como las frecuencias de paso de alabes. Las mediciones de aceleración se miden en G's, donde  $1G = 9.81m/s^2$ . [15]

#### **3.3.5. Planos de medición**

Para analizar máquinas rotativas, generalmente se habla de tres planos de medición: horizontal, vertical y axial. Cada uno de estos planos genera información útil para determinar las fallas en los equipos, sin embargo, es importante tener en cuenta que los problemas generalmente se determinan con las relaciones existentes entre dichos planos. En la figura 3.8 se muestra un diagrama con la orientación de los planos de medición con respecto al eje del motor.



**Figura 3.4** Diagrama de planos de medición.

### **3.3.5.1. Horizontal**

El desbalance y el desalineamiento son las causas más comunes de vibraciones en máquinas rotativas, el plano horizontal genera información muy útil para determinar este tipo de fallas, debido a que las máquinas comúnmente se anclan de arriba hacia abajo, dejando en el plano horizontal cierto grado de libertad de movimiento. La medición en el plano horizontal generalmente es utilizada como referencia rápida del estado de los equipos.

### **3.3.5.2. Vertical**

Normalmente las magnitudes obtenidas en el plano vertical son menores a las obtenidas en el plano horizontal, esto puede deberse a los anclajes de las máquinas y a la acción de la gravedad, sin embargo la medición en el plano vertical es de gran ayuda a la hora de determinar problemas de soldaduras mecánicas y desalineamiento.

### **3.3.5.3. Axial**

Generalmente se espera que la medición obtenida en el plano axial sea la menor que las obtenidas en los otros planos, sin embargo, a la hora de hablar sobre desalineamiento o desbalance de cargas en voladizo, la información en el plano axial es relevante. [15]

## **Capítulo 4: Sistema de monitorización inalámbrico de vibraciones mecánicas.**

La falta de planificación y herramientas predictivas para el mantenimiento en Abbott Vascular es la principal causa de pérdidas en el ámbito económico y de producción, debido a los costos por reparaciones en las máquinas que presentan fallas imprevistas. Dicha afirmación, sintetiza la problemática existente en el departamento de facilidades, específicamente con el plan de mantenimiento predictivo enfocado a vibraciones mecánicas.

Dicho plan es una técnica que está comenzando a implementarse internamente en la compañía, pues existe una dependencia a consultores en esta área de vibraciones para monitorizar periódicamente las maquinarias. Producto de la discrepancia en cuanto al resultado de los análisis entregados por dichos contratistas y principalmente para disminuir los egresos por concepto de reportes, se decidió paulatinamente incorporar al departamento el análisis de vibraciones para todos sus equipos.

De esta manera, la propuesta inicial solicitada por la empresa era realizar una monitorización en línea para máquinas con niveles de criticidad considerables y riesgosos para el desarrollo de la producción. En dicha entrevista se identificó la problemática existente por la falta de incorporar mayor cantidad de recursos en herramientas auxiliares al programa predictivo.

Por otro lado, según se planteó en un inicio, la alternativa corresponde a un sistema basado en la condición de la máquina para realizar una monitorización en línea de los valores globales de vibración. Por recomendación y estudio de los equipos de propósito específico de la compañía IMI Sensors del área de vibraciones y la cual corresponde a un proveedor de dichos dispositivos para la empresa, se analizaron los alcances existentes para la solución propuesta. A partir de consultas a distribuidores de equipo predictivo se obtuvieron criterios de

funcionamiento y compatibilidad para cumplir con el diseño propuesto. Seguidamente se detallan los criterios utilizados para la elección y el uso de los componentes.

#### **4.1. Descripción de hardware**

Los bloques que conforman el sistema, mostrados anteriormente en la figura 3.1, contienen diversos dispositivos de hardware con funciones específicas, por lo tanto, es necesario detallar la estructura y funcionamiento de cada uno dentro del sistema de monitorización inalámbrica de vibraciones, se presentan las características de diseño más relevantes y los criterios de selección de cada dispositivo.

##### **4.1.1. Acondicionamiento.**

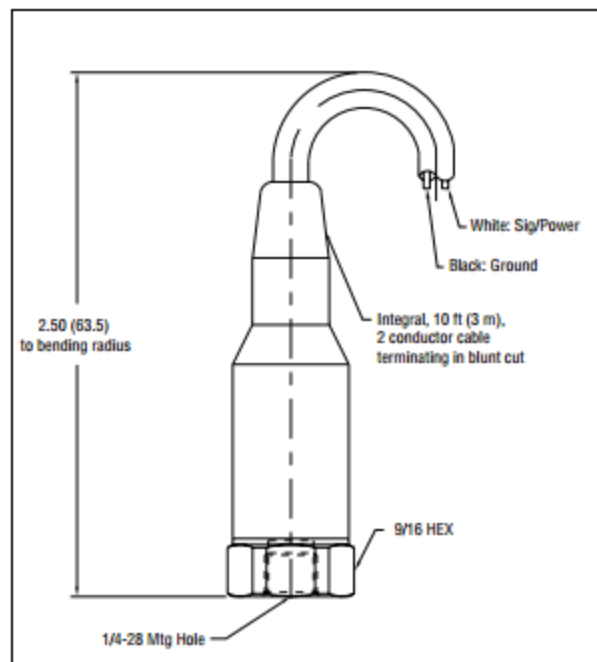
Dicha etapa tiene la función de digitalizar el valor global, proporcional a la cantidad de energía contenido en el espectro de vibración medido por cada uno de los acelerómetros colocados en seis diferentes posiciones en la máquina. Utilizando diferentes criterios de selección que justifican la escogencia de dicho hardware sobre otras alternativas, así como cambios realizados en su configuración durante el proceso de diseño.

##### **Sensores ICP 608A11:**

Los acelerómetros ICP 608A11 son sensores pequeños y de bajo costo que impulsan la instalación permanente para sistemas de monitorización en línea como una idea atractiva. Dicho modelo ofrece las características solicitadas por los tecnólogos de vibración e ingenieros de confiabilidad, entre ellas: pequeño tamaño que permite instalación en lugares confinados, construcción de acero inoxidable y sellamiento hermético soporta contaminación química e instalaciones

sumergidas, cable integral que facilita la conexión a gabinetes, son aislados de ruido de tierra y su señal puede ser transmitida a través de largas distancias.

Dichos dispositivos tienen una sensibilidad de  $10.2 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ , rango de medida de  $\pm 490 \text{ m/s}^2$  y un rango de frecuencia de  $0.5 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$ . Además, son cerámicos de uso industrial y de propósito general, por lo tanto, cumplen los requerimientos para dicha aplicación. Su salida corresponde a una señal cruda de vibración de los equipos, por lo tanto, requiere de su tratamiento para poder ser interpretada, como por ejemplo analizadores de espectros. Se requiere un sensor de este tipo por cada punto de medición con respecto al eje. En la figura 4.1 se muestran especificaciones del ICP 608A11.



**Figura 4.1** Sensor ICP 608A11.

Dichos sensores requieren de dos conexiones para funcionar adecuadamente: la señal sig/power mediante la cual se debe garantizar una tensión de excitación de 18 a 24 VDC y una corriente constante de excitación en el rango de 2 a 20 mA. Para el caso de la señal ground requiere de una conexión a tierra común. Por otro

lado, para la selección de dichos sensores se tomaron en cuenta los siguientes criterios para cumplir las expectativas:

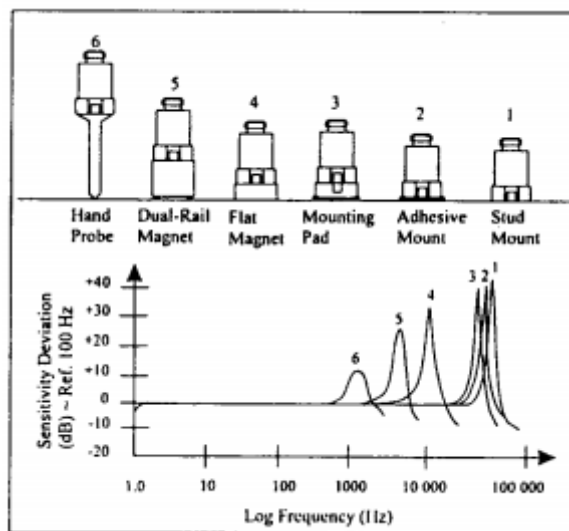
- Diseño del sensor: en la tecnología ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) los elementos cerámicos de sensado proveen excelente resolución y durabilidad en ambientes ruidosos, y son capaces de realizar mediciones a bajas y altas frecuencias. Específicamente tienen un rango de frecuencias entre 0,5 Hz y 10 kHz, dentro del cual se pueden considerar frecuencias medias para la medición de velocidad.
- Expectativas dinámicas: Luego de analizar el rango del barrido de frecuencia que establece el fabricante y comparando con el tipo de sensores utilizados en el equipo CSI 2130, también tienen un rango de frecuencias de 0,5 Hz a 10 KHz, lo cual queda por comprobar la compatibilidad con los transmisores de vibración utilizados. Dicha rango se determinó mediante una prueba controlada de laboratorio en la cual se midió el espectro de vibración del equipo en el cual se instaló el sistema, y se determinó que el límite mínimo del rango de frecuencias que corresponde a una subarmónica de la velocidad de operación está por encima de los 50 Hz y el número máximo de armónicos, correspondiente al límite superior, se encuentra por debajo de los 9 KHz. Por lo tanto, para las expectativas del barrido de frecuencias cumple las características requeridas para la medición de velocidad.

Otro parámetro importante para la elección del sensor más adecuado es la sensibilidad porque según el diseño propuesto se requiere tener compatibilidad y conformidad en la señal medida por el sensor que va a ser transmitida hacia un transmisor de vibraciones. En la siguiente sección se demuestra los criterios de elección de dichos dispositivos que permita afirmar el porqué de su elección.

- Ambiente de aplicación: es una consideración crítica durante la implementación del sistema, ya que el sensor elegido debe soportar el amplio rango de condiciones a las cuales va a ser expuesto, como la temperatura y la exposición a contaminantes químicos. Para dicho caso en

específico el sensor opera a una temperatura aproximada de 18 °C, temperatura a la cual según garantiza el fabricante la desviación de sensibilidad cercana al 0%.

Para la elección del método de montaje en las máquinas se deben considerar las ventajas y desventajas de una determinada técnica. Algunas características como: posición, robustez, rango de amplitud, accesibilidad, temperatura y la portabilidad es extremadamente crítica. Sin embargo, la más importante consideración y usualmente pasada por alto es el efecto de la técnica de montaje en altas frecuencias en el rango de operación del acelerómetro. En la figura 4.2 se muestran las seis técnicas de montaje y sus efectos en el rango de frecuencias.



**Figura 4.2** Conjunto de configuraciones de montaje y sus efectos a alta frecuencia.

A partir de la figura 4.3 se observa que el método de montaje no afecta la respuesta en bajas frecuencias. Además, el sistema de monitorización inalámbrico tiene la característica de ser portable, por lo tanto, el método de montaje utilizado corresponde al número 2 mediante un adhesivo especial para estructuras metálicas de máquinas, se trata del Loctite 317 con el activador Loctite 734; con el fin de tener el pico de la desviación de la sensibilidad a la mayor frecuencia posible sin afectar el rango de medición. Dicho método se utiliza para instalación



temporal o cuando la superficie de la máquina no puede ser perforada para evitar daños a la estructura o componentes muy cercanos a la misma.

Dicho método presenta dos posibilidades: montaje con base adhesiva o montaje adhesivo directo. El montaje con base adhesiva permite remover fácilmente los acelerómetros. Para la fabricación de las bases se tienen las especificaciones: material bronce, diámetro de 25,4 mm, altura de 10 mm y rosca de montaje de  $\frac{1}{4}$  con 28 hilos (hembra). En la figura 4.3 se muestra la base para los sensores.



**Figura 4.3** Base de montaje de sensor ICP 608A11.

Los parámetros de dichas bases se obtuvieron analizando la información de la hoja de datos de los acelerómetros, pues deben tener un diámetro mayor a la de la estructura del sensor para garantizar un montaje rígido, el tipo de rosca complementario a la del mismo y además, la altura de 1 cm para evitar el contacto entre el adhesivo y el tornillo, ya que no se requiere dejarlo fijado.

#### Transmisores ICP 682B03:

El nivel de vibración overall es la medida total de la energía asociada con todas las frecuencias que componen el espectro de la vibración.

Para acondicionar la señal de vibración generada por los acelerómetros ICP 608A11, de una señal en el tiempo a una variable analógica, se utilizan los transmisores ICP 682B03 de un canal, capaces de convertir señales de

aceleración, velocidad y desplazamiento en valores analógicos de tensión y/o corriente. Además, tienen la capacidad de acondicionar la temperatura de salida de sensores ICP con dicha característica.

Los acondicionadores 608A11 calculan el nivel de vibración overall o global, que es la medida total de la energía asociada con todas las frecuencias que componen el espectro de vibración, y lo convierte a un valor proporcional de corriente y/o tensión a su salida. En la figura 4.4 se muestra el transmisor de vibraciones.



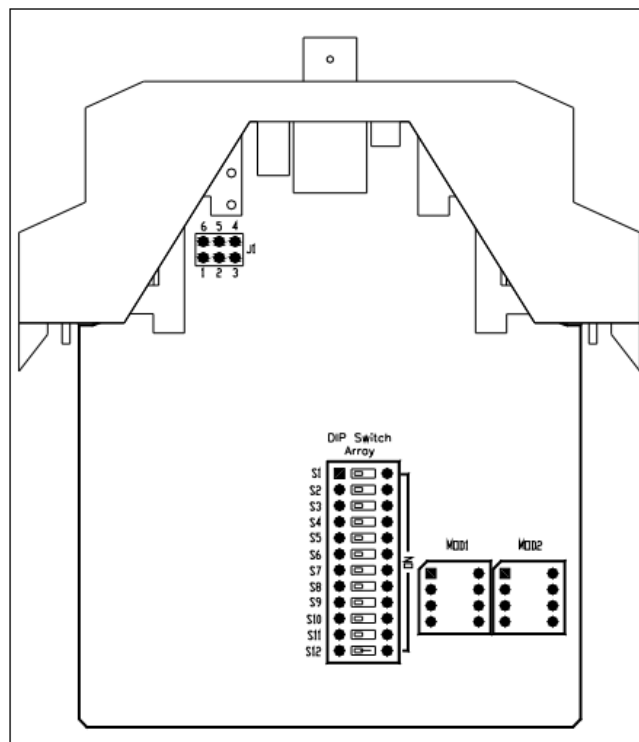
**Figura 4.4** Acondicionador de señales de vibración, ICP 682B03.

