



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO  
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
MONITOREO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN EL SISTEMA SCADA  
DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA  
CENTRAL ILLUCHI II DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI  
ELEPCO S.A.**

**AUTORES:**

**MAIGUA LÓPEZ, CARLOS ANDRÉS  
RODRÍGUEZ VILLARROEL, CRISTIAN OMAR**

**DIRECTOR: ING. FREIRE LLERENA, WASHINGTON RODRIGO**

**LATACUNGA**

**2018**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN EL SISTEMA SCADA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA CENTRAL ILLUCHI II DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A.”*** fue realizado por los señores ***Maigua López, Carlos Andrés y Rodríguez Villarroel, Cristian Omar*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 25 de junio del 2018

---

**Ing. Washington Rodrigo Freire Llerena**

C.C.: 1801910884



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, ***Maigua López, Carlos Andrés y Rodríguez Villarroel, Cristian Omar***, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación ***“Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en el sistema SCADA de los grupos de generación hidroeléctrica en la central Illuchi II de la empresa eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A.”*** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

**Latacunga, 25 de junio del 2018**

---

**Carlos Andrés Maigua López**

C.C.: 1004202469

---

**Cristian Omar Rodríguez Villarroel**

C.C.: 0503317430



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

### AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Maigua López, Carlos Andrés y Rodríguez Villarroel, Cristian Omar** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN EL SISTEMA SCADA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA CENTRAL ILLUCHI II DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A.”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 25 de junio del 2018

---

**Carlos Andrés Maigua López**

C.C.: 1004202469

---

**Cristian Omar Rodríguez Villarroel**

C.C.: 0503317430



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**DEDICATORIA**

A mis padres Luís Maigua y Ximena López, quienes han sido mi principal inspiración y orgullo, ya que siempre fueron el primer aliento y consejo de perseverancia a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis hermanas Paola y Wendy, por estar a mi lado en los buenos y malos momentos, y convertirse en mi motivación de lucha todos los días; hago una mención especial a Paholyta P., que jamás dejó de confiar en mí y de una u otra forma estuvo allí para escucharme, entenderme y motivarme alcanzar mis metas.

**ANDRÉS**

A mi papá Washington Rodríguez y a mi hermano Henry Rodríguez quienes fueron un apoyo incondicional en todo momento durante toda mi vida estudiantil, estuvieron en los momentos que más los necesite para brindarme un apoyo en todas las situaciones que se me presentaron y un agradecimiento especial a mi mamá Mariana Villarroel quien estuvo conmigo espiritualmente en todo momento dándome fuerzas para no decaer y terminar la carrera.

**CRISTIAN**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por la bendición y sabiduría que me brindo a lo largo de mi carrera universitaria.

A mi familia que ha sido incondicional conmigo en todo momento, enseñándome a tomar decisiones correctas en el camino de la vida, y por siempre inculcarme valores para ser un hombre de bien.

A los docentes q a lo largo de la carrera universitaria, supieron compartir sus mejores consejos y conocimientos para mi formación profesional.

**ANDRÉS**

Al culminar este trabajo de titulación debo dar gracias a Dios, por haberme ayudado a desarrollar de la mejor forma posible poniendo en práctica todos los conocimientos adquiridos en esta noble Institución durante mi vida estudiantil.

A mi familia quienes han estado apoyándome en todo momento y guiándome por el camino correcto para poder continuar con mis estudios y poder alcanzar mi meta más anhelada.

Al apoyo de los docentes quienes compartieron sus conocimientos en las aulas y laboratorios con paciencia y amabilidad.

**CRISTIAN**

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xix</b>
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación e importancia.....	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>5</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>

2.1.	Antecedentes investigativos.....	5
2.2.	Fundamentación teórica .....	5
2.2.1.	Antecedentes de la investigación.....	6
2.3.	Fundamentación conceptual.....	8
2.3.1.	Mantenimiento .....	8
a)	Tipos de mantenimiento.....	8
2.3.2.	Vibraciones mecánicas .....	10
a)	Tipos de vibraciones .....	11
b)	Medición de vibración .....	14
c)	Ventajas del análisis de vibraciones .....	23
2.3.3.	Sistemas de adquisición de datos.....	25
a)	Etapas del esquema de adquisición de datos .....	26
2.3.4.	Protocolos de comunicación .....	27
2.3.5.	Normas empleadas para la medición de la criticidad de la vibración.....	29
a)	Norma ISO 10816: Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas.....	29
b)	Norma ISO 7919: Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en ejes giratorios .....	31
2.4.	Fundamentación Legal .....	32
2.5.	Sistemas de Variables .....	33

2.6.	Hipótesis.....	34
2.7.	Cuadro de operacionalización de variables.....	34
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>36</b>	
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>36</b>	
3.1.	Modalidad de la investigación.....	36
3.1.1.	Bibliográfica.....	37
3.1.2.	De campo.....	37
3.2.	Tipos de investigación.....	37
3.2.1.	Cuantitativo.....	37
3.3.	Diseños de la investigación.....	38
3.3.1.	Método de hallazgo: Inductivo.....	38
3.3.2.	Método de contrastación: Experimental.....	38
3.4.	Niveles de investigación.....	39
3.4.1.	Exploratoria.....	39
3.4.2.	Descriptiva.....	39
3.5.	Población y muestra.....	39
3.5.1.	Población.....	39
3.5.2.	Muestra.....	40
3.6.	Técnicas y recolección de datos.....	40

3.6.1. Instrumentos .....	41
3.6.2. Validez y confiabilidad .....	41
3.7. Técnicas de análisis de datos .....	42
3.8. Técnicas de comprobación de hipótesis .....	42
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>43</b>
<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>43</b>
4.1. Análisis de los resultados .....	43
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>60</b>
<b>PROPUESTA.....</b>	<b>60</b>
5.1. Datos informativos .....	60
5.1.1. Tema de la Propuesta.....	60
5.1.2. Nombre de la empresa .....	60
5.1.3. Localización .....	60
5.2. Antecedentes de la propuesta .....	60
5.3. Justificación .....	61
5.4. Objetivos.....	62
5.5. Fundamentación propuesta .....	63
5.6. Diseño de la propuesta .....	63
5.6.1. Pasos de diseño del sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas. ....	63

5.7.	Metodología para ejecutar la propuesta .....	64
5.7.1.	Selección del acelerómetro y ADC.....	64
5.7.2.	Categorización de los grupos de generación hidroeléctrica de la central Illuchi II, según la NORMA ISO 10816.....	71
5.7.3.	Selección de los puntos para medir la vibración .....	73
a)	Determinación de los puntos de medición para máquinas horizontales pertenecientes al Grupo 1. ....	74
b)	Ubicación de los ejes medición en cojinetes de pedestal .....	76
c)	Selección y fijación del acelerómetro .....	77
5.7.4.	Criterios de selección de equipos .....	79
a)	Criterios de selección del acelerómetro .....	79
b)	Criterios de selección del ADC .....	81
c)	Criterios de selección convertidor de corriente a voltaje .....	82
d)	Criterios de selección STEP DOWN ARDUINO .....	84
e)	Criterios de selección de la fuente AC/DC .....	85
5.7.5.	DISEÑO DEL SISTEMA ACONDICIONADOR DE SEÑAL .....	86
a)	Acondicionamiento de señal .....	87
b)	Tipo de señal compatible con el PLC.....	87
c)	Niveles aceptables por el PLC .....	87
d)	Niveles aceptables por el acelerómetro .....	88

5.7.6. Cálculo de la máxima resistencia del laso.....	89
5.7.7. Calibración de los sensores PC420VR P-10 serie 61405 y serie 61404 .....	89
5.7.8. Ajuste de escala máxima de 4 a 20 mA para el eje "Y".....	89
a)    Cálculos del sensor PC420VR P-10 serie 61405 instalado en el G1.....	89
b)    Cálculos del sensor PC420VR P-10 serie 61404 instalado en el G2.....	91
5.7.9. Descripción del diagrama conexión .....	93
a)    Diagrama de conexión en el PLC para las señales análogas de voltaje .....	95
5.7.10.Programación del PLC .....	98
5.7.11.Interfaz .....	99
a)    Reconocimiento de PLC CONTROLLINO MAXI .....	99
b)    Divisor de cadena de bits para grupo 1 y grupo 2 .....	101
c)    Lectura de señal de los acelerómetros a los grupos 1 y 2.....	102
d)    Base de datos de vibración registrados .....	103
5.7.12.HMI implementado para la lectura de los parámetros de vibración.....	104
5.7.13.Pruebas y registro de vibración mecánica .....	105
a)    Grupo 1, ejes "X", "Y".....	106
b)    Grupo 2, ejes "X", "Y" .....	108
5.7.14.Generación de la base de datos.....	109
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>112</b>

**RECOMENDACIONES ..... 114**

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 116**

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Operaciones de variables.....</i>	34
<b>Tabla 2</b>	<i>Técnicas de recolección de datos. ....</i>	40
<b>Tabla 3</b>	<i>Años de operación de los generadores. ....</i>	44
<b>Tabla 4</b>	<i>Tiempo de vida útil de una central hidroeléctrica.....</i>	45
<b>Tabla 5</b>	<i>Frecuencia con las que se realiza mantenimientos. ....</i>	47
<b>Tabla 6</b>	<i>La central cuenta con un sistema de monitoreo. ....</i>	48
<b>Tabla 7</b>	<i>Se realiza un control de vibraciones.....</i>	49
<b>Tabla 8</b>	<i>Causas que generan las vibraciones.....</i>	50
<b>Tabla 9</b>	<i>Causas por las que existen fallas en los rodamientos. ....</i>	52
<b>Tabla 10</b>	<i>Métodos para determinar una falla debido a la vibración. ....</i>	54
<b>Tabla 11</b>	<i>Tipos de mantenimientos. ....</i>	56
<b>Tabla 12</b>	<i>Elementos del generador. ....</i>	57
<b>Tabla 13</b>	<i>Sensor de 4 – 20 mA PC420VR P-10. ....</i>	65
<b>Tabla 14</b>	<i>Sensor IEPE 780A. ....</i>	66
<b>Tabla 15</b>	<i>Criterios de ponderación. ....</i>	67
<b>Tabla 16</b>	<i>PLC CONTROLLINO MAXI.....</i>	68
<b>Tabla 17</b>	<i>Tarjeta de adquisición de datos NI-9234 Series C. ....</i>	69
<b>Tabla 18</b>	<i>Criterios de ponderación. ....</i>	69
<b>Tabla 19</b>	<i>Datos técnicos de los grupos de generación 1 y 2. ....</i>	71
<b>Tabla 20</b>	<i>Sensor de 4 – 20 mA PC420VR P-10. ....</i>	79
<b>Tabla 21</b>	<i>PLC CONTROLLINO MAXI.....</i>	81

<b>Tabla 22</b> <i>Convertidor de corriente a voltaje</i> .....	82
<b>Tabla 23</b> <i>STEP DOWN ARDUINO</i> .....	84
<b>Tabla 24</b> <i>Fuente AC/DC</i> .....	85
<b>Tabla 25</b> <i>Máximo valor de resistencia del lazo</i> .....	88
<b>Tabla 26</b> <i>Salida en mA</i> .....	90
<b>Tabla 27</b> <i>Salida en Voltios</i> .....	90
<b>Tabla 28</b> <i>Salida en mA</i> .....	91
<b>Tabla 29</b> <i>Salida en Voltios</i> .. .....	92
<b>Tabla 30</b> <i>Conexiones análogas del PLC</i> .....	96

**INDICE DE FIGURAS**

<i>Figura 1.</i> Esquema de un proxímetro .....	16
<i>Figura 2.</i> Sensor de velocidad.....	17
<i>Figura 3.</i> Transductor y acelerómetro piezoeléctrico .....	20
<i>Figura 4.</i> Formas de onda de frecuencia .....	21
<i>Figura 5.</i> Unidades de medición de las vibraciones .....	22
<i>Figura 6.</i> Interpretación de unidades de vibraciones .....	23
<i>Figura 7.</i> Esquema de adquisición de datos.....	25
<i>Figura 8.</i> Diagrama de una adquisición de datos.....	27
<i>Figura 9.</i> Esquema de comunicación en una planta industrial .....	28
<i>Figura 10.</i> Severidad de la vibración según la norma ISO 10816 .....	30
<i>Figura 11.</i> Severidad de la vibración según la norma ISO 7919 .....	32
<i>Figura 12.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 1. ....	44
<i>Figura 13.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 2. ....	46
<i>Figura 14.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 3. ....	47
<i>Figura 15.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 4. ....	48
<i>Figura 16.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 5. ....	50
<i>Figura 17.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 6. ....	51
<i>Figura 18.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 7. ....	53
<i>Figura 19.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 8. ....	55
<i>Figura 20.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 9. ....	56
<i>Figura 21.</i> Resultados de la encuesta, pregunta 10. ....	58

<i>Figura 22.</i> Dimensiones con respecto al eje de medición. ....	72
<i>Figura 23.</i> Orientación de los ejes en una máquina horizontal. ....	74
<i>Figura 24.</i> Máquina horizontal con cojinete de pedestal. ....	75
<i>Figura 25.</i> Ubicación del punto de medición en los ejes. ....	76
<i>Figura 26.</i> Ubicación de los ejes medición en cojinetes. ....	77
<i>Figura 27.</i> Ubicación del sensor en el eje "X". ....	78
<i>Figura 28.</i> Ubicación del sensor en el eje "Y". ....	79
<i>Figura 29.</i> Laso de conexión para el Sensor PC420VR P-10 ....	88
<i>Figura 30.</i> Ecuación de la recta del sensor PC420VR P-10 serie 61405. ....	91
<i>Figura 31.</i> Ecuación de la recta del sensor PC420VR P-10 serie 61404. ....	93
<i>Figura 32.</i> Diagrama de conexión. ....	94
<i>Figura 33.</i> Diagrama de conexión PLC, entradas analógicas. ....	97
<i>Figura 34.</i> Programación de PLC en AnalogRead Arduino. ....	98
<i>Figura 35.</i> Reconocimiento de PLC CONTROLLINO MAXI. ....	99
<i>Figura 36.</i> Auto Detected ARDUNO. ....	100
<i>Figura 37.</i> Configuración de puerto serial. ....	100
<i>Figura 38.</i> Divisor de cadena de bits. ....	101
<i>Figura 39.</i> Lectura de señal acelerómetro – grupo de generación. ....	102
<i>Figura 40.</i> Base de datos de vibración registrados. ....	103
<i>Figura 41.</i> HMI grupo 1 y 2 pestaña “Registro de Vibración”. ....	104
<i>Figura 42.</i> HMI pestaña norma ISO 10816. ....	105
<i>Figura 43.</i> Registro de vibración, eje “X” grupo 1. ....	106
<i>Figura 44.</i> Registro de vibración, eje “Y” grupo 1. ....	106

<i>Figura 45.</i> Registro de vibración, eje “X” grupo 2. ....	108
<i>Figura 46.</i> Registro de vibración, eje “Y” grupo 2. ....	108
<i>Figura 47.</i> Ruta: Bibliotecas/Documentos/LadVIEWData/test.....	110
<i>Figura 48.</i> Base de datos. ....	111

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación, abarca principios elementales sobre la de medición de vibraciones mecánicas, mediante el uso de acelerómetros con salida proporcional al nivel de vibración de velocidad general, acondicionadores de señal de voltaje y corriente hacia un módulo de adquisición de datos PLC CONTROLLINO MAXI, para su posterior análisis y contraste como se indica en la norma ISO 10816. Por medio de instrumentación virtual (VI) facilitada por el programa LabVIEW que se empleó para realización de la programación, utilización de los diagramas de bloques, procesamiento de las señales de vibración mecánica de los grupos de generación 1 y 2 pertenecientes a la Central Hidroeléctrica Illuchi II de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A. Todos los registros de medición son almacenados automáticamente en una base de datos la misma que podrá ser usada como referencia para la aplicación del mantenimiento predictivo en los grupos de generación de la central.