Entre los criterios tomados en cuenta para la elección de dichos dispositivos para el diseño propuesto, tenemos:

- Presenta conexión tipo din rail que facilita el montaje de los dispositivos al gabinete eléctrico, y garantiza una mayor organización tanto de los dispositivos como de las interconexiones entre los mismo.
- Alimentación seleccionable para alimentar a los sensores: 24Vdc no regulado, 18Vdc regulado, 4 mA de excitación. Por dicho motivo eléctricamente es compatible con los sensores de vibración ya que estos requieren una tensión de 18 V a 20 V y una corriente de 2 a 20 mA.

- Salida seleccionable proporcional al valor global de vibración en un rango de 0-5 V ó 0-10 V. Para dicho aspecto, considerando los dispositivos del diseño, la tensión de referencia máxima del microcontrolador del Arduino Uno es de 5 Vdc, por lo tanto, se elige el rango 0-5 V.
- La posibilidad de limitar el rango de frecuencias de medición es una característica predominante para la elección de dichos dispositivos, debido a que cuentan con dos módulos de filtrado, uno tipo paso bajo y otro paso alto.

Para la configuración de los dispositivos se muestra el diagrama interno de la placa de circuito impreso en la figura 4.5 que muestra la localización de los DIP switch internos, módulos de filtrado y el jumper de selección de la alimentación del sensor.



**Figura 4.5** Diagrama interno de placa de circuito impreso, 682B03.

Para la configuración de los transmisores es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

Se requiere modo velocidad para la medición en baja y media frecuencia, valores RMS y con un rango de 1 in/sec. Para la selección adecuada de los DIP Switch se muestra la siguiente tabla.

**Tabla 4.1** Configuraciones de DIP Switch, transmisor 682B03

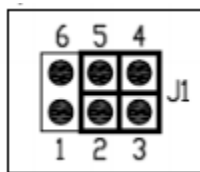
Range Setting	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
5g RMS	On	On	Off	Off	Off	Off	On	Off	Off	Off	On
5g Peak	On	On	Off	Off	Off	Off	Off	On	Off	Off	On
10g RMS	On	On	Off	Off	Off	Off	On	Off	Off	On	Off
10g Peak	On	On	Off	Off	Off	Off	Off	On	Off	On	Off
20g RMS	On	On	Off	Off	Off	Off	On	Off	On	Off	Off
20g Peak	On	On	Off	Off	Off	Off	Off	On	On	Off	Off
0,5 in/sec RMS	Off	Off	On	On	Off	Off	On	Off	Off	Off	On
0,5 in/sec Peak	Off	Off	On	On	Off	Off	Off	On	Off	Off	On
1 in/sec RMS	Off	Off	On	On	Off	Off	On	Off	Off	On	Off
1 in/sec Peak	Off	Off	On	On	Off	Off	Off	On	Off	On	Off
2 in/sec RMS	Off	Off	On	On	Off	Off	On	Off	On	Off	Off
2 in/sec Peak	Off	Off	On	On	Off	Off	Off	On	On	Off	Off
10 mils p-p	Off	Off	Off	Off	On	On	Off	Off	Off	Off	On
20 mils p-p	Off	Off	Off	Off	On	On	Off	Off	Off	On	Off
40 mils p-p	Off	Off	Off	Off	On	On	Off	Off	On	Off	Off

Se requiere una salida analógica proporcional a los valores globales de vibración en un rango de tensión de 0-5 Vdc, por lo tanto, S12 = OFF, de lo contrario, si S12 = ON la salida es de 0-10 Vdc.

Con respecto a los módulos de los filtros, en el espacio MOD1 se coloca el filtro paso bajo (LPF) con una frecuencia de corte de 10 KHz y en el espacio MOD2 el filtro paso alto con frecuencia de corte de 5 Hz (HPF). Esto con el fin de

ajustar el barrido de frecuencia en un rango comprendido por la medición del acelerómetro 608A11.

Los sensores ICP 608A11 requieren una alimentación de 18-28 Vdc y una corriente constante de 2-20 mA, por lo tanto, se configura el transmisor con alimentación regulada de 18 Vdc /4 mA (predeterminada de fábrica) como muestra la configuración de jumper en la figura 4.6.



**Figura 4.6** Configuración para alimentación de sensor ICP 608<sup>a</sup>11.

Luego de realizar una prueba de campo del sistema operando en un motor con una potencia de 16 kW y una velocidad de operación de 1785 RPM, se cambió la configuración de amplitud máxima predeterminada para los transmisores de vibración, inicialmente para un máximo de velocidad de 1 in/sec RMS, equivalente a 25,4 mm/s. Debido a que la máxima amplitud de velocidad medida para dicho equipo se encuentra por debajo de 8 mm/s para cada uno de los sensores, se modificó la configuración al modo de 0,5 in/sec RMS como amplitud máxima del valor global de vibración, que corresponde a valores inferiores a 12,7 mm/s.

Luego de evaluar las condiciones de operación de la máquina, se modificó la configuración inicial para los transmisores ICP 682B03, esta variación propia del proceso de diseño, mejoró la resolución de las muestras de los valores globales de vibración en un 50 %, cambiando de 19,69 mV/(mm/s) a 39,37 mV/(mm/s). Dicho cambio beneficia al sistema de acondicionamiento porque se vuelve menos sensible a variaciones poco significativas en la medición, por lo tanto, aumenta exactitud de los mismos con respecto su valor real.

## Arduino Uno:

El arduino uno es una placa de hardware libre basada en el microprocesador Atmega328, posee 14 pines digitales I/O (6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, tienen un reloj cerámico de 16 MHz, conexión USB, Jack de alimentación, un header ICSP (In Circuit Serial Programming), entre algunas de sus características. Dicho hardware contiene todos los dispositivos periféricos requeridos para soportar al microcontrolador, y simplemente requiere conexión a un computador mediante USB, alimentarlo con un adaptador AC-DC o batería para iniciar su funcionamiento. En la figura 4.7 se muestra una vista superior del Arduino Uno.



**Figura 4.7** Arduino Uno

Dicho dispositivo se utiliza para la toma de muestras analógicas de los valores globales de vibración para el conjunto de canales que conforman los transmisores ICP 682B03 y también para la comunicación serial con la etapa de transmisión/recepción mediante el envío de los valores digitales de las muestras. Por otro lado, la selección de hardware requiere tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Posee un convertidor analógico/digital (ADC) de 10 bits con 6 canales, justo el número para la conexión de las señales analógicas de los transmisores proporcional al los valores globales de vibración.
- El ATmega328 posee un cargador de arranque (bootloader) que le permite almacenar nuevo código sin el uso del programador de hardware externo. Esto facilita la programación del dispositivo ya que sólo requiere de una conexión USB a un computador y el software de programación de Arduino.
- El Arduino Uno se programa utilizando el lenguaje de programación de Arduino (basado en lenguaje wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing), por tanto, son herramientas con recursos múltiples con las cuales ya se ha trabajado ocasiones anteriores.
- El ATmega328 permite conexión serial con un dispositivo, dicho recurso se utiliza para enviar los datos a la etapa de enlace inalámbrico.
- El Arduino UNO es una placa de desarrollo, por lo tanto, se puede programar directamente desde el sistema de monitorización mediante una extensión usb, sin la necesidad de desmontar el equipo.
- Su bajo costo y buena calidad le dan ventaja sobre otro tipo de microcontroladores para el dicho proyecto.

### Tablero eléctrico:

El tablero eléctrico es la parte principal del sistema inalámbrico de monitorización, porque es dónde se concentran los dispositivos de conexión, control, medida, señalización y protección, dichos dispositivos permiten que una instalación eléctrica funcione adecuadamente. Seguidamente se presentan los diferentes dispositivos de maniobra y seguridad requeridos para el diseño del sistema, con sus respectivas especificaciones:

- **Allen-Bradley 1606XLP30E:** fuente de poder para montaje en din rail, alimentación en AC en el rango de 100-240V, eficiencia típica del 87,5%, tensión de salida en el rango de 24-28 V, corriente de salida hasta 1.3 A. Función: alimentar transmisores de vibración ICP 682B03, sensores ICP 608A11 y luz piloto. Para el diseño propuesto el consumo máximo del circuito es de 16,8 W, distribuido de esta manera: cada transmisor consume un máximo de 100 mA al igual que el consumo de la luz piloto. Por tanto, operando a sus máximas en condiciones extremas tenemos un total de 700 mA, y como su alimentación es de 24 V, obtenemos el dato de la potencia. Por tal motivo, la fuente se eligió de 30 W como potencia máxima entregada a una carga, lo cual garantiza la alimentación para todo el circuito sin sufrir ningún daño y sin operar al borde de su capacidad de potencia.
- **Allen-Bradley 1492SP1C040:** minidisuntor utilizado como dispositivo de protección contra corrientes de sobrecarga y cortocircuitos. Es de 1 polo, corriente máxima de 4 A y curva inductiva tipo C. Se necesita dicho dispositivo en el diseño, para proteger los transmisores de vibración y los acelerómetros, principalmente por su elevado costo.
- **Allen-Bradley 1492J3:** borne de una sola pieza para riel din, utilizado para la distribución de la alimentación en el circuito eléctrico. Es importante dejar previstas de alimentación en el diseño del circuito, por si en un determinado momento se quieren implementar mejoras o expandir el proyecto.
- **Allen-Bradley 1492WFB424:** borne portafusible con indicador led, tensiones en el rango 10-57 VCA/CD. Su función es proteger los transmisores ICP 682B03 de sobrecargas de corriente, son independientes para cada dispositivo.
- **Allen-Bradley 800FPP3:** modulo integrado con indicador led, 24 VAC/DC. Tiene la función de indicar encendido del sistema y adecuada alimentación de la fuente.



El diagrama eléctrico cumple la normativa IEEE 315-1975 referente a los símbolos gráficos para diagramas eléctricos y electrónicos, los cuales están diseñados de modo que sus puntos de conexión caen sobre el grid modular con el fin de ayudar a aquellos que lo para la preparación de los diagramas. Además, un aspecto importante es que dicho estándar es compatible con la Comisión Electrotécnica Nacional (IEC).

En la figura 4.8 se presenta el diagrama eléctrico del panel de control, el cual lleva consigo una etapa detallada de diseño para interconectar los dispositivos que forman parte del sistema de monitorización inalámbrico de vibraciones, porque es de suma importancia de la compatibilidad eléctrica. Para este diseño se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- El sistema cuenta con dos distribuciones de alimentación, una de 110 V y la otra de 24 V. La primera es la que ingresa a través de una conexión con la red eléctrica y energiza la totalidad del sistema. La fuente 1606XLP30E de 24 V alimenta los transmisores de vibración y la luz piloto. Dicha etapa fue rediseñada porque al inicio se iba a utilizar una fuente 1606XLP15E, con una potencia de salida de 15 W, el problema surgió luego de tomar en cuenta la luz piloto, por tanto, se volvió a calcular el consumo máximo de potencia, obteniéndose en resultado de 16,8 W. Asimismo, se utilizó el modelo de fuente con el doble de potencia máxima de salida.
- Los bornes azules en la etapa de 110 V representa las fase, los bornes blancos son el común. Para el caso de la parte de 24 V, los bornes azules son para el terminal positivo y los blancos para el negativo. Los bornes verdes son para la tierra común del sistema.
- A cada transmisor de vibración ICP 682B03 se le colocó un borne portafusible con indicador led, para protegerlo de excesos de corriente en la red. Los fusibles son de 100 mA que corresponde a la corriente máxima de consumo de los dispositivos.

- Para mantener un estándar en el circuito, el cableado se distingue para cada distribución de alimentación: café para la fase 110V, blanco para el neutro de 110V, negro con terminal gris para +24V, negro con terminal negro para 0V y verde para todas las tierras.

Para comprender las etiquetas asignadas a cada uno de los componentes incluidos en el diagrama eléctrico, se muestra cada una de ellas con su respectivo dispositivo y la especificación detallada de su función en el sistema. Se detallan estos aspectos en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Simbología de diagrama eléctrico

<b>Etiqueta</b>	<b>Dispositivo(s)</b>	<b>Especificación</b>
CTRL_01	Arduino Uno	Controlador principal
F_01 – F_06	Fusibles 1492WFB424	Fusibles de protección para transmisores de vibración
MAIN	Minidisyuntor 1492SP1C040	Alimentación principal
PWL	Indicador Led 800FPP3	PWL: Power Light
PWRS_01	Fuente 1606XLP30E	Fuente de alimentación. PWRS: Power Source.
VST_01 – VST_06	Transmisor ICP 682B03	VST: Vibration Sensor Transmitter
WP_01	XBee PRO XSC	WP: Wireless Point