### PALABRAS CLAVE:

- **VIBRACIONES MECÁNICAS**
- **NORMA ISO 10816**
- **SOFTWARE LABVIEW**
- **INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL**

## **ABSTRACT**

This degree work, covers elementary principles on the measurement of mechanical vibrations, through the use of accelerometers with proportional output at the level of general speed vibration, air conditioners, voltage signal and power was a PLC CONTROLLINO MAXI data acquisition module, for further analysis and contrast as described in ISO 10816 standard. Through virtual Instrumentation (VI) provided by the LabVIEW program that was used for realization of programming, use of the block diagrams, the signal processing of vibration mechanics groups of generation 1 and 2 belong to the II hydroelectric station Illuchi of the electrical company of Cotopaxi, ELEPCO S.A. All measurement records are automatically stored in a database that may be used as reference for the application of predictive maintenance in generation of the plant groups.

### KEYWORDS:

- **MECHANICAL VIBRATIONS**
- **ISO 10816 STANDARD**
- **LABVIEW SOFTWARE**
- **VIRTUAL INSTRUMENTATION**

# CAPITULO I

## PROBLEMA

### 1.1. Planteamiento del problema

La central de generación hidroeléctrica Illuchi II tiene operando 31 años, por lo que está expuesta a sufrir posibles fallas de operación. La central carece de un sistema de monitoreo continuo de vibraciones mecánicas que permita alertar posibles fallas presentes en los generadores, proporcionando información en tiempo real y oportuno con el fin de facilitar el manejo y análisis de situaciones que alteren el normal funcionamiento de la máquina y la continuidad del proceso. (ELEPCO S.A, 2015)

### 1.2. Antecedentes

En la actualidad los procesos en cualquier empresa tienden hacia la automatización y monitoreo continuo, teniendo un control total en tiempo real y permitiendo realizarlos de una manera eficiente y eficaz. En el caso de una central de generación hidroeléctrica se automatizan los procesos de almacenamiento de agua, control de caudales, monitoreo de vibraciones en los grupos generadores, producción de energía, potencia, y provisión de información a nivel empresarial y de mercado, un ejemplo de comparación es la central de generación hidroeléctrica El Ambi con 50 años de vida, esta central pertenece a la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A., el departamento de generación de la empresa cuenta con un analizador portátil de vibraciones mecánicas marca FLUKE, dicho equipo es usado para realizar controles de vibración y

temperatura en los cojinetes (soportes) del grupo de generación, como parte del plan de mantenimiento predictivo que se da a la central en períodos de 6 meses cada uno.

La inversión a mediano y largo plazo de un sistema de monitoreo de vibraciones es fundamental ya que es capaz de anticipar posibles fallas que pueden llegar a producirse significando esto una parada de producción equivalente a un coste económico brutal para las empresas.

Por esta razón es considerado totalmente necesario y justificado la implementación del presente proyecto de investigación en la central hidroeléctrica Illuchi II.

La Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi apegada a su objeto social, tiene como finalidad primordial la prestación del servicio público eléctrico correspondiente a su área de concesión, a través de la generación, distribución y comercialización de energía eléctrica; su fin es brindar el suministro de energía eléctrica a sus clientes, cumpliendo con parámetros de calidad, ofreciendo un servicio confiable y continuo, convirtiéndola en una empresa encaminada a la innovación e impulsadora del desarrollo socio-económico de la Provincia de Cotopaxi.

La central de generación hidráulica Illuchi II fue construida en el año 1984, y esta se encuentran funcionando de una manera adecuada y permanente, hoy en día la central hidráulica opera como parte de la Empresa Eléctrica Cotopaxi (ELEPCO S.A.).

La central hidroeléctrica Illuchi II consta de dos unidades turbogeneradores de 2.6 (MVA) de capacidad cada uno, que funcionan a un voltaje de 2400 voltios.

Actualmente en la central Illuchi II todos sus componentes como generadores y tableros de control usan tecnología moderna, lo que facilita la conexión al sistema SCADA, de las centrales de generación y subestaciones que forman parte del sistema de subtransmisión de ELEPCO S.A. Pese a esto la central carece de un sistema de monitoreo continuo de vibraciones mecánicas para los grupos de generación hidroeléctrica, que se considera necesario debido al tiempo de vida que ya posee la central, además de que dichos problemas de vibración generalmente se traducen en altos costos de operación y mantenimiento.

### **1.3. Justificación e importancia**

Al contar con un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en los grupos de generación, permitirá medir y analizar en tiempo real todas las señales receptadas, lo que evitará posibles fallas de operación por vibraciones a las que la central pueda quedar expuesta. El oportuno control de situaciones que alteren el normal funcionamiento de la máquina y la continuidad del proceso puede llegar a reducir los costos por: mantenimiento, reparaciones mayores, o en el peor de los casos paros de producción; con esto aumentará la seguridad tanto del personal, de los equipos y de la planta en general.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en el sistema SCADA para los grupos de generación hidroeléctrica en la central Illuchi II de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Determinar el estado de funcionamiento actual de la central Illuchi II, a través de la determinación de una muestra representativa del personal operador de la central mediante el uso de encuestas.
- Construir el equipo analizador de vibraciones mecánicas e implementar al sistema SCADA que permita el monitoreo y registro de datos en tiempo real para los grupos de generación hidroeléctrica en la central Illuchi II.
- Analizar las señales de vibraciones mecánicas obtenidas en tiempo real y compararla con la señal estándar mediante la norma ISO 10816 para el funcionamiento adecuado del elemento rotativo en los grupos de generación.
- Proporcionar una base de datos obtenidos a partir del estudio de las vibraciones mecánicas, el mismo que será usado como referencia para la aplicación del mantenimiento predictivo a ser aplicado en los grupos de generación de la central.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes investigativos**

Con el pasar del tiempo las plantas de producción e industrias manufactureras comienzan a envejecer, con lo que muchos de sus sistemas de control van disminuyendo en eficiencia y productividad; todo es esto ha llevado a la necesidad de adoptar nuevas tecnologías. En la actualidad las empresas tienden a orientar sus procesos hacia la automatización y monitoreo continuo, lo que permite tener un control total en tiempo real, llegando a obtener como resultado procesos más eficaces y eficientes. En el caso de una central de generación hidroeléctrica se automatizan los procesos de almacenamiento de agua, control de caudales, monitoreo de vibraciones en los grupos generadores, producción de energía, potencia, y provisión de información a nivel empresarial y de mercado.

#### **2.2. Fundamentación teórica**

Existen distintas técnicas disponibles para la monitorización como son las vibraciones, el análisis de temperaturas, aceites, etc. Una de las más potentes y utilizadas es el análisis de vibraciones. El control vibratorio, si se efectúa de forma adecuada, puede utilizarse para optimizar las técnicas de mantenimiento a fin de conseguir una mejor planificación del mismo y aumentar su rentabilidad. Se pretende detectar los desgastes y daños en su etapa incipiente y seguir su evolución con las

horas de funcionamiento de la máquina para evitar daños catastróficos y seleccionar el mejor momento posible para los desmontajes de la máquina (Mantenimiento Predictivo). No se pretende sustituir las revisiones periódicas (Mantenimiento Preventivo) sino alargarlas lo cual tiene una clara repercusión económica en los gastos de mantenimiento.

La monitorización puede realizarse de forma continua (on-line) o a intervalos periódicos utilizando grabadoras magnéticas o colectores de datos portátiles. En el primer caso hay que instalar un equipo de monitorización en cada grupo lo cual supone un coste importante. En el segundo caso el coste es mucho menor puesto que el mismo equipo se utiliza para monitorizar varias máquinas, aunque siempre hay que mantener un número mínimo de captadores en la máquina funcionando de modo continuo para garantizar el paro de la misma en caso de una avería importante. En la mayor parte de los grupos hidráulicos se puede utilizar el segundo sistema, puesto que los daños acostumbran a evolucionar lentamente. En la actualidad las grandes centrales, refinerías, papeleras y centrales de producción eléctrica están poniendo en marcha este tipo de sistemas de monitoreo de vibraciones como parte del plan de mantenimiento predictivo.

### **2.2.1. Antecedentes de la investigación**

En la tesis “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MÁQUINAS ROTATORIAS MEDIANTE ANÁLISIS ESPECTRAL DE VIBRACIONES.” (2005). Previo la obtención del título de ingenieros en electrónica e

instrumentación los autores Edgar Ignacio Muñoz Solís y José Luís Salazar Malliquinga desarrollan la implementación de un sistema de adquisición de datos y un software de análisis espectral, capaces de diagnosticar estas fallas, utilizando un sensor de vibración que genera una señal de salida PWM proporcional a la vibración medida, esta información es recogida e interpretada mediante una tarjeta de adquisición de datos, el software de análisis obtiene el espectro de la señal por medio de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y realiza dos tipos de análisis: de envolvente e histórico. (Muñoz Solís & Salazar Malliquinga, 2005). Este trabajo ayuda en la comprensión de la recolección e interpretación de señales espectrales mediante una tarjeta de adquisición de datos.

En la tesis “ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS CAUSADAS POR DESALINEACIÓN COMO MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN BOMBAS HIDRAULICAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES DE FLUJO RADIAL DE 1 HP” (2015). Previo la obtención del título de ingeniero en mecánica el autor Luis Amable Aldaz Mayorga desarrolla el análisis de las vibraciones mecánicas producidas por desalineación paralela como angular existente entre motor – bomba, haciendo uso de un banco de simulación, dispositivos electrónicos para la toma de datos análogos, acelerómetros y una tarjeta DAQ desarrollando un programa computacional usando lenguaje de programación de NI LabVIEW. (Aldaz Mayorga, 2015). Este trabajo sirve de apoyo para la comprensión en el análisis e interpretación de señales espectrales originales por vibraciones mecánicas.

En la tesis “ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS COMO BASE PARA LA EJECUCIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LA MAQUINARIA PETROLERA (BLOQUE 15) DE OCCIDENTAL EXPLORATION & PRODUCTION COMPANY” (2006). Previo la obtención del título de ingeniero en mecánica el autor Ismael León Cedeño desarrolla la aplicación del mantenimiento predictivo, a través del análisis de vibraciones en rodamientos que permitan detectar desalineación, desbalanceo, problemas de sujeción, exceso de tolerancias y muchas otras fallas, para esto se realizaran mediciones de vibración y sus respectivas gráficas de tendencia. (León Cedeño, 2006). Este trabajo ayuda en la comprensión de la aplicación del mantenimiento en máquinas.

## **2.3. Fundamentación conceptual**

### **2.3.1. Mantenimiento**

Se define como la disciplina cuya finalidad consiste en mantener las máquinas y el equipo en un adecuado estado de operación, a través de la ejecución de: inspecciones, pruebas, ajustes, calibración, reparación, reconstrucción y reemplazo. (Pérez, Delgado, Cruz, Velásquez, & Martínez, 2012).

#### **a) Tipos de mantenimiento**

**Mantenimiento correctivo:** Aquellas consecuencias que se revelan en el equipo.

Pueden clasificarse en:

- **No planificado:** Se basa a un mantenimiento de emergencia y deberá ser efectuado con suma urgencia, esto pudo haber sido por una falla repentina o por una condición imperativa, efectuando una reparación correctiva al instante.
- **Planificado:** Aquí tendremos la posibilidad de predecir qué se debe hacerse, es decir, cuando el equipo se pare para efectuar la reparación, se pueda disponer del personal, repuestos y referencias técnicas para un mantenimiento adecuado.

**Mantenimiento preventivo:** Se basa en inspecciones regulares a las máquinas, de forma planificada, programada y controlada, con el propósito de anticipar fallas funcionales y desgastes. Este tipo de mantenimiento busca la prevención o corrección del deterioro sufrido por un equipo, dichas causas pueden haber sido provocadas por el uso normal, factores climáticos, o fallas de algún accesorio que no presente repercusión en la función principal, estas actividades se ejecutan previendo que los equipos presenten fallas mayores.

**Mantenimiento predictivo:** Este tipo de mantenimiento ayuda en un principio a detectar el comienzo de un futuro daño o avería, a la vez que nos permite contar con las herramientas útiles para analizar la causa del problema que se esté desarrollando, para finalmente lograr determinar, el momento indicado, de forma puntual, corregir de una manera segura la falla detectada.

El mantenimiento predictivo abarca tres etapas, que son:

- **Detección:** Su funcionamiento es basado en el seguimiento de la evolución de uno o varios parámetros seleccionados adecuadamente, de acuerdo a su

sensibilidad ante los distintos cambios ocasionados en las partes de la máquina analizada.

- **Identificación:** Una vez que el daño es detectado, se realiza la identificación de la causa raíz de este, es decir, identificar qué elemento o elementos de la máquina es o son responsables del aumento en las señales de vibraciones, en relación a las referencias que reflejan una condición mecánica normal.
- **Corrección:** Identificar la causa del problema y la ubicación del mismo, lo cual permitirá organizar y ejecutar de manera óptima los trabajos para la corrección de dicha falla y de su correspondiente causa. Es de muchísima importancia el hecho de que la detección de los problemas que puedan encontrarse, incluso cuando estos se encuentran en etapa de desarrollo inicial, esto nos permite que podamos planificar los trabajos de mantenimiento en el momento oportuno, minimizando las pérdidas por concepto de mantenimiento.

### 2.3.2. Vibraciones mecánicas

La vibración mecánica se relaciona al movimiento oscilatorio de una partícula oscilante alrededor de un punto de equilibrio. El tiempo empleado para que realice un ciclo completo de movimiento se denomina como período de la vibración. La frecuencia de movimiento se define al número de ciclos por unidad de tiempo, de igual manera llamamos amplitud de la vibración al desplazamiento máximo del sistema.

Las vibraciones en máquinas y estructuras en su mayor parte son consideradas indeseables, ya que incrementan los esfuerzos y las tensiones debido a las pérdidas de

energía presentes. También son consideradas como desgastadoras de materiales, generadoras de ruidos molestos y causantes de daños por fatiga y movimientos. Todo sistema mecánico posee características de elasticidad, oposición y amortiguamiento al movimiento con unas de grado mayor o menor que otras; Esto se debe a las características propias que poseen los sistemas haciendo que vibre el sistema cada vez que se presente una perturbación.

#### a) Tipos de vibraciones

Para determinar un análisis y diagnóstico del estado de un equipo, es de suma importancia establecer las medidas necesarias que permitan corregir el estado de dicha vibración, reduciendo el porcentaje de las fuerzas vibratorias que no sean deseadas ni necesarias. De tal manera que, al ejecutar un análisis de datos, el interés principal deberá ser identificar las amplitudes que predominen en la vibración, y que nos orienten a la detección de posibles causas, y la solución del problema. Para realizar una correcta interpretación de los datos obtenidos, es importante primero conocer las diferentes causas que pueden provocar vibración y sus consecuencias, entre ellas se considera como las más relevantes:

**Vibración debida a desbalance:** El desbalance de la maquinaria es una de las causas más comunes de la vibración. Los datos que son expuestos por un estado de desbalance muchas veces nos indican:

- La frecuencia de vibración de la pieza se determina según el rango de las RPM a la que se encuentra desbalanceada.

- La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.
- La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial, horizontal o vertical (en las máquinas con ejes horizontales).
- El análisis de fase indica lecturas de fase estables.
- La fase se desplazará  $90^\circ$  si se desplaza el captador  $90^\circ$ .

**Vibración debida a la falta de alineamiento:** En gran parte de los casos una condición debido a la ausencia de alineamiento se relaciona con los siguientes aspectos:

- La frecuencia vibracional es de 1x RPM, 2x y 3x RPM para los casos en los que presente una falta crítica de alineamiento.
- La amplitud vibracional es directamente proporcional a la falta de alineamiento.
- La amplitud vibracional además de radial puede llegar a ser alta también en sentido axial.
- El análisis de fase muestra lecturas de fase inestables.

**Vibración debida a excentricidad:** Estas vibraciones son consideradas como las fuentes más comunes de desbalance, puesto que existe mayor peso de un lado del centro de rotación que del otro lado. En rotores de compresores, ventiladores, bombas y sopladores. Para ese caso dichas fuerzas vienen a ser el resultado de fuerzas hidráulicas y aerodinámicas diferentes que actúan en contra del rotor.

**Vibración debida a rodamientos de chumaceras defectuosos:** Los niveles elevados de vibración, que son ocasionados debido a rodamientos de chumacera defectuosos, generalmente son el resultado de una holgura excesiva (esto es causado por un desgaste ocasionado por erosión química o por una acción de barrido), en aflojamientos mecánicos (provocado por metal blanco suelto en el alojamiento), u ocasionados por fallas de lubricación.