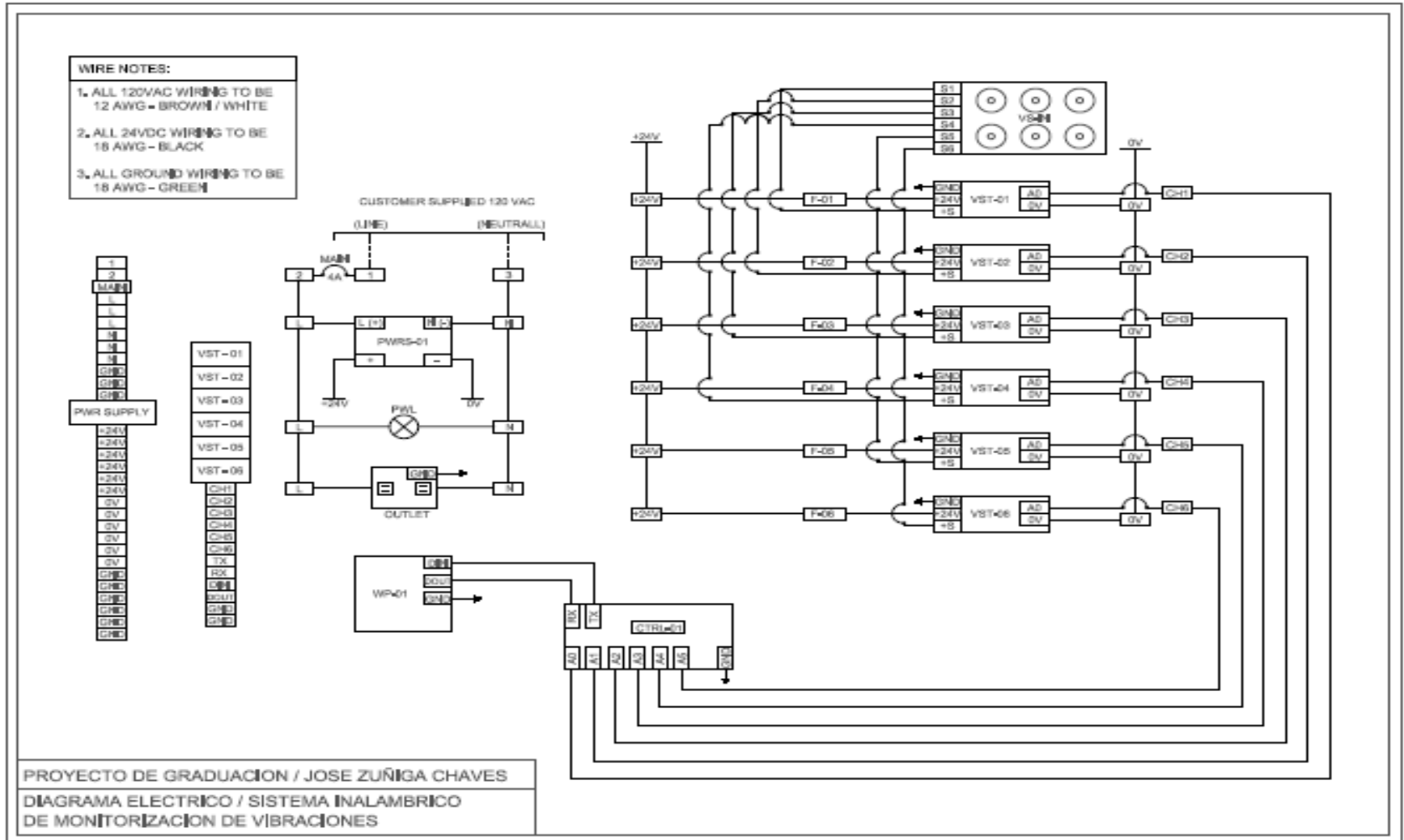


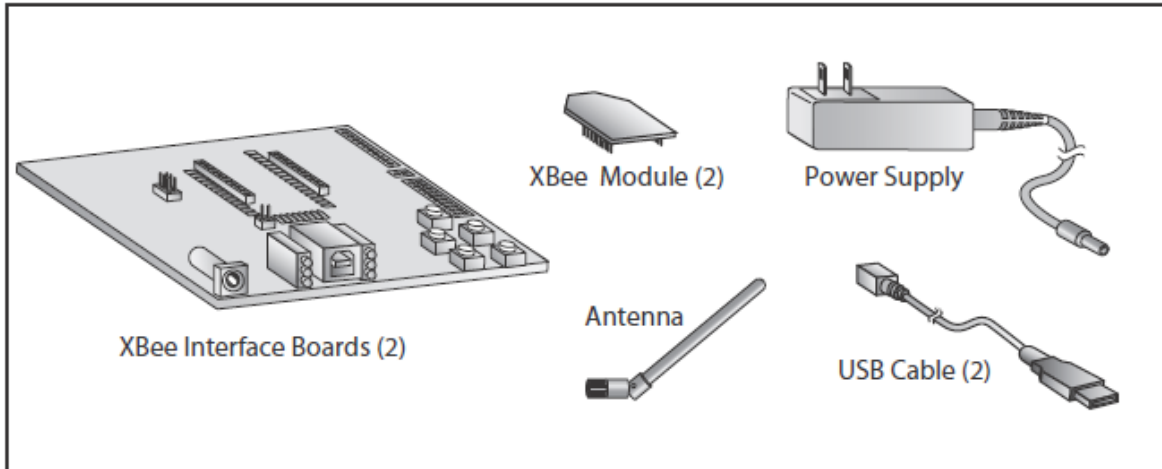
Figura 4.8 Diagrama eléctrico del sistema.

#### **4.1.2. Transmisión/recepción**

Para el envío de la información, se configura una comunicación inalámbrica de radio frecuencia que permita comunicación en el mezzanine, espacio entre el piso principal de producción y el techo de la industria. Los datos a enviar corresponden a los valores de magnitud de la señal de vibración digitalizada, los cuales son muestreados periódicamente. Se trata de un enlace estable de comunicación, de manera que si por alguna razón sufre desconexión de uno de sus nodos, se pueda reestablecer nuevamente.

El hardware a utilizar para el desarrollo del enlace de comunicación inalámbrico punto a punto, es el kit de desarrollo Xbee PRO XSC (S3B) con las siguientes características: banda de transmisión de 902 – 928 MHz (7 secuencias de salto comparten 25 frecuencias), alcance en interiores de hasta 610 m (10 kbps), puerto serial uart, entre otras. Debido principalmente a su largo alcance en aplicaciones de interiores, el soporte de dichos dispositivos y una banda frecuencia reservada para este tipo de aplicaciones, corresponde a una muy buena opción para la comunicación de dicho sistema de monitorización. Además, dicho hardware puede ser configurado mediante el puerto serial utilizando un terminal, modificando sus registros de propósito específico de la memoria interna.

El kit Xbee incluye una serie de dispositivos necesarios para establecer la red, entre ellos: 2 módulos Xbee PRO XSC de 2 diferentes tipos de antena (RPSMA, wire), 2 interfaces usb, fuentes de alimentación, entre otros. Se muestra en detalle cada uno de los componentes en la figura 4.9.



**Figura 4.9** Kit de desarrollo Xbee Pro XSC (S3B). [20]

Dichos dispositivos operan con el protocolo multipunto propietario, el cual tiene entre sus ventajas:

- Autoasociación: Cualquier nodo puede entrar o salir de la red en cualquier momento sin provocar un fallo en la misma.
- Ruta de descubrimiento: En lugar de mantener un mapa de la red, las rutas serán descubiertas y creado sólo cuando sea necesario.
- Reconocimientos selectivos: solo el nodo destino responderá a las solicitudes de la ruta.
- Entrega fiable: la entrega fiable de los datos se realiza por medio de confirmaciones de recibido.
- Modos suspendidos: modos de suspensión de bajo consumo con sincronización al despertar. [20]

La comunicación de radio de frecuencia corresponde a un enlace punto a punto en modo transparente, esto consiste en un cable virtual de comunicación entre los nodos de la red Xbee. De esta manera, todos los datos recibidos por el puerto serial del nodo de muestreo se envían a través del espacio libre hasta el nodo receptor de las muestras, el cual mediante el puerto serial los envía al computador.

## 4.2. Descripción de software

### 4.2.1. Acondicionamiento

En dicha etapa el ATmega328 contiene rutinas de programación en lenguaje Arduino para la toma de muestras analógicas de 0 a 5 V proporcionales al valor global o overall de vibración convertido por los transmisores ICP 682B03, correspondiente al rango de velocidad de 0 a 12,7 mm/s<sup>2</sup> rms (0,5 in/sec rms). En el siguiente diagrama de flujo se muestra en detalle el funcionamiento de dicho algoritmo.

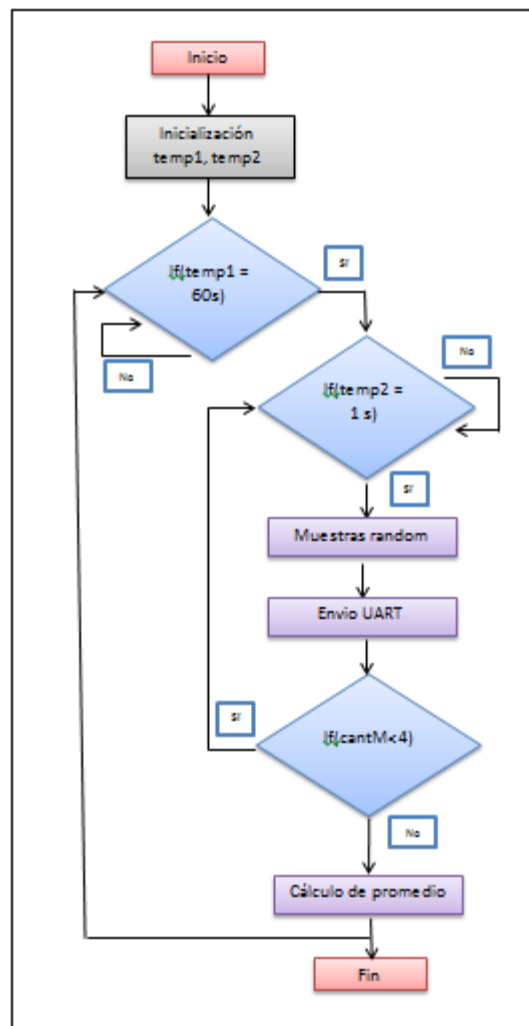


Figura 4.10 Diagrama de flujo de rutina de muestreo.

El diagrama de flujo de la figura 4.10 muestra el algoritmo de toma de muestras de valores globales de vibración, dicho procedimiento requiere de 2 temporizadores configurados por software para la repetición de 2 rutinas, una cada minuto y la otra cada segundo. Además, se incluye la conversión analógica a digital de las muestras para la transmisión inalámbrica.

Para entender mejor el algoritmo se explica cada una de sus etapas:

1. Inicialización de los temporizadores.
2. Cada minuto el temporizador temp1 ejecuta la rutina verificacion() para iniciar la toma de muestras.
3. Durante los próximos segundos el ADC toma tres muestras, una cada segundo, de cada uno de los seis canales analógicos.
4. El temporizador temp2 ejecuta la rutina lecturas(), luego de exceder a 4 o superior el número de muestras, calcula entre ellas el promedio.
5. Al final de la rutina, espera a que transcurra el minuto de dicha lectura y vuelve a iniciar el proceso.

Las etapas del algoritmo se representan detalladamente en el anexo B1, consideradas como las más representativas en el funcionamiento del Arduino Uno.

#### **4.2.2. Transmisión/recepción**

Para la programación de los dispositivos Xbee PRO XSC se utiliza un software propio de la compañía Digi international denominado X-CTU, que presenta entre sus características:

- Ventana de terminal integrada.
- Permite utilizar el test de rango.

- Muestra indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI: Receive Signal Strength Indicator).
- Actualización de firmware de módulos RF.
- Guarda y recupera configuraciones de módulos comúnmente utilizadas (perfiles).
- Restauración de parámetros a su configuración de fábrica.
- Programación de perfiles de radio en el ambiente de programación utilizando interfaz de línea de comandos.

El X-CTU permite la programación de los dispositivos Xbee PRO XSC a partir de dos modos:

1. **Comandos AT:** los dispositivos Xbee PRO XSC cuentan con una serie de comandos AT que representan a una configuración en específico de los módulos. Se clasifican en seis tipos: Seguridad y red, interfaz serial, diagnósticos, opciones de modo común (command mode), interfaz de radiofrecuencia y modos de sueño.
2. **Comandos binarios:** los comandos AT tienen un valor único correspondiente en binario para realizar la programación de los dispositivos mediante el puerto serial. EL comando RT debe establecerse con el valor de "1" en el modo de comando AT para habilitar la programación en modo binario. Además el pin 16 CMD debe ponerse en alto para entrar en modo de comando binario. Luego de de los datos del comando y sus parámetros, se pone en bajo el pin CMD.

Para la programación de los Xbee PRO XSC se debe conocer la función de cada uno de los comandos AT, su valor correspondiente en binario, el rango de valores permitidos y su valor por defecto. En el anexo B2 se muestra la tabla de referencia de comandos. Para la configuración de la red punto a punto en modo



transparente es necesario modificar los valores de los siguientes comandos con su debido detalle, mostrados en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Comandos AT de configuración Xbee PRO XSC

Comando AT	Tipo	Nombre de comando AT	Valor	Especificación
ID	Red y seguridad	Número de identificación.	0x3332.	Permite la comunicación entre dispositivos con valore de ID iguales.
DT	Red y seguridad	Dirección de destino.	Emisor: 0x0002 Receptor: 0x0001.	Valor que indica el o los destinatarios de la información transmitida.
MY	Red y seguridad	Dirección de origen.	Emisor: 0x0001 Receptor: 0x0002	Valor único que permite identificar los nodos en la red.
MK	Red y seguridad	Máscara de dirección.	0xFFFF	Permite configurar la dirección como local o global.
RR	Red y seguridad	Repeticiones de envío.	0x0001	Cantidad de intentos de envío de mensaje. Debe existir conformidad entre los nodos de la red.
RN	Red y seguridad	Retardos.	0x0000	Número de ranuras de retardo luego de la transmisión fallida de un paquete.
MD	Interfaz serial	Modo de transmisión.	0	Modo peer-to-peer en modo transparente
BD	Interfaz serial	Velocidad de datos de interfaz.	3	Baud rate de 9600.
NB	Interfaz serial	Paridad.	0	Sin paridad en el puerto serial.
PK	Interfaz serial	Tamaño de paquete de transmisión.	40	Máximo de un paquete de 40 bytes para transmisión.
SB	Interfaz serial	Bits de parada de la trama.	1	1 bit de stop en la trama serial.
PL	Interfaz de radio frecuencia	Nivel de alimentación	4	Nivel de alimentación de +24 dBm.
SM	Consumo de energía	Modo de sueño.	0	Modo de sueño desactivado.

Además, luego de identificar los comandos AT requeridos por nuestra aplicación de la red inalámbrica y su valor asignado, se procede a utilizar la terminal del programa X-CTU para configurar independientemente a cada uno de los dispositivos. Primero, se debe seleccionar en el software el puerto COM asignado por el sistema operativo para cada dispositivo y realizar una prueba de conexión, una vez establecida se procede a utilizar el terminal para la programación. En el diagrama de la figura 4.11 se muestra el algoritmo requerido para la programación de los dispositivos XBee PRO XSC.