**Vibración debida a aflojamiento mecánico:** El aflojamiento mecánico y su acción de golpe que resultante de ello provocan vibraciones con una frecuencia que generalmente es  $2x$ , y también múltiplos más altos, de las RPM. Esta vibración puede llegar a ser el resultado de holgura excesiva en los rodamientos, de pernos de montaje que se hallen sueltos, de, o estructuras que muestren fisuras, Por todo ello se puede mencionar que el aflojamiento mecánico conlleva a que existan mayores vibraciones de las que de por sí ocurrirían, derivadas de otros problemas.

**Vibración debida a las bandas de accionamiento:** A menudo una común fuente de vibración se lo considera a las bandas en "V" debido a que estas fácilmente se las puede observar sacudiéndose o saltando entre poleas. Generalmente la sustitución de las bandas es comúnmente una de las primeras opciones tentativas correctivas de los problemas de vibración.

El factor clave para determinar la falla inicial del problema en las bandas es su frecuencia de vibración, si la banda está reaccionando a otras fuerzas de alteración, tales como excentricidad o desbalance en las poleas

**Vibración debida a problemas de engranaje:** En este tipo de vibraciones es evidente la identificación, normalmente transcurre a una frecuencia similar a la frecuencia de engrane, los problemas comunes tienen como resultado la vibración a la frecuencia de engrane, comprenden el desgaste excesivo, inexactitud, fallas de lubricación y el alojamiento de partículas extrañas entre los dientes.

#### **b) Medición de vibración**

Las técnicas de diagnóstico de fallas y evaluación de la integridad de estructuras y máquinas comúnmente se centran en la medición y análisis de vibraciones mecánicas utilizadas en paralelo con otras técnicas de mantenimiento.

La evaluación de vibraciones mecánicas en equipos rotatorios presenta una gran ventaja respecto a otras técnicas de inspección como lo son: el ultrasonido, las tintas penetrantes, radiografías, etc. Esto se debe a que la evaluación se realiza en línea; es decir cuando la máquina se encuentra operando, lo que permite generar una detención y la pérdida de producción.

**Parámetros de medición y análisis de vibración:** El análisis de vibraciones está basado en la interpretación de las señales de vibración tomando como referencia los niveles de tolerancia indicados por el fabricante o por las normas técnicas, tomando en consideración los siguientes parámetros característicos.

- **Desplazamiento (amplitud):** Es la distancia entre la posición de la partícula que vibra y su posición de reposo. Generalmente nos referimos a la amplitud máxima, unidad: [m].
- **Velocidad:** Es la velocidad que anima a la partícula. Equivale a la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo, [mm/seg].
- **Aceleración:** Es la variación de la velocidad por unidad de tiempo y equivale a la segunda derivada del desplazamiento con respecto al tiempo, unidad: [mm/seg<sup>2</sup>] (Jaureguiberry, 2011).

#### **Tipos de sensores o transductores empleados en la medición de vibraciones:**

El análisis de vibraciones está basado en la interpretación de las señales de vibración tomando como referencia los niveles de tolerancia indicados por el fabricante o por las normas técnicas, detallando a continuación los tipos de sensores utilizados en el análisis de vibraciones.

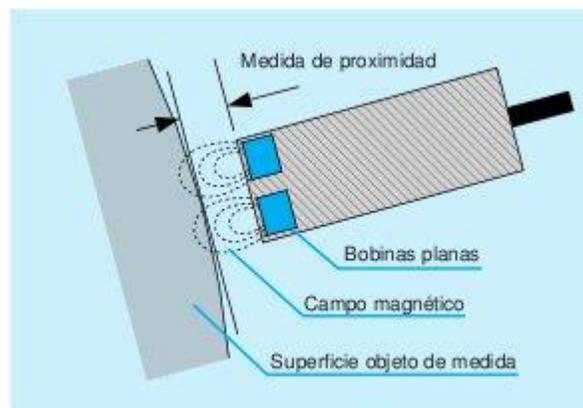
- **Sensores de desplazamiento:** También conocido como transductor de “corriente Eddy” o proxímetro, normalmente se aplica con frecuencias bajas (menor a 1.000 Hz). Este proxímetro se emplea para medir el desplazamiento axial o radial de ejes. Comúnmente son instalados en las cubiertas de rodamientos o a su lado y sensan el desplazamiento del eje con relación a su posición de anclaje. La respuesta en frecuencia es ideal, careciendo de un límite inferior de frecuencia, por lo que permite medir posición y vibración, al tratarse de sensores de desplazamiento hay que tomar en cuenta que existen dos tipos, desplazamiento con y sin contacto.

## Ventajas

- Mide el movimiento relativo entre su punta y el eje de giro.
  - Mide tanto la componente continua como la alterna de una señal vibratoria.
- (SINAIS, 2013)

## Desventajas

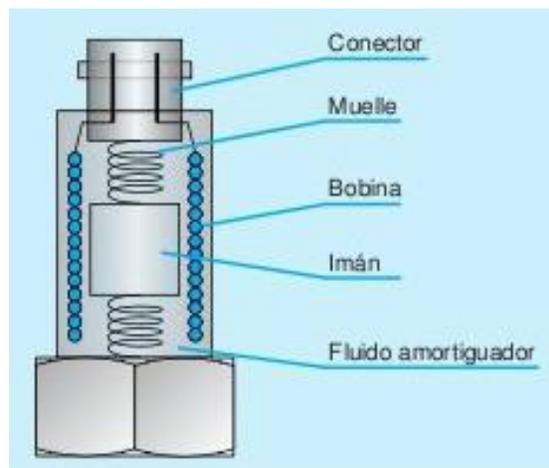
- El rango de frecuencias está limitado en cierto modo respecto a otros modernos transductores típicamente lineales entre 0-1.000 Hz.
- Se requiere un acondicionador de señal.
- Se ven afectados por errores de lectura eléctricos y mecánicos, incluso pequeñas grietas en el eje pueden hacer que el transductor las interprete como una gran actividad de vibración, ver la figura 1. (SINAIS, 2013).



*Figura 1.* Esquema de un proxímetro

Fuente: (SINAIS, 2013)

- **Sensor de velocidad o velocímetro:** Son aplicados en máquinas donde la transmisión de vibración a la carcasa es a través del eje con poca amortiguación (en la carcasa existirá amplitudes de vibración grandes). Estos sensores se componen de un imán permanente que se halla ubicado en el centro de una bobina de hilo de cobre. Al vibrar la carcasa, se crea un movimiento relativo entre bobina e imán, induciendo por la ley de Faraday una tensión que es proporcional a la velocidad del movimiento como se indica en la figura 2.



*Figura 2.* Sensor de velocidad

Fuente: (SINAIS, 2013)

### **Ventajas**

- Mide directamente la velocidad, que es proporcional a la de la vibración.
- No se necesita fuente externa de alimentación, lo que permite enviar señal eléctrica a lo largo de grandes distancias por cable. (SINAIS, 2013).

## Desventajas

- Las dimensiones del transductor son relativamente grandes, necesitando grandes bases magnéticas para su sujeción. En consecuencia, el rango de frecuencias es, en cierto modo, restrictivo: 10-1.000 Hz.
- La orientación de la medida, vertical u horizontal del transductor puede alterar la señal de salida en un orden de 5-10%
- La salida del transductor depende de la temperatura. A mayor temperatura la salida del sensor se reduce al debilitarse el campo magnético. (SINAIS, 2013).
- **Sensor de aceleración o acelerómetro:** Los acelerómetros son los sensores más utilizados para un análisis de vibraciones en maquinaria. Sin embargo, en ocasiones se integra la señal y trabaja en unidades de velocidad. La instalación de los acelerómetros es externa, generalmente sobre el alojamiento de los apoyos o de la parte de la máquina a monitorear.  
  
La tensión eléctrica que genera el transductor es proporcional a la aceleración por presión sobre el cristal piezoeléctrico. Estos acelerómetros pueden captar señales con una precisión de entre 1 Hz y 15.000 Hz. La recolección de datos de vibración a altas frecuencias dependerá del medio de fijación del transductor a la máquina

## **Ventajas**

- La mayoría de los sensores tiene un amplio rango de frecuencia, normalmente entre 2 Hz y 15.000 Hz.
- Estos transductores son muy compactos, sin partes móviles, ligeros y de tamaño reducido.
- El transductor del tipo ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) tiene un acondicionador de señal interno. Aunque ICP es una marca registrada de PCB Piezotronics Inc., se ha convertido en un término genérico para referirse a un acelerómetro con amplificador integrado. También se les suele llamar acelerómetros en modo voltaje. (SINAIS, 2013).

## **Desventajas**

- Cuando se usa en modo “hand-held” o “stinger” para medir altas frecuencias, la respuesta de señal es muy pobre por encima de 1.200 Hz.
- La salida de amplitud viene dada en unidades de aceleración. Esta salida debe ser integrada para obtener la representación espectral o el valor global de amplitud de velocidad, ver la figura 3 (SINAIS, 2013).

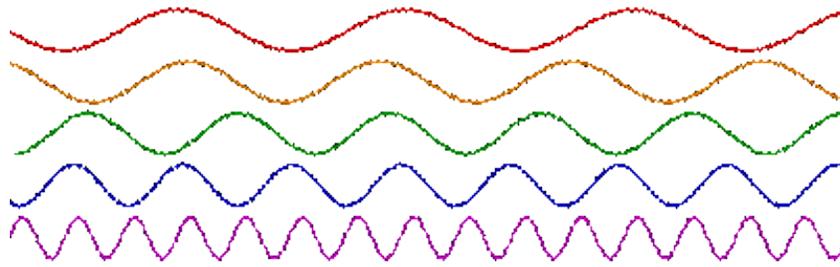


*Figura 3.* Transductor y acelerómetro piezoeléctrico

Fuente: (SINAIS, 2013)

**Unidades para la medición de vibraciones:** Para medir una vibración es necesario conocer las variables que se emplean: frecuencia y amplitud ambas en función del tiempo.

- **Frecuencia:** Se considera como la recurrencia con la que se produce un evento cíclico o periódico. En física, se puede ver periodicidad en ondas, oscilaciones y rotación. En una forma de onda ya sea análoga o digital, se puede invertir el período con el fin de obtener frecuencia. Mientras el período sea menor existe una mayor frecuencia y viceversa. Esto se ilustra en la figura 4, donde podemos apreciar que la forma de onda superior tiene la menor frecuencia y la mayor frecuencia la tiene la forma de onda inferior.



*Figura 4.* Formas de onda de frecuencia

Fuente: (INSTRUMENTS, 2013)

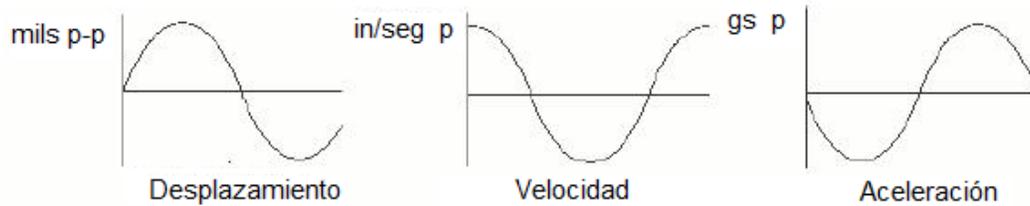
- **Amplitud:** Es una señal armónica que está relacionada al valor más alto que registra una variable, medida desde el punto medio o de equilibrio. En un movimiento ondulatorio o una señal electromagnética, se interpreta a la amplitud de onda como la distancia existente entre el máximo valor del espectro y el punto de equilibrio.

Los parámetros que sirven como punto de referencia para la medición del movimiento de vibraciones mecánicas en una máquina son:

- El desplazamiento de la vibración
- La velocidad de la vibración
- La aceleración de la vibración
- La fase

En la figura 5 se aprecia fácilmente parámetros como desplazamiento, velocidad y aceleración, aquí nos indica como los parámetros de desplazamiento y velocidad se encuentran en fase a  $90^\circ$  mientras que entre la

velocidad y la aceleración están en fase a  $90^\circ$  con la velocidad y a  $180^\circ$  con el desplazamiento respectivamente.



*Figura 5.* Unidades de medición de las vibraciones

Fuente: (White, 2009)

Midiendo la aceleración, se puede integrar y visualizar los valores en unidades de velocidad. La información a alta frecuencia es disminuida y la información a más alta frecuencia es ampliada. La información de baja frecuencia se ve tan amplificadas que es necesario emplear un filtro electrónico. (pasa-altos, del recolector de datos), fijado generalmente entre 0,2 y 50 [Hz], o bien en el software. Todos los sensores tienen límites físicos y electrónicos, por esta razón deben ser montados correctamente y deberán ser confrontados con los cálculos determinados, como se indica en la figura 6.

- D=Desplazamiento, valor pico [mm]
- F= Frecuencia [Hz ó CPS]
- V= Velocidad [mm/seg]
- A= Aceleración [mm/seg<sup>2</sup>]

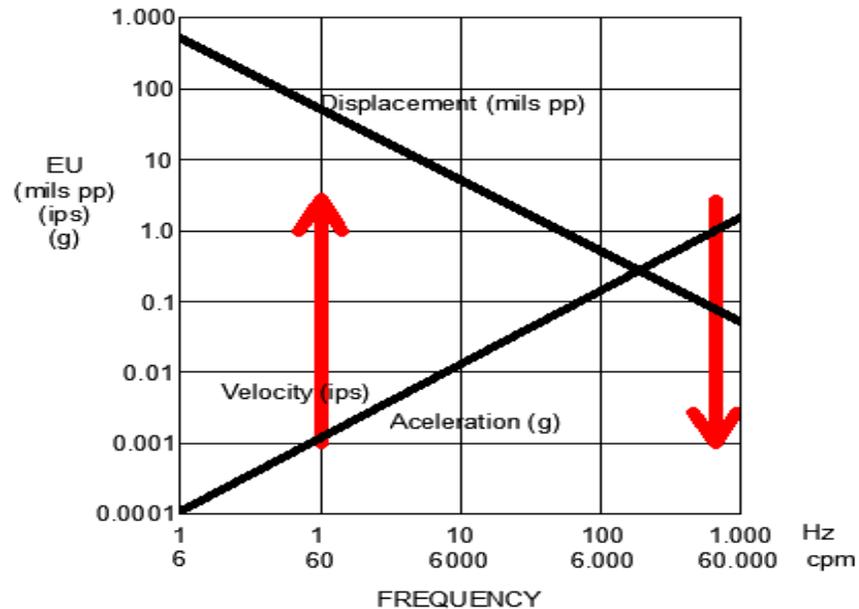


Figura 6. Interpretación de unidades de vibraciones

Fuente: (Royo & Rabanaque, 2005)

### c) Ventajas del análisis de vibraciones

#### Reducción de costos de mantenimiento

- Localiza y corrige los problemas existentes o que se estén desarrollando en las máquinas, antes de que estos lleguen a ser más críticos y a la final más costosos de reparar.
- Identifica y reemplaza prácticas pobres de mantenimiento.
- Mejora la planeación y los programas de mantenimiento.
- Reduce el costo de horas laborales extras, del personal de mantenimiento.
- Mayor calidad en las reparaciones.
- Reducción de partes para mantenimiento en inventario.

- Reducción del mantenimiento preventivo programado, el mismo que en muchas ocasiones puede llegar a ser innecesario y costoso.

### **Incremento de la producción**

- Mejora las condiciones de seguridad
- Reduce los tiempos perdidos ocasionados por fallos inesperados en el equipo.
- Aumento del valor de cada máquina, debido al incremento anual de producción que pueda llegar a dar.
- Extensión de la vida útil del equipo, manteniendo una calidad constante durante el proceso.
- Reducción de pérdida de la materia prima.
- Incrementa el grado de confiabilidad de la maquinaria, lo que le permite cumplir y satisfacer a tiempo con las necesidades de producción.

El análisis de vibraciones es imposible de realizarse en cualquier parte de la maquinaria, ya que existen partes que pueden ser capaces de mostrar un dato confiable mucho más exacto. Por ello es necesario primero ubicar los llamados puntos de prueba y luego con ayuda del transductor, el mismo que deberá ser ubicado lo más cerca posible de los puntos de rodamiento, con metal sólido entre el rodamiento y el transductor, esto es porque no debe utilizarse directamente sobre el rodamiento, y tampoco deberá usarse las llamadas gorras de rodamiento, ya que estas son hechas de metal delgado y únicamente logran conducir poco la energía de vibración.