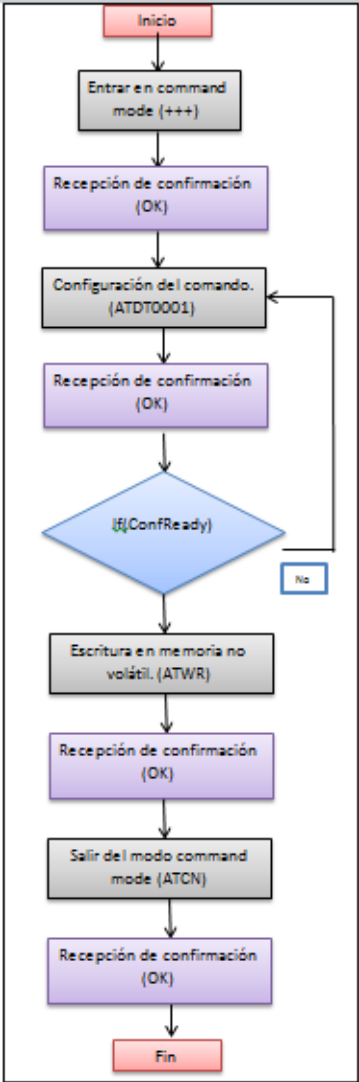


Figura 4.11 Diagrama de flujo de programación de módulos XBEE PRO XSC.

En la figura 4.11 se detalla el algoritmo de programación de los módulos del kit inalámbrico, con ejemplos de comandos en cada sección o sus correspondientes, se deben tener en cuenta los siguientes detalles:

1. Para entrar en el modo command mode se debe enviar “+++” para que el módulo lo identifique y acepte la solicitud. Para aprobar cada comando se debe pulsar ENTER. Cada vez que apruebe una instrucción responderá por el puerto serial con un “OK”.
2. La siguiente etapa es la configuración de los valores de cada uno de los comandos requeridos, mostrados en la tabla 4.3 Todos inician con AT seguido del nombre del comando (2 letras mayúsculas), por último utilizando un valor hexadecimal de cuatro dígitos se agrega el valor correspondiente.
3. Se pueden enviar todos los comandos en una sola línea o agrupados, separados por “,” y al final de cada línea de comandos se debe presionar ENTER. De igual manera, se recibe confirmación “OK” por parte del dispositivo.
4. Para almacenar la nueva configuración del módulo inalámbrico se envía el comando único ATWR con el fin de escribir en la memoria no volátil.
5. Por último, se recomienda salir de command mode con la instrucción CN, para finalizar con la programación del dispositivo.

#### **4.2.3. Interfaz de usuario**

Las figuras de tendencias corresponden a gráficas en el tiempo de los valores globales de vibración en magnitud (mm/s), con la posibilidad de superponer en una misma el comportamiento de dos o más sensores, con su respectiva simbología para poder diferenciarlas. Además, los niveles de alarmas son parte de la configuración del usuario, pues varían de una máquina a otra, y representan los

valores límite a los cuales una alarma de considera de precaución, y en el peor de los casos crítica.

Para el caso de las alarmas, se emplea una ventana adicional donde se muestran detalladamente los sensores conectados al sistema, su identificador, posición en la máquina y el nivel de alarma (normal, advertencia, crítico).

Para tal fin, se utiliza la plataforma IDE (entorno de desarrollo integrado) QT creator 4.7.4 y su librería qwt, creada para desarrollar aplicaciones de entornos gráficos con diversidad de componentes GUI y clases de utilidad que son principalmente útiles para programas con perfil técnico. Al lado de un widget de gráfico de 2D esta provee escalas, deslizadores, selectores, ruedas, botones para controlar o mostrar valores, matrices o rangos de tipo double, entre otros recursos.

Para la implementación de la base de datos se utiliza la librería escrita en C SQLite que implementa un motor de base de datos para SQL92 empotrable. Por lo tanto, SQLite es una librería que implementa un manejador de base de datos SQL embebido, es software libre por lo tanto el código fuente es del dominio público y licencia GPL. Sus desarrolladores destacan, que su principal característica, es su completo soporte para tablas e índices en un único archivo por base de datos, soporte transaccional, rapidez, escaso tamaño (unas 25 mil líneas de código C) y su completa portabilidad. [21]

La etapa de transmisión/recepción se comunica con el computador mediante el puerto serial, por lo tanto, se requiere una librería que permita leer y escribir a través de este dispositivo. Para tal fin es necesario importar la librería qserial-device, es cross-platform (plataforma-cruzada) para el uso con puertos serial, basada en QT4 y compatible en modo asincrónico.

#### 4.2.3.1. Funciones de módulos en la programación

La interfaz gráfica está compuesta por un grupo de módulos que contienen todas las rutinas necesarias para su funcionamiento, éstas se encuentran estratificadas para realizar tareas en específico dentro del código de programación y para mantener el orden del mismo como se estableció en el diseño. A continuación se presentan los módulos con su respectivo nombre referente a su función dentro del código, y además, una explicación detallada de cada uno, y de ser necesario extractos de las principales rutinas.

Se implementó la rutina que permite establecer una conexión entre la interfaz de usuario y un archivo de extensión `sqlite`, que almacena las muestras tomadas por el sistema y permite el acceso a los mismos. Se realizó dicha rutina con el fin de tener un respaldo del comportamiento de la máquina a través del período de monitorización. Se especifica el contenido propio de la función:

**Conectar.h:** contiene la rutina para establecer la conexión con la base de datos existente en el sistema en una ubicación específica del disco duro, se trata del directorio en cual el sistema operativo almacena los datos de las aplicaciones, por lo tanto, es una ubicación genérica. En caso de no existir el archivo `Prueba.sqlite`, lo crea al inicio. La función se denomina `createConnection`, es fundamental para la implementación de la base de datos local del sistema. Dicha función se implementó utilizando la librería `sqlite` de Qt creator, la cual permite conexión a bases de datos y un manejo versátil de la información. Desde un principio de definió utilizar dicho recurso el diseño del software.

Las gráficas de tendencias son la herramienta que permiten monitorizar el estado de la máquina, a partir de la comparación entre los diferentes canales de los sensores de vibración y de los niveles de alarma, por tal motivo, se implementó el módulo Incrementalplot que incluye los procedimientos requeridos para manejar los recursos de visualización de los gráficos y dar la posibilidad de controlar las muestras que se insertan.

**Incrementalplot.cpp:** posee la rutina para establecer las características de la gráfica, entre ellas: nombre de objeto, título del gráfico, etiquetas de los ejes, leyenda, y además las propiedades de cada una de las gráficas, por lo tanto, dicha configuración es preestablecida.

#### Funciones de Incrementalplot.cpp:

- Appendpoint() : función diseñada para agregar un punto nuevo a una determinada gráfica, recibe como parámetros: const QPointF &point, int curva. El primero corresponde a un vector de dos entradas, con los valores del eje x y del eje y del punto a incluir, el segundo es un entero para especificar la gráfica a incluir un determinado par ordenado.
- ClearPoints() : función para borrar todos los puntos de una determinada gráfica, recibe como parámetro int curva, que corresponde a un entero para especificar la gráfica a borrar en el área de la figura.
- Point\_alarm(): función para agregar a la gráfica los niveles de alarma: advertencia y crítico. Contiene una rutina similar a la explicada anteriormente para Appendpoint().
- Clear\_alarm(): función para borrar de la figura los niveles de alarma. Contiene una rutina similar a la mostrada anteriormente en la función ClearPoints().

Randomplot fue diseñado con un conjunto de rutinas para utilizar los recursos de incrementalplot en la generación de los gráficos de tendencia y en el acceso a la base de datos local para guardar o leer muestras. Se realizó con el fin de concentrar las funciones principales en el manejo de muestras y su visualización.

**Randomplot.cpp:** implementa la rutina para crear una tabla modelo, y así cargar los datos de las muestras de la magnitud de vibración su la fecha correspondiente. Se configura para que cada cambio que se le realice a dicho modelo ocurra inmediatamente al archivo de la base de datos. La tabla contiene 8 columnas para los siguientes encabezados: ID de la muestra, valores de cada canal (desde canal 1 hasta canal 6), y por último, la fecha de la muestra. También, en dicho archivo se configuran otras propiedades del gráfico como: el grid de la gráfica, el color de fondo, y los rangos de los valores del x y el eje y.

#### Funciones de Randomplot.cpp:

- Graficar(): función para graficar un determinado canal de muestras de valores globales de vibración, implementa un ciclo para recorrer cada una de las filas almacenadas en la base de datos, y de acuerdo al rango de fecha deseado permite mostrar en la gráfica sólo las que cumplen con la condición seleccionada. Recibe como parámetros de entrada: int curva (número de curva), QDate FechaInicio (fecha de inicio del rango) ,QDate FechaFinal (fecha fianl del rango ).
- ExportPlot(): Función utilizada para exportar el gráfico mostrado en la interfaz gráfica en el formato deseado, ya sea en documento de texto pdf o como una imagen jpg.
- Addsample() : Función para agregar un muestra a la base de datos local del sistema. Recibe como parámetros: double ch1 (canal1),double ch2

(canal2),double ch3(canal3),double ch4(canal4),double ch5(canal5),double ch6(canal6),int id (identificador de la muestra),QDate fecha (fecha actual de la muestra).

- Last\_ch1(): función que retorna el último valor almacenado en la base de datos de un determinado canal.

MainWindow es la ventana principal de la interfaz de usuario, concentra todos los recursos interactivos para el manejo del programa. Contiene una serie de rutinas para controlar la toma de muestras en tiempo real, mediante el uso de temporizadores implementados en software, tanto para leer los datos del puerto serial como para refrescar la gráfica de tendencias. Se realizó con el fin de facilitar al usuario todas las funciones requeridas por el sistema de mantenimiento basado en la condición en cuanto a los recursos visuales y de interacción.

**MainWindow.cpp:** es el módulo principal, corresponde a la interfaz gráfica. La función MainWindow se encarga entre otros aspectos: Inicialización de relojes de actualización y del puerto serial, agrega gráfico a la ventana, configuración de ventana auxiliar, entre otras.

#### Funciones de MainWindow.cpp:

- Update(): función para actualizar la gráfica mostrada en pantalla en tiempo de real, de manera que, si ingresan nuevos datos por el puerto serial o se presenta un cambio en el rango de fechas a visualizar, inmediatamente se detecta y se modifican según corresponda.
- Update\_serial(): función para lectura del puerto serial, utiliza la señal CambioBoton\_ para indicar la presencia de nuevos datos en el buffer de entrada.
- On\_comboBox\_activated: evento del mainwindow que permite seleccionar en el botón desplegable del menú principal, el canal a graficar. En la interfaz gráfica hay un espacio compuesto por un checkbox para comparar



con uno o varios canales, de manera que, si en el botón desplegable se selecciona un canal determinado, este mismo se desactiva en el menú de comparación.

- `on_checkBox_toggled()`: evento del mainwindow que detecta el cambio de estado de los checkbox del menú de comparación de canales, si se selecciona muestra la gráfica correspondiente, de lo contrario, borra la misma.
- `On_actionL_mites_triggered`: evento para mostrar ventana auxiliar de configuración de niveles de alarma.
- `recibir()`: función que actualiza en pantalla los valores límite de los niveles de alarma.
- `actualizar_alerta()`: función encargada de actualizar el menú resumen de nivel de alarma actual por cada uno de los sensores. Recibe como parámetros: `double nivel_medicion` (magnitud de vibración), `int sensor` (número de canal).

Los módulos del scroll y el zoom son fundamentales en la interpretación de los gráficos, porque facilitan el acercamiento y desplazamiento de la figura, a razón de incrementar la resolución de los ejes y así conocer con certeza el valor exacto de la magnitud de la vibración muestreada.

**Scrollbar.cpp**: módulo para realizar un desplazamiento de la gráfica mostrada en pantalla en el “eje x” y en el “eje y”. Dichas barras de muestran en la parte inferior y en la parte derecha de la figura, se utilizan con el puntero, de manera que, si se deja presionada una determinada barra, la gráfica se desplaza hacia el lado donde se mueva el puntero.

**Scrollzoomer.cpp**: módulo para realizar acercamiento a la gráfica en una región en específico, se presiona click izquierdo para seleccionar punto inicial de la región, dejándolo presionado se arrastra el puntero hasta dibujar la sección deseada, y por último, se observa con más detalle dicha sección. Además, al presionar click derecho se retorna a la vista de acercamiento previa la actual, y presionando el botón esc del teclado se retorna a su vista completa.

Teniendo como punto de comparación otros sistemas de monitorización, se diseñó una ventana auxiliar para configurar los niveles de vibración correspondientes a los niveles de alarma de advertencia y alarma crítica. Se implementó porque el sistema es portable, y requiere del ajuste de dichos niveles para las diferentes máquinas, a partir de la norma ISO 2372 mostrada anteriormente.

**Ventana2.cpp:** corresponde a la ventana secundaria de la interfaz gráfica para la configuración de los niveles de alarma. Contiene dos sliders, uno para nivel de advertencia y otro para nivel crítico, y dos spinbox para mostrar el valor actual de cada slider, el botón de guardar cambios es para cerrar la ventana y aplicar los cambios.

#### Funciones de Ventana2.cpp:

- `limit_warn()`: retorna el valor ajustado para el nivel de advertencia de los niveles de alarma.
- `limit_crit()`: retorna el valor ajustado para el nivel de crítico de los niveles de alarma.
- `on_pushButton_clicked()`: evento para emitir señal de finalización con el fin de guardar cambios y cerrar la ventana.
- `on_horizontalSlider_valueChanged()`: función para actualizar el valor del slider en el spin box.

## Capítulo 5: Resultados y Análisis

Para comprobar el funcionamiento adecuado del sistema de monitorización de vibraciones se utilizaron diferentes pruebas a cada una de las etapas del diseño, todo con el fin de realizar una comparación detallada entre el comportamiento esperado y el obtenido. Luego de verificar la conformidad de los resultados esperados se procede a interconectar las etapas del sistema para realizar las pruebas finales.