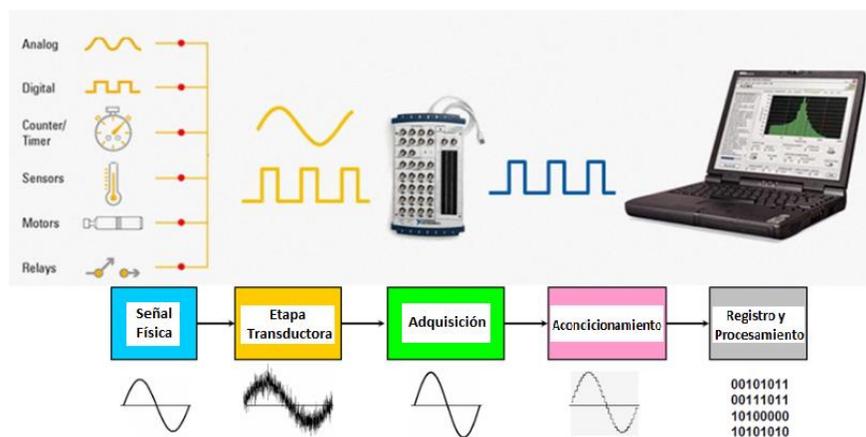
El desarrollo de la electrónica y los sistemas de cómputo han permitido de manera satisfactoria la implementación de nuevas técnicas de análisis de señales con aplicación en un sin número de procesos dentro de la industria. (Beltrán Escobar, 2009)

Es así, como se empleará esta técnica para capturar, procesar y analizar las vibraciones de los grupos de generación hidroeléctrica de la central Illuchi II perteneciente a la empresa ELEPCO S.A., con la firme convicción de lograr un diagnóstico de fallas en tiempo real y con la posibilidad de ser monitoreado de forma local y remota a través del sistema SCADA.

### 2.3.3. Sistemas de adquisición de datos

La interfaz de los sistemas de adquisición de datos (SAD) constituyen el mundo analógico y el digital.

Para que todo esto sea posible es necesario cumplir varios ciclos que son:



*Figura 7.* Esquema de adquisición de datos

Fuente: (Cherres Fajardo & Ñauta Chuisaca, 2015)

### a) **Etapas del esquema de adquisición de datos**

**Etapa transductora:** En esta primera etapa se utilizan los sensores o transductores, que son los encargados de medir los fenómenos físicos y suministrar una señal eléctrica que pueda ser interpretada por el sistema de adquisición, de acuerdo con la relación entrada/salida que tenga el transductor (sensibilidad). Los más empleados son los acelerómetros piezoeléctricos, velocímetros sísmicos o electrodinámicos. (Cañar Ramírez, 2009).

**Etapa de adquisición:** Esta etapa se encarga de recibir la información transmitida por el transductor, la cual en un principio esta de forma analógica y deben ser digitalizadas de manera que se puedan procesar, por esta razón los elementos que componen esta etapa son conversores A/D (análogo/digital) y conversores D/A (digital/análogo). (Cañar Ramírez, 2009).

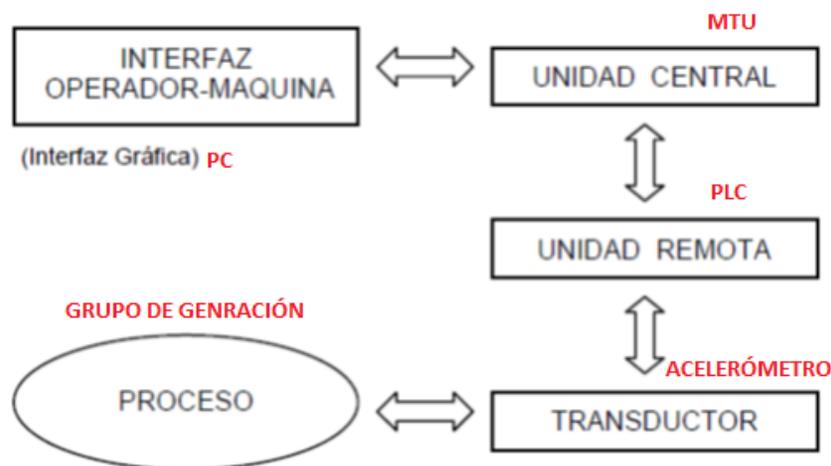
**Etapa de procesamiento:** Es la etapa en donde se analizan, las señales utilizando técnicas de procesamiento digital. Para ello se puede hacer uso de diferentes lenguajes de programación que permitan implementarlas de manera eficiente y confiable. (Cañar Ramírez, 2009).

**Etapa de visualización:** En esta etapa se pueden visualizar, controlar y supervisar los datos adquiridos, a través de un software, adicionalmente pueden tener conexión a un sistema SCADA.

Los sistemas SCADA realizan comunicaciones con dispositivos de campo como (controladores autónomos, autómatas programables, actuadores, motores, etc.) controlando desde un PC el proceso en forma automática, para visualizar en la pantalla todas y cada una de las instalaciones remotas existentes.

**Eta de registro:** Esta es la última etapa de la adquisición, en donde se almacenan los resultados del procesamiento para su posterior visualización y análisis.

Aquí se pueden almacenar cualquier cantidad de variables, como lo son nivel, presión, vibración, temperatura, entre otros.



*Figura 8.* Diagrama de una adquisición de datos

Fuente: (Cherres Fajardo & Ñauta Chuisaca, 2015)

#### 2.3.4. Protocolos de comunicación

Son normas que facilitan el intercambio de datos entre los diferentes dispositivos que integran una misma red. Estos han evolucionado a través del tiempo de la mano de la

tecnología electrónica y del desarrollo de los microprocesadores, los cuales desde su incursión en la industria lo que han posibilitado su integración a redes de comunicación obteniendo importantes ventajas, entre ellas se puede mencionar:

- Mayor precisión de la integración de tecnología digital en las mediciones.
- Mayor y mejor disponibilidad de la información obtenida por los dispositivos de campo.
- Diagnóstico remoto de todos de los componentes que integran un proceso determinado, como se indica en la figura 9.

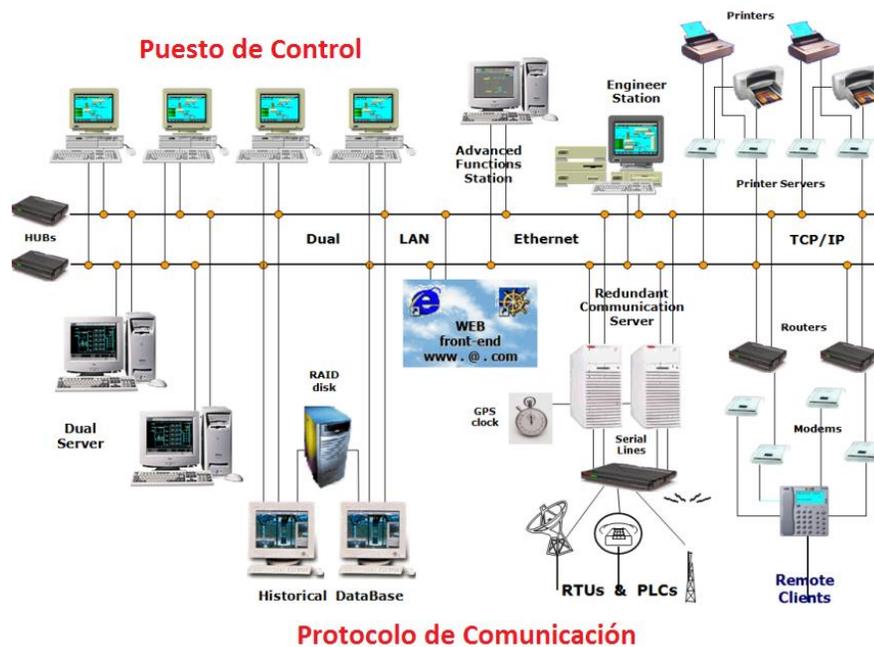


Figura 9. Esquema de comunicación en una planta industrial

Fuente: (Muñoz Solís & Salazar Malliquinga, 2005)

Es posible integrar cada uno de los dispositivos independientes dividiendo las tareas entre los grupos de procesadores jerárquicamente anidados. Lo que da lugar a una estructura de red industrial, clasificándose en tres categorías:

- Buses de campo
- Redes LAN
- Redes LAN-WAN

### **2.3.5. Normas empleadas para la medición de la criticidad de la vibración**

#### **a) Norma ISO 10816: Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas**

Esta norma establece las condiciones y procedimientos para la medición y evaluación de la vibración mecánica, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. Está basado bajo el criterio general tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación establecidas con el objetivo de garantizar el funcionamiento de la máquina a largo plazo. La norma ISO 10816 contiene un estándar que consta de seis partes:

**Parte I:** Indicaciones generales.

**Parte II:** Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.

**Parte III:** Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 KW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.