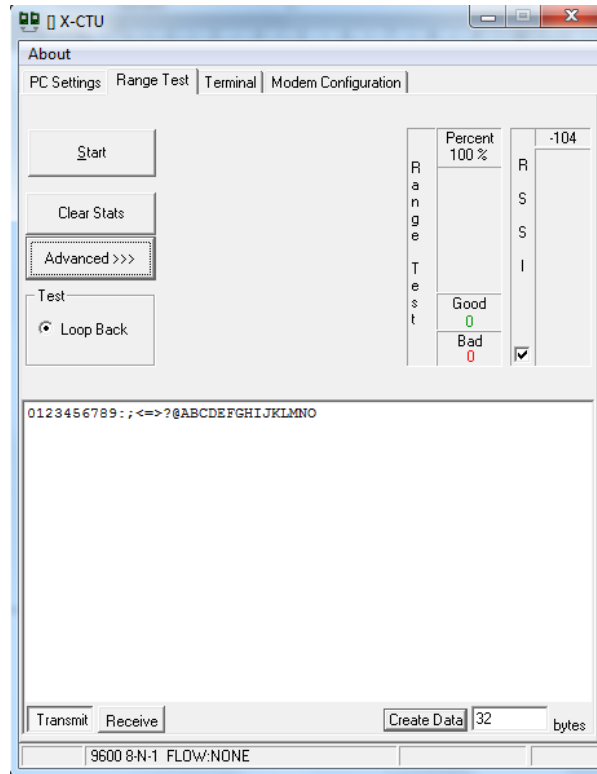
Las pruebas experimentales del sistema se realizaron utilizando el diagrama de bloques mostrado en la figura 4.1, para subdividir las tareas en tres partes: acondicionamiento de la señal de vibración, transmisión/ recepción de datos e interfaz de usuario. Para cada procedimiento se muestra detalladamente la configuración del software y del hardware, así como el circuito utilizado y los resultados obtenidos.

Para el caso de la etapa de transmisión/recepción se realizaron dos procedimientos para comprobar su funcionamiento, la primera corresponde a una prueba de rango (“Range Test”) para verificar el alcance de la red inalámbrica en distintas localidades del edificio, la segunda se trata de una prueba para verificar conexión satisfactoria entre los dispositivos inalámbricos con la simulación de muestras.

La prueba de rango se realizó utilizando el software para la programación de los módulos XBee PRO XSC denominado X-CTU, el cual tiene entre sus funciones una ventana gráfica para probar la conexión entre estos dispositivos, además presenta otras características para dicha prueba , entre ellas se tiene:

- Cálculo del porcentaje de paquetes de información recibidos satisfactoriamente, mediante el conteo de datos recibidos correctamente y datos fallidos.
- Presenta gráficamente el RSSI (indicador de intensidad de la señal recibida), en tres niveles de acuerdo a la intensidad de la señal en decibeles (db), en su orden de menor a mayor intensidad: rojo, amarillo y verde.
- Otras configuraciones avanzadas son: limitar el rango del retardo en la recepción de bytes de datos, limitar el número de muestras totales de la prueba, detener la prueba al identificar un error, tiempo de espera para recepción de datos.

Los dispositivos Xbee Pro XSC se programaron con la misma configuración para enviar datos desde el nodo conectado al PC hasta el nodo periférico, de manera que, los datos sean retransmitidos y se puedan monitorizar en la interfaz del X-CTU, específicamente en la pestaña del test de rango, en la figura 5.1 se muestra la ventana de dicho software.



**Figura 5.1** Interfaz de prueba de rango del X-CTU.

Con el fin de lograr la retransmisión del mensaje del nodo periférico, se debe configurar por hardware en modo loop-back, esto se logra colocando un jumper en el conector P8 de la tarjeta de interfaz modelo XBIB-U-DEV, dicho modo permite que los datos recibidos en el buffer de entrada sean cargados al buffer de salida del transmisor inmediatamente. En la figura 5.2 se muestra la configuración requerida.



**Figura 5.2** Jumper de loop-back de tarjeta XBIB-U-DEV

Como se mencionó anteriormente, ambos nodos deben programarse con la misma configuración para entrar en sincronía, la única diferencia es que el nodo periférico está en modo loop-back por hardware. El comando ID debe ser el mismo para ser visibles entre sí, DT es igual a 0x0000 para ambos, MY se establece como 0xFFFF para que MY sirva como dirección fuente y destino, MK es 0xFFFF para establecer direccionamiento local. En la tabla 5.1 se muestra la configuración detallada.

**Tabla 5.1** Comandos de configuración para prueba de rango.

Comando AT	Tipo	Nombre de comando AT	Valor	Especificación
ID	Red y seguridad	Número de identificación.	0x3332.	Permite la comunicación entre dispositivos con valore de ID iguales.
DT	Red y seguridad	Dirección de destino.	Emisor: 0x0000 Receptor: 0x0000.	Valor que indica el o los destinatarios de la información transmitida.
MY	Red y seguridad	Dirección de origen.	Emisor: 0xFFFF Receptor: 0xFFFF	Valor único que establece a DT como dirección fuente y dirección de destino.
MK	Red y seguridad	Máscara de dirección.	0xFFFF	Permite configurar la dirección como local.

Con respecto a la localización del nodo conectado al PC y el nodo periférico, se colocaron en tres posiciones distintas dentro del edificio, para comprobar el alcance de la red ante la presencia de diferentes tipos de obstáculos que debilitan la potencia de transmisión del mensaje, por lo tanto, son pruebas realizadas en el ambiente real de opera Esto permite conocer el potencial de los dispositivos inalámbricos Xbee Pro XSC en aplicaciones de interiores. En la figura 5.3 se muestra el diagrama de la planta de AVCR, en las zonas de oficina y mezzanine, y se le incluyó la localización de los nodos para la prueba de rango.

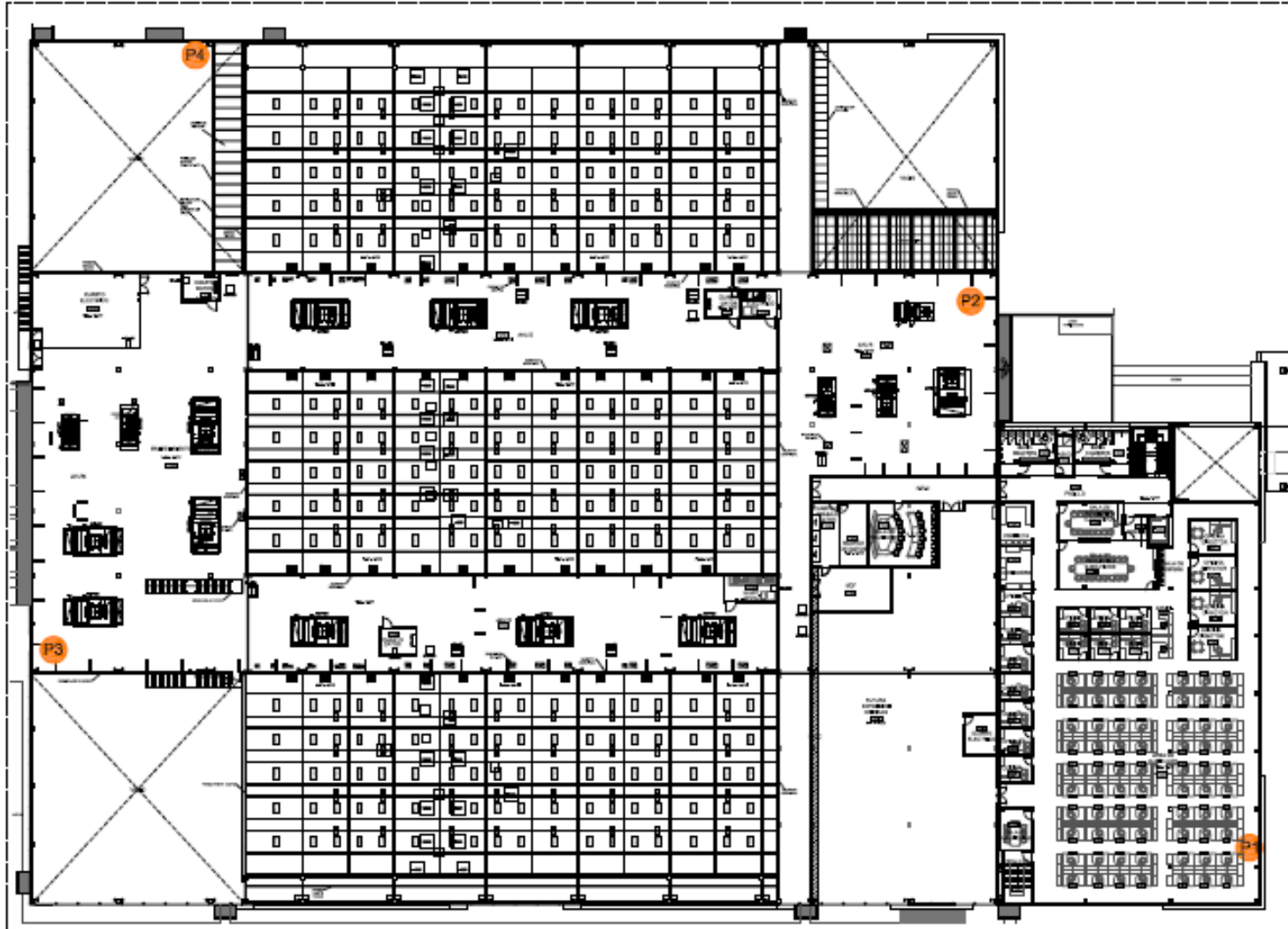


Figura 5.3 Diagrama de la planta AVCR para pruebas de rango.

En el plano mostrado en la figura 5.3 de la planta de Abbott Vascular Costa Rica, muestra la localización de los nodos en las pruebas de rango. Este representa la planta alta de la industria, donde se encuentra el área de mezzanine y las oficinas del departamento de facilidades. Cada uno de los puntos resaltados en naranja y denotados por la letra P seguida del número de posición, representa la posición del nodo. En la tabla 5.2 se resumen los resultados obtenidos en la prueba de rango.

**Tabla 5.2** Resultados de pruebas de rango.

<b>Nodo PC</b>	<b>Nodo periférico</b>	<b>Porcentaje de muestras recibidas</b>	<b>RSSI (dB)</b>	<b>Distancia (m)</b>
Oficinas (P1)	Entrada mezzanine (P2)	100 %	-45 (verde)	100
Entrada mezzanine (P2)	Final mezzanine (P3)	100 %	-46 (verde)	154
Final de mezzanine (P3)	Cuarto de máquinas (P4)	100 %	-47 (verde)	150

En la tabla 5.2 se presentan tres pruebas de alcance realizadas en las instalaciones de la planta con diferentes localizaciones para el nodo del computador y el nodo periférico, de la cual se observa que para todos los casos el porcentaje de muestras recibidas con respecto a las muestras fallidas es del 100%, para un total de 1000 muestras de 1 byte enviadas.

Además, conforme se incrementa la distancia entre los nodos disminuye el nivel de intensidad de la señal recibida, esto se comprueba mediante el indicador RSSI, que para este caso en específico es inversamente proporcional al incremento de la distancia, excepto para la prueba del cuarto de máquinas, ya que como se observa en el diagrama de la figura 5.3, éste se encuentra en la planta de abajo. Por lo tanto, dicha relación se ve afectada por el ambiente de medición y dependiendo de las condiciones en las cuales se lleve a cabo la prueba puede o no cumplirse, debido a que factores externos como la interferencia por blindaje u

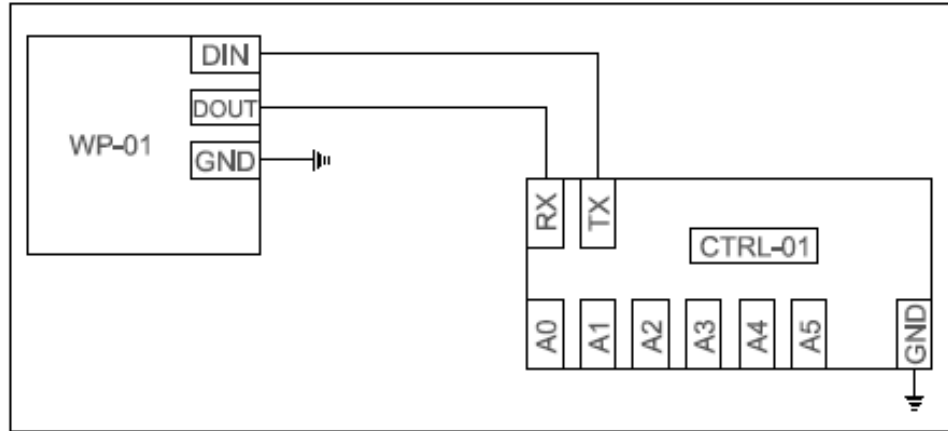
otros dispositivos transmitiendo, pueden afectar directamente el experimento. Para evidenciar lo anterior, lo podemos observar en la prueba hasta el cuarto de máquinas, ya que la presencia de estructuras rígidas y el ambiente ruidoso, traen como efecto la disminución de la intensidad de la señal recibida. Se comprueba que el enlace puede tener alcance en todo el mezzanine, por lo tanto, se puede tener el sistema tomando muestras en cualquiera de las máquinas, mientras la estación terminal puede estar en un punto específico del mismo, dedicado exclusivamente a esta tarea.

Para la prueba de conexión del enlace se realizó configurando los módulos Xbee Pro XSC en modo punto a punto, mediante los comandos AT mostrados en la tabla 4.3 en la sección de implementación de software, y siguiendo el algoritmo mostrado en la figura 4.13. La idea es probar el enlace inalámbrico con las rutinas que va a operar normalmente el sistema y detectar cualquier tipo de falla o deficiencia.

A diferencia de la prueba anterior, la de conexión incluye al arduino uno conectado al nodo periférico, para enviarle muestras aleatorias a través del puerto serial de los valores globales de vibración generados internamente en el microcontrolador, y que los mismos sean transmitidos inalámbricamente hasta el nodo conectado al computador. En cuanto al jumper P8 utilizado anteriormente, se debe quitar dicha conexión para evitar la retransmisión del mensaje y así poder visualizar las muestras transmitidas al PC por el puerto serial.

La conexión entre el arduino uno y el nodo periférico incluye la comunicación serial entre los dispositivos y el común a tierra para protección, se muestra en la figura 5.4, CTRL-01 representa al arduino UNO y WP-01 corresponde al Xbee Pro XSC. Por otro lado, el nodo receptor se conecta al PC utilizando el cable usb.



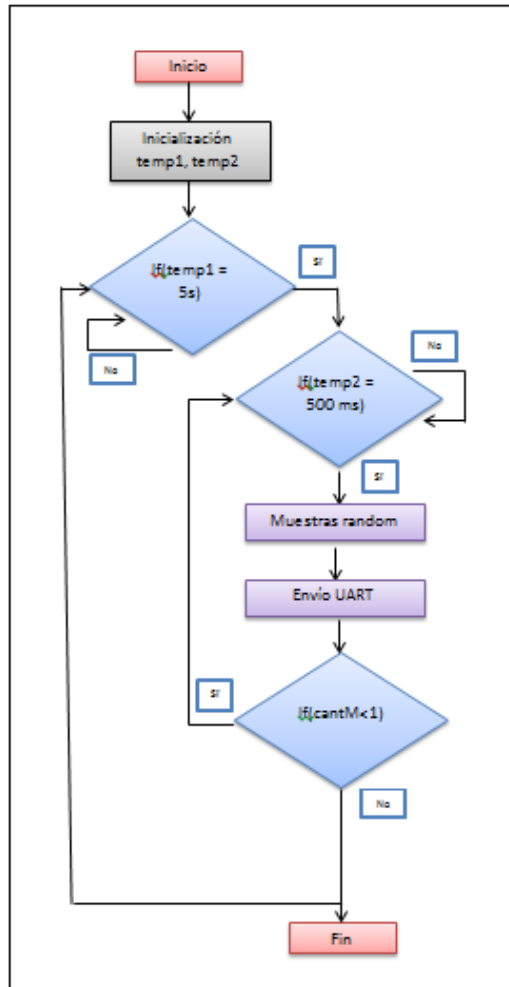


**Figura 5.4** Circuito para prueba de conexión del nodo periférico.

El Arduino Uno con el controlador ATmega328 se programó con una rutina para generar muestras aleatorias de 6 bytes cada 5 segundos, y enviar el arreglo de bytes por medio del puerto serial al dispositivo Xbee Pro periférico. En la tabla 5.3 se detalla el comportamiento de cada uno de los bytes de la trama aleatoria enviada, en la figura 5.5 se muestra el algoritmo utilizado por el Arduino Uno para la toma de muestras.

**Tabla 5.3** Secuencia de datos simulados.

Número de byte	Especificación
0	Rango de 0 a 255 con incrementos de 5
1	Rango de 255 a 0 con decrementos de 5
2	Valor constante de 50
3	Valor constante de 100
4	Valor constante de 150
5	Valor constante de 200



**Figura 5.5** Algoritmo para prueba de conexión.

El diagrama de flujo empieza con la inicialización de dos temporizadores, uno cada 5 s y el otro cada 500 ms, una vez transcurrido el lapso del primer temporizador, se calculan las 6 muestras aleatorias y se envían por el puerto UART, luego periódicamente se repite el proceso. Para la visualización de las muestras, se utilizó el hyperterminal, una aplicación para gestionar conexiones en el computador a través del puerto serial, éste permite visualizar en una ventana los datos recibidos/transmitidos desde y hacia el nodo receptor sincronizado mediante el puerto COM, asignado por el sistema operativo.

Luego de realizar la prueba de conexión de los Xbee Pro XSC, se comprueba una adecuada configuración del enlace, ya que ambos dispositivos presentan sincronía y se comportan del modo punto a punto (peer to peer), permitiendo el envío/recepción de datos en ambos sentidos mediante una conexión estable. Los datos recopilados en el hyperterminal cumplen la especificación detallada en la tabla 5.3, es decir llevan la secuencia pre configurada, sin la presencia de saltos en el incremento o decremento de los mismos.

La interfaz de usuario fue sometida a un conjunto de pruebas para verificar su funcionamiento con respecto a lo diseñado en los diagramas de flujo, esto debido a que cumple funciones de diversa índole para la operación del sistema de monitorización inalámbrico de vibraciones, a continuación se muestran detalles de los métodos de análisis empleados:

- Al inicio cuando no estaba implementada la comunicación serial, se utilizaban sliders o deslizadores, uno para cada canal, con el fin de simular las muestras de la gráfica, y al presionar un botón se indicaba la presencia de nuevos datos. Corresponde a un método manual pero eficiente para comprobar todas las propiedades del gráfico, tales como: leyenda, simbología, ajuste de valores a los ejes, trazos de la gráfica, comparación de dos o más gráficas, entre otras.
- Luego de insertar las rutinas de comunicación serial y de la base de datos, utilizando el algoritmo para el Arduino Uno mostrado en la sección de implementación de software en la figura 4.11, en el cual se habilita el convertidor analógico a digital de seis canales para tomar las muestras analógicas provenientes de los transmisores de vibración ICP 682B03, en un rango de tensión de 0 a 5 V. Es fundamental determinar la resolución de conversión del ADC para

este caso para cumplir con la exigencia planteada, empleando la ecuación 4.1.

$$Resolución = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n - 1} \quad (4.1)$$

$$Resolución_{5V} = \frac{5V - 0V}{2^{10} - 1} = 4,89 \text{ mV}$$

A partir de los resultados anteriores, se utilizaron los transmisores en la configuración de salida analógica de 0 a 5 V, para cumplir con el indicador del rango esperado de resolución en la conversión A/D superior a 3 mV, por lo tanto, se espera una menor sensibilidad a las variaciones de la tensión de salida proporcional a la magnitud RMS de los valores globales de vibración. Entre mayor sea la resolución menor es la sensibilidad del convertidor, lo cual en una aplicación como este sistema es importante pues las vibraciones se ven afectadas momentáneamente por diferentes factores que producen un comportamiento irregular, por lo tanto, mejora la exactitud de las muestras.

La implementación física de todo el sistema de monitorización presentado en el diagrama eléctrico de la figura 4.9 y el montaje de los sensores en el extractor de aire EF03-FE03, en seis diferentes puntos: horizontal interno y externo, vertical interno y externo, axial interno y externo. En la imagen de la figura 5.7 se muestra el método de montaje realizado.



**Figura 5.6** Montaje de sensores de vibración 608A11.

En dicha prueba se pretende verificar la funcionalidad del diseño propuesto tanto en hardware como en software para depurar el sistema, así las muestras transmitidas se visualizan directamente en la interfaz gráfica para agilizar la impresión de los valores globales de vibración transmitidos por cada uno de los canales. Este procedimiento permite inferir algunos aspectos:

- No existen problemas en la toma de muestras analógicas del Arduino UNO de la señal proveniente de los transmisores en cada uno de los canales del ADC.
- Es conveniente colocar un delay o retardo de 500 ms para tomar muestras de ADC, con el fin de darle tiempo al microcontrolador de que el valor en la entrada analógica llegue a un punto de estabilización.
- Dicha prueba indica un resultado satisfactorio en cuanto a las conexiones del gabinete eléctrico y la compatibilidad de los diferentes dispositivos indicados en el diseño.

- En la figura 5.7 se muestra el panel del proyecto indicado en el diagrama eléctrico y en la figura 5.8 se indica la localización del módulo Xbee Pro XSC dentro del gabinete.



**Figura 5.7** Gabinete del sistema de monitorización de vibraciones.



**Figura 5.8** Montaje de Xbee PRO XSC en panel.

En la figura 5.9 se muestra el resultado obtenido en la operación del sistema inalámbrico de monitorización de vibraciones mecánicas en un ambiente real, se montó en un motor de una manejadora de aire con una potencia de 16 kW y una velocidad de operación de 1785 RPM.

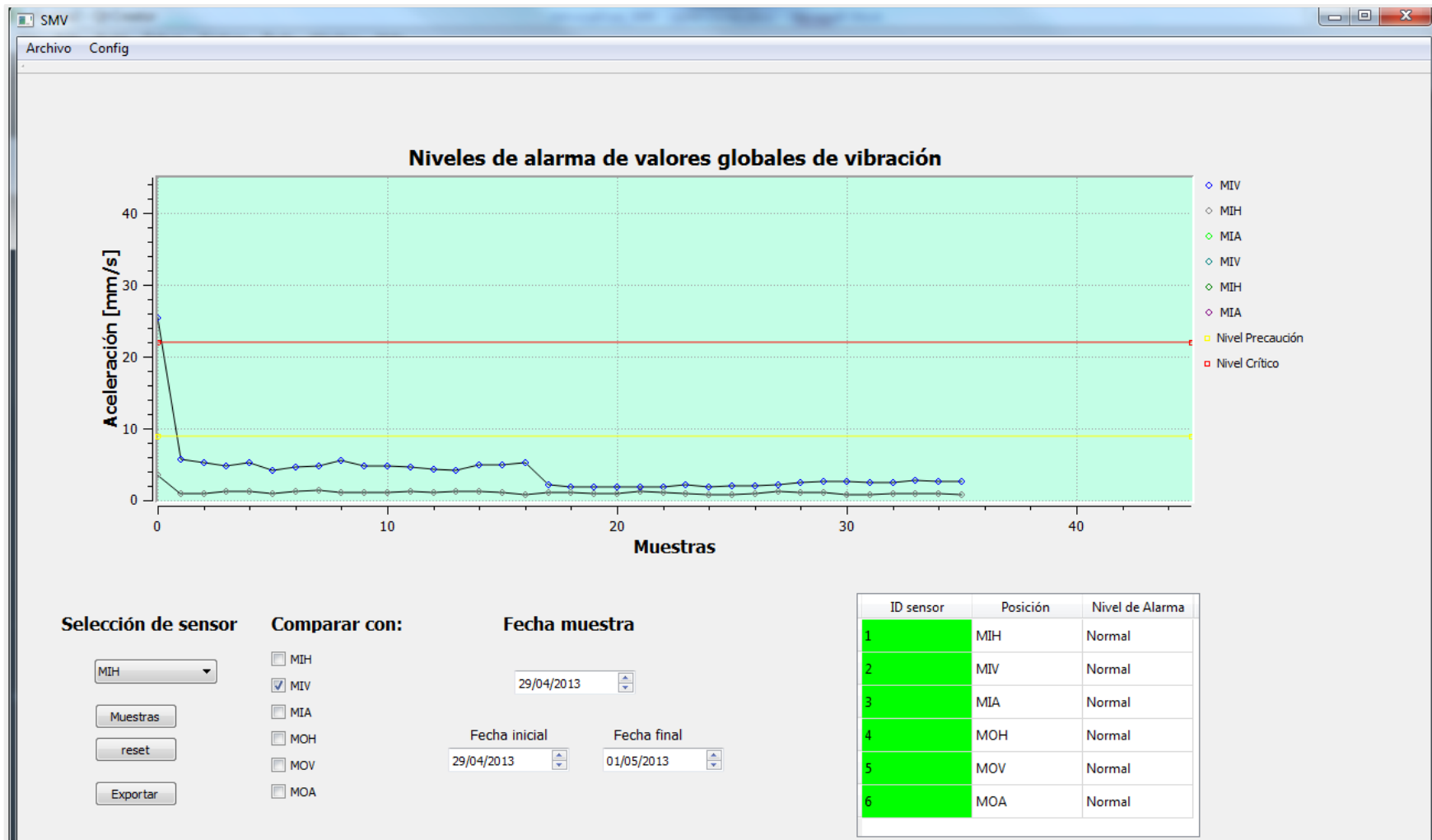


Figura 5.9 Interfaz gráfica del sistema de monitorización de vibraciones

En la figura 5.9 muestra en detalle la interfaz gráfica del sistema de monitorización de vibraciones, con todos los mandos necesarios para su operación. Luego de realizar las pruebas y verificar el funcionamiento de las diferentes rutinas es importante conocer los procedimientos de los diferentes botones, se explican a continuación:

- El botón desplegable de selección de sensor es para escoger entre los seis canales disponibles cuál es el que quiero visualizar en el área de graficación.
- Los Checkbox de la sección comparar con, son para seleccionar los canales con los cuales quiero comparar el sensor escogido en el botón desplegable.
- La entradas de fecha inicial y fecha final son para escoger entre un rango específico de muestras tomadas por el sistema, cuyo parámetro de escogencia es la fecha de toma de la muestra.
- La tabla mostrada dentro de la ventana principal es para indicar el nivel de alarma de cada uno de los sensores, con su respectivo identificador y posición. Para el nivel de alarma se indica el texto y el color correspondiente dependiendo de la gravedad de la misma: normal (verde), advertencia (amarilla) y crítico (rojo).
- La barra superior de archivo se utiliza para exportar la gráfica mostrada en pantalla y config es para ajustar los niveles de alarma de los sensores.

Con los resultados mostrados en las secciones anteriores, se han obtenido resultados satisfactorios de operación de todas las etapas de la interfaz de usuario, propuestas en el diseño de software. Utilizando la norma ISO 10816-3 para configurar las alertas de esta máquina en específico, a partir de 4,5 mm/s de magnitud del valor global de vibración se considera una alerta de advertencia y por encima de 11 mm/s una alerta crítica.



Para interpretar el funcionamiento de esta máquina, se muestran las gráficas de tendencia para los canales en la posición horizontal y vertical internos del motor, así como los niveles de alerta debidamente configurados. Las muestras para ambos canales se estabilizan por debajo de la alerta de advertencia, específicamente el MIH se estabiliza a 1,9 mm/s y el MIV a 1 mm/s. Por tal razón, en el widget del estado de cada uno de los sensores, todos los puntos de medición se encuentran en un nivel normal de vibraciones mecánicas.

# Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

## 6.1. Conclusiones

- 6.1.1. El acondicionamiento de una señal de vibración en el tiempo para determinar el valor global o overall de la energía contenida en su espectro requiere de la máxima resolución del convertidor analógico/digital debido a la irregularidad en el comportamiento de la onda temporal. Para este proyecto se cumplió la expectativa porque la resolución de tensión empleada está por debajo de 10 mV.
  
- 6.1.2. El montaje de los acelerómetros para la toma de muestras de vibración es un factor predominante en la desviación de sensibilidad a altas frecuencias en la medición de la señal de vibración en máquinas rotativas, por tanto, el uso de pads o bases de bronce y adheridas a la superficie con un adhesivo de estructura ubica dicha efecto fuera del rango de 5 Hz a 10 KHz barrido por el transmisor ICP 682B03.
  
- 6.1.3. Para la implementación de una red de comunicación inalámbrica punto a punto, es necesario utilizar pruebas de rango en ambos sentidos (loop back) para determinar el alcance de los dispositivos y el grado de severidad de los diferentes factores de interferencia. Para este proyectó se logró una comunicación satisfactoria dentro del alcance planteado en un inicio, en el área de mezzanine de la empresa.

## **6.2. Recomendaciones**

- 6.2.1.** Para futuros trabajos en esta área del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones, se recomienda incluir un dispositivo de medición de velocidad en el eje de las máquinas rotativas para garantizar muestras dentro del rango aproximado de su velocidad de operación.
  
- 6.2.2.** Es conveniente en un panel eléctrico de control dejar distribuidores de conexión (bornes) previstos para la implementación de mejoras o expansión del proyecto.
  
- 6.2.3.** Para ampliar el alcance del sistema de monitorización de vibraciones es factible implementarle a la interfaz una sección para ingresar información de la máquina, como altura del eje y potencia, y que automáticamente ajuste los niveles de alarma, esto facilita la operación del usuario.

## Bibliografía

- [1] SINAIS, «Ingeniería de mantenimiento,» 2010. [En línea]. Available: <http://sinais.es/Mantenimiento%20Predictivo.pdf>. [Último acceso: 15 Marzo 2013].
- [2] Emerson, «Emerson Process,» 2012. [En línea]. Available: [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductDataSheets/2130\\_ds\\_MachineryHealthAna.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductDataSheets/2130_ds_MachineryHealthAna.pdf). [Último acceso: 15 Abril 2013].
- [3] Emerson, «Emerson Process,» 2011. [En línea]. Available: [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductDataSheets/amsmm\\_ds\\_MachHealthMan.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductDataSheets/amsmm_ds_MachHealthMan.pdf). [Último acceso: 16 Abril 2013].
- [4] Creative Commons, «News Medical,» marzo 2013. [En línea]. Available: [http://www.news-medical.net/health/Catheter-What-is-Catheter-\(Spanish\).aspx](http://www.news-medical.net/health/Catheter-What-is-Catheter-(Spanish).aspx). [Último acceso: 16 abril 2013].
- [5] A. Céspedes, Principios de administración de mantenimiento, Costa Rica: EUNED, 1981, p. 12.
- [6] D. Suárez, Guía teórico-práctico mantenimiento mecánico, Puerto La Cruz: Universidad de Oriente, 2001.
- [7] D. Mba, «Condition **monitoring** and diagnostics of machines,» p. 2.
- [8] Electric Power Research Institute (EPRI), «Predictive Maintenance Self-Assessment,» 2000, pp. 1-1.
- [9] G. Sulivian y R. Pugh, «Operations ans Maintenance- A guide to Archieving Operaational Efficiency Release,» 2004, p. 5.3.
- [10] K. Mobley, «An introduction to Predictive maintenance,» 2002.
- [11] Allied Reliability Inc, «Pdm Secrets Revealed,» 206, pp. 7-8.
- [12] A. G., M. Fernández y J. Solares, «Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas,» Madrid, Marcombo, 2005.
- [13] F. González, «Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial avanzado,» España, FC, 2005.
- [14] G. Mosquera, G. Armas y M. Piedra, «Las vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo,» Caracas, ISID.
- [15] B. Kruger, «Machinery Inspection and Evaluation: Vibration Diagnostic Guide,» 2006, p. 7.
- [16] Sianis, «Norma ISO 2372-|974,» 2005. [En línea]. Available: <http://sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/iso2372.html>. [Último acceso: 18 abril 2013].
- [17] D. Pernia, *Introducción a la medición de vibración*, Venezuela, 2004.
- [18] J. Royo, M. Lambán y D. Pérez, Simulador de Vibraciones para la Realización de Mantenimiento Predictivo, España, 2003.

- [19] C. García, Pincipios, Causas y Diagnóstico de la Vibración en Maquinaria Rotativa, Puerto la Cruz, 1997.
- [20] Digi international, «XBee-PRO® 900HP/XBee-PRO® XSC RF Modules,» 2012. [En línea]. Available: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002173\\_B.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002173_B.pdf).
- [21] C. Peña, «Somos libres,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.somoslibres.org/modules.php?name=News&file=article&sid=183>. [Último acceso: 18 marzo 2013].

# Apéndices

## Apéndice A1 Progreso de ensamblaje del gabinete eléctrico.



Figura A1.1 Montaje de dispositivos.

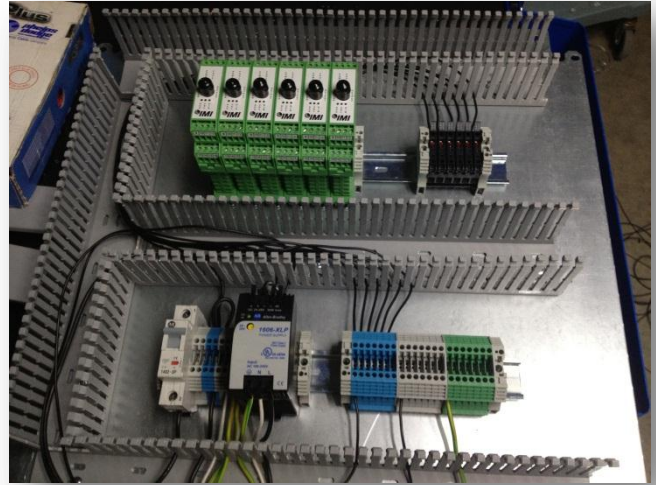


Figura A1.2 Cableado parcial.

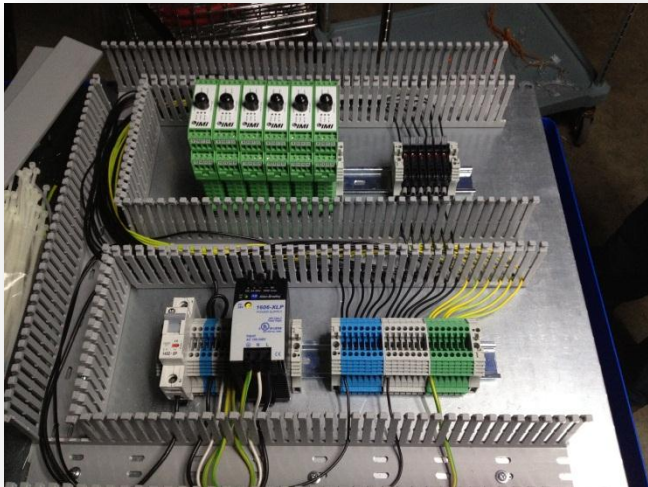
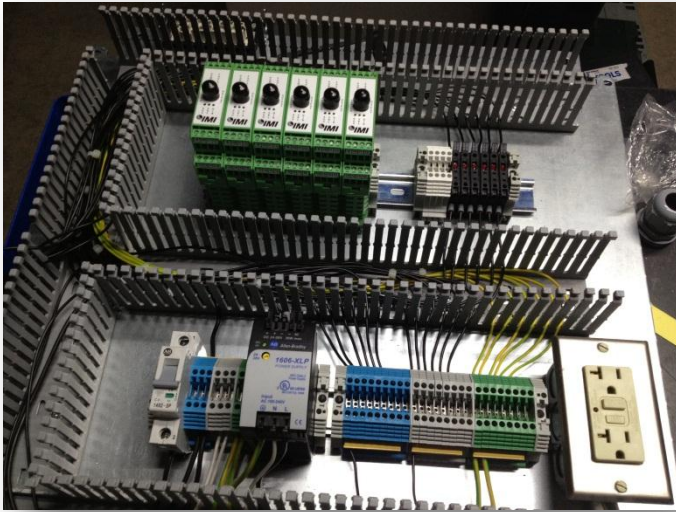


Figura A1.3 Cableado de alimentación.



Figura A1.2 Montaje de cobertores.



**Figura A1.5** Montaje de outlet.



**Figura A1.6** Montaje de tarjetas.



**Figura A1.7** Montaje de tarjetas electrónicas.



**Figura A1.2** Montaje en gabinete.

# Anexos

## Anexo B2 Rutinas de programación

### Rutinas del arduino uno:

- `#include "Timer.h"`GNU: instrucción para incluir la librería timer. Corresponde a una licencia pública de carácter general.  
`temp1.every(60000, verificacion)` , `temp2.every(1000, lecturas)` : inicialización de los temporizadores con el parámetro del tiempo en milisegundos y la función asociada.
- `Lectura1 = analogRead(A0)` : Función encargada de la lectura de cada canal analógico, A0 corresponde a la entrada analógica. Se repite igualmente para los canales de A1 a A5, sólo almacenando en diferentes variables.
- `CH1 = map(Lectura1, 0, 1023, 0, 255)` : instrucción para mapear la lectura analógica de un valor digital de 10 bits a un valor digital de 8 bits. Se repite para cada una de las lecturas almacenadas en variables.
- `Serial.write(info,6)` : instrucción para el envío, mediante el puerto serial del Arduino Uno, de una trama de 6 bytes correspondiente a cada uno de los 6 canales analógicos muestreados

### Rutinas Interfaz gráfica:

- **Conectar.h:**

```
static bool createConnection()
{
    //Obtenemos el directorio en el que se almacenan los datos de
    las aplicaciones
    QString dataDir =
    QDesktopServices::storageLocation(QDesktopServices::DataLocation
    );

    //Funciones para convertir de QString a char
    QByteArray byteArray = dataDir2.toUtf8();
    const char* ok = byteArray.constData();
}
```



```

printf(ok);

QDir dir(dataDir);
//Creamos la ruta al fichero de la base de datos
QString dbName = dir.filePath("Prueba.sqlite");
//Instanciamos QSqlDatabase y utilizamos dbName como ruta
//al archivo de la base de datos
QSqlDatabase db = QSqlDatabase::addDatabase("QSQLITE");
db.setDatabaseName(dbName);
//Abre la base de datos y muestra un aviso en caso de error

if (!db.open()) {
    QMessageBox::critical(0, qApp->tr("Cannot open
database"),
    qApp->tr("Unable to establish a database
connection.\n"
           "This example needs SQLite support. Please
read "
           "the Qt SQL driver documentation for
information how "
           "to build it.\n\n"
           "Click Cancel to exit."),
    QMessageBox::Cancel);
    return false;
}
    QSqlQuery query;
    query.exec("create table contacts (id int primary key, "
              "ch1 double,"
              "ch2 double,"
              "ch3 double,"
              "ch4 double,"
              "ch5 double,"
              "ch6 double,"
              "fecha QDate)");

    return true;
}
#endif // DBCONNECTION_H

```

- **Incrementalplot.cpp:**

```

// Nombre de gráfica
d_curve = new QwtPlotCurve("MIV");
d_curve->setRenderHint( QwtPlotItem::RenderAntialiased );
// Tipo de gráfica
d_curve->setStyle(QwtPlotCurve::NoCurve);
// Atributo a mostrar en la leyenda
d_curve->setLegendAttribute( QwtPlotCurve::LegendShowSymbol );
// Datos de la curva
d_curve->setData( new CurveData() );
// Símbolo de la gráfica
d_curve->setSymbol( new QwtSymbol( QwtSymbol::Diamond,
    Qt::NoBrush, QPen( Qt::blue), QSize( 4, 4 ) ) );
// Incluir puntos dentro del área de graficación
d_curve->attach(this);

```

## Funciones de Incrementalplot.cpp:

### ➤ Appendpoint() :

```
// Puntero a los datos de la gráfica
CurveData *data = static_cast<CurveData *>( d_curve->data() );
// Agrega punto a la gráfica
data->append(point);
// Método para ajustar la escala de acuerdo al nuevo punto
const bool doClip = !canvas()->testAttribute(
Qt::WA_PaintOnScreen );
if ( doClip )
{
    const QwtScaleMap xMap = canvasMap( d_curve->xAxis() );
    const QwtScaleMap yMap = canvasMap( d_curve->yAxis() );
    QRegion clipRegion;
    const QSize symbolSize = d_curve->symbol()->size();
    QRect r( 0, 0, symbolSize.width() + 2, symbolSize.height()
+ 2 );
    const QPointF center =
        QwtScaleMap::transform( xMap, yMap, point );
    r.moveCenter( center.toPoint() );
    clipRegion += r;
    d_directPainter->setClipRegion( clipRegion );
}
```

### ➤ ClearPoints() :

```
// Puntero a los datos de la gráfica
CurveData *data = static_cast<CurveData *>( d_curve->data() );
// Borra puntos de la gráfica
data->clear();
```

### • Randomplot.cpp:

```
// Crea instancia del tipo QSqlTableModel
model = new QSqlTableModel(this);
//Selecciona la tabla sobre la cual opera el modelo
model->setTable("contacts");
// Todos los cambios al modelo se aplican inmediatamente
// a la base de datos
model->setEditStrategy(QSqlTableModel::OnFieldChange);
// Cambios en el Header de la tabla (solo visual, no en DB)
model->setHeaderData(0, Qt::Horizontal, tr("ID"));
model->setHeaderData(1, Qt::Horizontal, tr("CH1"));
model->setHeaderData(2, Qt::Horizontal, tr("CH2"));
model->setHeaderData(3, Qt::Horizontal, tr("CH3"));
model->setHeaderData(4, Qt::Horizontal, tr("CH4"));
```

```

model->setHeaderData(5, Qt::Horizontal, tr("CH5"));
model->setHeaderData(6, Qt::Horizontal, tr("CH6"));
model->setHeaderData(4, Qt::Horizontal, tr("Fecha"));
    model->select();

```

Configuración de otras propiedades del gráfico como: el grid de la gráfica, el color de fondo, y los rangos de los valores del x y el eje y.

```

// Estilo de la trama
setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
// Ancho de línea
setLineWidth(0);
// Ancho de línea del área de gráfico
setCanvasLineWidth(2);
// Alinear área de gráfico a las escalas
plotLayout()->setAlignCanvasToScales(true);
// Agregar el grid
QwtPlotGrid *grid = new QwtPlotGrid;
grid->setMajPen(QPen(Qt::gray, 0, Qt::DotLine));
grid->attach(this);
setCanvasBackground(QColor(195, 254, 230));
// Rango de eje x
setAxisScale(xBottom, 0, c_rangeMax);
//rango de eje y
setAxisScale(yLeft, 0, c_rangeMax);

// Agregar propiedades
replot();

```

### Funciones de Randomplot.cpp:

#### ➤ Graficar():

```

// ciclo para cada seleccionar cada grupo de puntos de una
determinada gráfica
for ( int i = 0; i <= model->rowCount(); i++ ){
    // Lectura de fila i de la base de datos
    QSqlRecord record = model->record(i);
    // Lectura de fecha de muestra actual
    QDate fecha = record.value("fecha").toDate();
    // Lectura de valor de la muestra
    double ch1_val = record.value("ch1").toDouble();
    // Lectura de ID de la muestra
    int ch1_ejex = record.value("id").toInt();
    // Condicional para verificar si la muestra está en el rango
seleccionado
    if(fecha >= (FechaInicio) & fecha <=(FechaFinal)){
        // Agrega punto a la figura
        appendPoint(ch1_ejex, ch1_val, curva);
    }
}

```

```
}
```

➤ Addsample():

```
void RandomPlot:: addSample(double ch1,double ch2,double ch3,double
ch4,double ch5,double ch6,int id,QDate fecha){
    // Crea instancia de la clase QSqlRecord
    QSqlRecord record;
    int id2 = generateSampleId();
    // Indican el tipo de datos de cada espacio en las columnas de la DB
    QSqlField f1("id", QVariant::Int);
    QSqlField f2("ch1", QVariant::Double);
    QSqlField f3("ch2", QVariant::Double);
    QSqlField f4("ch3", QVariant::Double);
    QSqlField f5("ch4", QVariant::Double);
    QSqlField f6("ch5", QVariant::Double);
    QSqlField f7("ch6", QVariant::Double);
    QSqlField f8("fecha", QVariant::Date);
    // Asigna valores de los parámetros a las variables temporales de f1
a f8
    f1.setValue(QVariant(id));
    f2.setValue(QVariant(ch1));
    f3.setValue(QVariant(ch2));
    f4.setValue(QVariant(ch3));
    f5.setValue(QVariant(ch4));
    f6.setValue(QVariant(ch5));
    f7.setValue(QVariant(ch6));
    f8.setValue(QVariant(fecha));
    // Agrega los nuevos datos a la DB
    record.append(f1);
    record.append(f2);
    record.append(f3);
    record.append(f4);
    record.append(f5);
    record.append(f6);
    record.append(f7);
    record.append(f8);
    // Inserta nueva fila en el modelo
    model->insertRecord(-1,record);
    // Rellena el modelo con los datos de la tabla
    model->select();
}
```

➤ Last\_ch1():

```
double RandomPlot::last_ch1(){
    // última fila del modelo de la base de datos
    int j = model->rowCount()-1;
    //variable temporal para almacenar última fila
    QSqlRecord record2 = model->record(j);
    // Almacena valor en magnitud del canal
    double valor = record2.value("ch1").toDouble();
    // retorna valor
}
```

```
    return valor;
}
```

- **MainWindow.cpp:**

```
// Temporizador para actualizar interfaz gráfica
reloj_ = new QTimer(this);
// Conexión de temporizador con función update()
connect(reloj_, SIGNAL(timeout()), this, SLOT(update()));
// Frecuencia de muestreo de 20 ms
reloj_->start(20); // 500
// Objeto de la gráfica
d_plot = new RandomPlot(this);
const int margin = 4;
d_plot->setContentsMargins( margin, margin, margin, margin);
// Agrega área de gráfico a ventana principal
ui->horizontalLayout ->addWidget(d_plot,20);
// Objeto del tipo de la ventana auxiliar
window= new Ventana2(this);
// Conexión para utilizar ventana auxiliar desde ventana principal
QObject::connect(window,SIGNAL(emitir()),this,SLOT(recibir()));
// temporizador del serial
timer_serial = new QTimer(this);
connect(timer_serial, SIGNAL(timeout()), this,
SLOT(update_serial()));
timer_serial->start(400);
// Instancia de puerto serial
Tserial = new TSerialDevice();

// puerto seleccionado
Tserial->setDeviceName("COM26");
```

## Funciones de MainWindow.cpp:

### ➤ Update():

```
void MainWindow::update() {
// condición se activa si hay disponibles nuevos datos en el puerto
serial
    if (CambioBoton_) {
        // Escalamiento de los canales
        double ch1_mod = (ch1 * 127.0)/1275.0;
        double ch2_mod= (ch2 * 127.0)/1275.0;
        double ch3_mod= (ch3 * 127.0)/1275.0;
        double ch4_mod = (ch4 * 127.0)/1275.0;
        double ch5_mod= (ch5 * 127.0)/1275.0;
        double ch6_mod= (ch6 * 127.0)/1275.0;
        // Agrega muestras a la gráfica

        d_plot->
>addSample (static_cast<double>(ch1_mod), static_cast<double>(ch2_mod), stat
ic_cast<double>(ch3_mod),

static_cast<double>(ch4_mod), static_cast<double>(ch5_mod), static_cast<dou
ble>(ch6_mod),

                0, ui->dateEdit_3->date());
        // Arreglo temporal de valores leídos
        double arreglo[] =
{ch1_mod, ch2_mod, ch3_mod, ch4_mod, ch5_mod, ch6_mod};
        // Actualización de alerta
        for(int i=0; i<6; i++){
            actualizar_alerta(arreglo[i], i);
        }
    }

// Verifica si hay cambio en el serial o en el rango de fechas
    if (CambioBoton_ | CambioFecha_){

        // Verifica gráfica seleccionada
        if(ui->comboBox->currentIndex() == 1){
            // Borra gráfica
            d_plot->clear(0);
            // Vuelve a graficar canal
            d_plot->graficar(0, ui->dateEdit->date(), ui->dateEdit_2->
date());
        }
// Verifica gráfica a comparar seleccionada
        if (ui->checkBox->isChecked()){
            // borra la gráfica
            d_plot->clear(0);
            // Vuelve a graficar
            d_plot->graficar(0, ui->dateEdit->date(), ui->dateEdit_2->
date());
        }
    }
}
```

```
    // Desactiva evento de cambio de fecha
    CambioFecha_ = false;
}
```

```
CambioBoton_ = false;
```

```
}
```

➤ Update\_serial():

```
void MainWindow::update_serial(){
    //Array para almacenar bytes guardados
    QByteArray ba;
    //Condicional para esperar por la lectura de un caracter
    if (Tserial->waitForReadyRead(380) & lectura) { //465
        ba.clear();
        // Mensaje Cantidad de bytes leídos
        ba=Tserial->read(6);

        // Arreglo temporal para almacenar bytes leídos
        ch1 = ba[0];
        ch2 = ba[1];
        ch3 = ba[2];
        ch4 = ba[3];
        ch5 = ba[4];
        ch6 = ba[5];
        // Activa la alerta de datos listos
        CambioBoton_ = true;
    }
}
```

➤ On\_comboBox\_activated:

```
// Deshabilita del menú de comparación, el canal seleccionado en el boton
desplegable
    ui->checkBox->setChecked(false);
    ui->checkBox->setCheckable(false);
    // Grafica el canal seleccionado
    d_plot->graficar(0,ui->dateEdit->date(),ui->dateEdit_2->date());
    // Habilita la selección en menú de comparación del resto de
canales
    ui->checkBox_2->setCheckable(true);
    ui->checkBox_3->setCheckable(true);
    ui->checkBox_4->setCheckable(true);
    ui->checkBox_5->setCheckable(true);
    ui->checkBox_6->setCheckable(true);

    // Si el checkbox de un determinado canal en el menú de
comparación de desactiva
    // borra la gráfica de la figura actual
    if (ui->checkBox_2->checkState() == false){
        d_plot->clear(1);
    }
    if (ui->checkBox_3->checkState() == false){
        d_plot->clear(2);
    }
    if (ui->checkBox_4->checkState() == false){
        d_plot->clear(3);
    }
    if (ui->checkBox_5->checkState() == false){
        d_plot->clear(4);
    }
    if (ui->checkBox_6->checkState() == false){
        d_plot->clear(5);
    }
}
```

➤ on\_checkBox\_toggled():

```
void MainWindow::on_checkBox_toggled(bool checked)
{
    // Condición de check
    if (checked){
        // Grafica el canal especificado
        d_plot->graficar(0,ui->dateEdit->date(),ui->dateEdit_2->date());
    }
    // Condición desactivado
    else{d_plot->clear(0);};
}
```



➤ On\_actionL\_mites\_triggered:

```
void MainWindow::on_actionL_mites_triggered()
{
    // minimiza ventana principal
    this->hide();
    // Muestra ventana secundaria
    window->show();
}
```

➤ recibir():

```
// Funcion para ejecutar luego de reestablecer valores limite
void MainWindow::recibir() {
    // Muestra ventana principal
    this->show();
    // Minimiza ventana secundaria
    window->hide();
    // almacena valores de limite crítico y crítico
    warn = window->limit_warn();
    crit = window->limit_crit();
    // Borra niveles previos
    d_plot->clear_level(0);
    d_plot->clear_level(1);
    //grafica nuevos valores de alarma
    d_plot->valores_limites(warn,crit);
    // Actualiza el gráfico
    d_plot->replot();
}
```

➤ actualizar\_alerta():

```
// Condicional para valores superior al nivel crítico
if (nivel_medicion >= crit){
    // Actualización de cada sensor
    if (sensor == 0){
        // Establece el texto correspondiente al nivel de alarma
        ui->tableWidget->item(0,2)->setText("Crítico");
        // Ajusta el color del nivel de alarma
        ui->tableWidget->item(0,0)->setBackgroundColor(Qt::red);
    }
}
```

Funciones de Ventana2.cpp:

➤ limit\_warn():

```
double Ventana2::limit_warn(){
    return ui->doubleSpinBox->value();
}
```

➤ on\_pushButton\_clicked():

```
void Ventana2::on_pushButton_clicked()
{
    // Emite señal de listo
    emit(emitir());
}
```

➤ on\_horizontalSlider\_valueChanged():

```
void Ventana2::on_horizontalSlider_valueChanged(int value)
{
    ui->doubleSpinBox->setValue(double(value));
}
```

## Anexo B2 Lista de comandos AT de dispositivos Xbee Pro XSC

AT Command	Binary Command	AT Command Name	Range	Command Category	# Bytes Returned	Factory Default
*AM	0x3A (58d)	Auto-set MY	-	Networking & Security	-	-
AT	0x05 (5d)	Guard Time After	0x02 – 0xFFFF [x 100 msec]	Command Mode Options	2	0x0A (10d)
BD	0x15 (21d)	Interface Data Rate	Standard baud rates: 0 – 6 Non-standard baud rates: 0x7D – 0xFFFF	Serial Interfacing	2	0x03 9600bps
BT	0x04 (4d)	Guard Time Before	2 – 0xFFFF [x 100 msec]	Command Mode Options	2	0x0A (10d)
CC	0x13 (19d)	Command Sequence Character	0x20 – 0x7F	Command Mode Options	1	0x2B (*-)
CD	0x28 (40d)	DO3 Configuration	0 - 4	Serial Interfacing	1	0
CN	0x09 (9d)	Exit AT Command Mode	-	Command Mode Options	-	-
CS	0x1F (31d)	DO2 Configuration	0 – 4	Serial Interfacing	1	0
CT	0x06 (6d)	Command Mode Timeout	0x02 – 0xFFFF [x 100 msec]	Command Mode Options	2	0xC8 (200d)
DT	0x00 (0d)	Destination Address	0 – 0xFFFF	Networking	2	0
E0	0x0A (10d)	Echo Off	-	Command Mode Options	-	-
E1	0x0B (11d)	Echo On	-	Command Mode Options	-	-
ER	0x0F (15d)	Receive Error Count	0 – 0xFFFF	Diagnostics	2	0
FH	0x0D (13d)	Force Wake-up Initializer	-	Sleep (Low Power)	-	-
FL	0x07 (7d)	Software Flow Control	0 – 1	Serial Interfacing	1	0
FR	N/A	Forces the module to Reset		(Special)		
FT	0x24 (36d)	Flow Control Threshold	0 – (DI buffer – 0x11) [bytes]	Serial Interfacing	2	varies
GD	0x10 (16d)	Receive Good Count	0 – 0xFFFF	Diagnostics	2	0
HP	0x11 (17d)	Hopping Channel	0 – 6	Networking	1	0
HT	0x03 (3d)	Time before Wake-up Initializer	0 – 0xFFFF [x 100 msec]	Sleep (Low Power)	2	0xFFFF
ID	0x27 (39d)	Module VID	User set table: 0x10 - 0x7FFF Read-only: 0x8000 – 0xFFFF	Networking	2	-
LH	0x0C (12d)	Wake-up Initializer Timer	0 – 0xFF [x 100 msec]	Sleep (Low Power)	1	1
MD	0x32 (50d)	RF Mode	0 – 4	Networking & Security	1	0
MK	0x12 (18d)	Address Mask	0 – 0xFFFF	Networking	2	0xFFFF
*MY	0x2A (42d)	Source Address	0 – 0xFFFF	Networking & Security	2	0xFFFF
NB	0x23 (35d)	Parity	0 – 5	Serial Interfacing	1	0
PC	0x1E (30d)	Power-up Mode	0 – 1	Command Mode Options	1	0
*PK	0x29 (41d)	RF Packet Size	0 - 0x100 [bytes]	Serial Interfacing	2	0x40 (64d)
*PL	0x3c (60d)	RF Power Level	0-4	(Special)	1	4
PW	0x1D (29d)	Pin Wake-up	0 – 1	Sleep (Low Power)	1	0
*RB	0x20 (32d)	Packetization Threshold	0 - 0x100 [bytes]	Serial Interfacing	2	0x01
RE	0x0E (14d)	Restore Defaults	-	(Special)	-	-
RN	0x19 (25d)	Delay Slots	0 – 0xFF [slots]	Networking	1	0
RO	0x21 (33d)	Packetization Timeout	0 – 0xFFFF [x 200 µsec]	Serial Interfacing	2	0
RP	0x22 (34d)	RSSI PWM Timer	0 - 0x7F [x 100 msec]	Diagnostics	1	0
RR	0x18 (24d)	Retries	0 – 0xFF	Networking	1	0
RS	0x1C (28d)	RSSI	0x06 – 0x36 [read-only]	Diagnostics	1	-
RT	0x16 (22d)	DI2 Configuration	0 - 2	Serial Interfacing	1	0
*RZ	0x2C (44d)	DI Buffer Size	[read-only]	Diagnostics	-	-
SB	0x36 (54d)	Slop Bits	0 - 1	Serial Interfacing	1	0
SH	0x25 (37d)	Serial Number High	0 – 0xFFFF [read-only]	Diagnostics	2	-
SL	0x26 (38d)	Serial Number Low	0 – 0xFFFF [read-only]	Diagnostics	2	-
SM	0x01 (1d)	Sleep Mode	0, 1, 3 - 8	Sleep (Low Power)	1	0
ST	0x02 (2d)	Time before Sleep	0x10 – 0xFFFF [x 100 msec]	Sleep (Low Power)	2	0x64 (100d)
SY	0x17 (23d)	Time before Initialization	0 – 0xFF [x 100 msec]	Networking	1	0 (disabled)
TR	0x1B (27d)	Transmit Error Count	0 – 0xFFFF	Diagnostics	2	0

[20]