**Parte IV:** Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.

**Parte V:** Conjuntos de máquinas de plantas de hidro generación y bombeo.

**Parte VI:** Conjuntos de máquinas alternativas con potencia superiores a 100Kw.

Velocidad 10 - 1000 Hz r > 600 rpm	Velocidad 2 - 1000 Hz r > 120 rpm	in/s rms	mm/s rms								
		0,43	11								
		0,28	7,1								
		0,18	4,5								
		0,14	3,5								
		0,11	2,8								
		0,09	2,3								
		0,06	1,4								
		0,03	0,71								
		BASE		Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible
Tipo de máquina	Bombas > 15 KW				Tamaño medio		Máquinas grandes				
	Flujo radial, axial o mixto				15 KW < P ≤ 300 KW		300 KW < P < 50 MW				
Grupo	Motor integrado		Motor separado		Motores		Motores				
	Grupo 4		Grupo 3		160 mm ≤ H < 315 mm		315 mm ≤ H				
		Grupo 2		Grupo 1							

- A** Máquina nueva o reacondicionada
- C** La máquina no puede operar un tiempo prolongado
- B** La máquina puede operar indefinidamente
- D** La vibración está provocando daños

Figura 10. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816

Fuente: (Cherres Fajardo & Ñauta Chuisaca, 2015)

**Zona A:** Máquina nueva o reacondicionada, cuyos valores de vibración corresponden a máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas.

**Zona B:** Máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones.

**Zona C:** Máquinas cuya condición no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un período de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada, antes de que esta pare por sí sola.

**Zona D:** Máquinas con valores de vibración altos, lo que los hace peligrosos para la máquina ya que esta puede sufrir daños. (SINAIS, 2013).

**b) Norma ISO 7919: Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en ejes giratorios**

Esta norma establece líneas generales para medida y evaluación de vibraciones en maquinaria midiendo directamente del eje rotativo siendo aplicable a medidas absolutas o relativas.

**Parte 1:** Directrices generales

**Parte 2:** Turbinas de vapor terrestre y generadores de más de 50 MW, con velocidades normales de operación de 1500 RPM, 1800 RPM, 3000 RPM y 3600 RPM.

**Parte 3:** Máquinas industriales acopladas.

**Parte 4:** Conjuntos de turbina de gas con cojinetes de película de fluido.

**Parte 5:** conjuntos de máquinas en plantas de generación y bombeo de energía hidráulica.

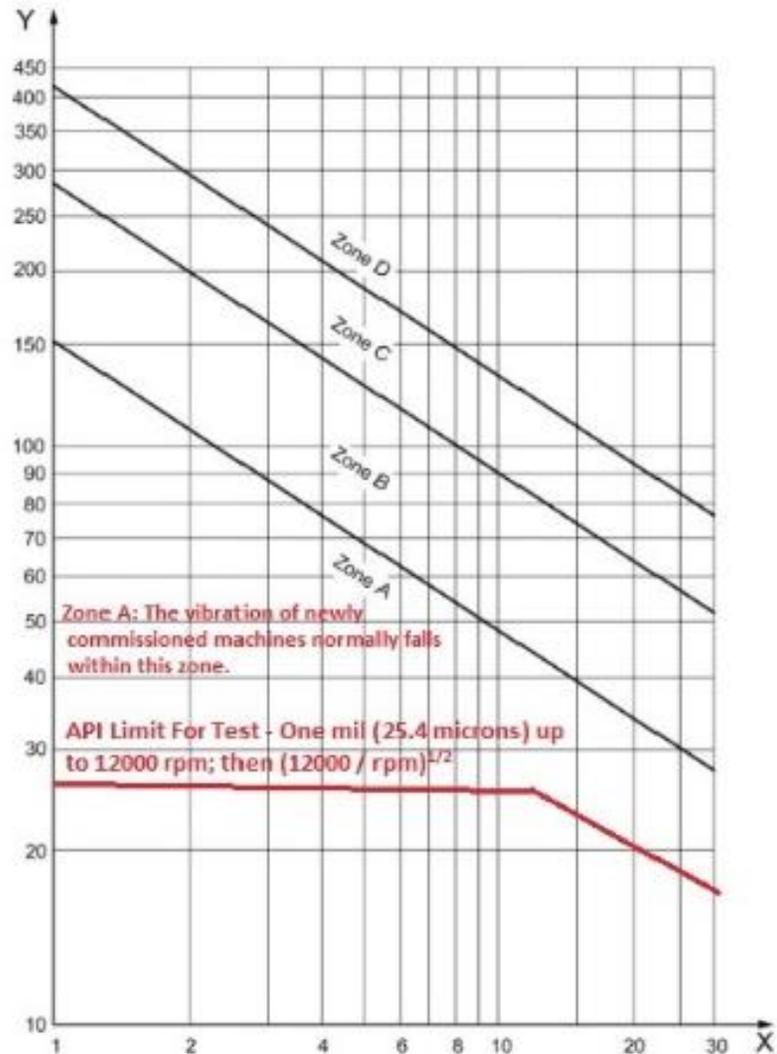


Figura 11. Severidad de la vibración según la norma ISO 7919

Fuente: (Cherres Fajardo & Ñauta Chuisaca, 2015)

## 2.4. Fundamentación Legal

En la república del Ecuador, según el artículo 2 de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica establece como uno de los objetivos fundamentales “Cumplir la prestación del servicio público de energía eléctrica al consumidor o usuario

final, a través de las actividades de: generación, transmisión, distribución y comercialización, importación y exportación de energía eléctrica”, además estipula el “diseño de mecanismos que permitan asegurar la sustentabilidad económica y financiera del sector eléctrico”. (MEER, 2015)

El presente trabajo investigativo está basado en el análisis de las señales de vibración mecánica en los grupos de generación hidroeléctrica como método de mantenimiento predictivo. Este análisis será fundamentado y apegado a los parámetros establecidos en la normativa internacional “BRITISH STANDARD, ISO 10816”, la misma que establece las condiciones y procedimientos para la medición y evaluación de la vibración mecánica, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación está basado tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que hayan sido establecidas fundamentalmente con el objetivo de garantizar el funcionamiento de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las normas ISO 2372 e ISO 3945, que en su momento fueron usadas para analizar vibraciones mecánicas en máquinas que operaban desde 10 hasta 200 RPS.

## **2.5. Sistemas de Variables**

**Variable Independiente:** Diseño de un sistema de monitoreo continuo de señales de vibraciones mecánicas.

**Variable Dependiente:** Análisis y comparación de las señales de vibraciones mecánicas para detectar las fallas y sus posibles causas presentes en los grupos de generación, según la norma ISO 10816.

## 2.6. Hipótesis

Mediante la construcción e implementación del sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas y el análisis de las señales obtenidas, se podrá visualizar en tiempo real las curvas que presentan los componentes de los generadores, permitiendo alertar cuando exista una posible falla y su causa.

## 2.7. Cuadro de operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Operaciones de variables*

Variables	Referencia conceptual	Referencia operacional			Técnicas
		Dimensiones	Indicadores	ITEMS	
<b>INDEPENDIENTE</b> <b>Diseño de un sistema de monitoreo continuo de señales vibraciones mecánicas.</b>	El sistema de monitoreo permite realizar una medición y análisis en tiempo real de las vibraciones mecánicas, obteniendo señales proporcionales al nivel de vibración de velocidad general, facilitando su interpretación para emitir un diagnóstico de	Parámetros mecánicos	Nivel de vibración mecánica	(mm/seg)	Mediciones

CONTINUA



	<p>severidad de vibración acertado, en función de generar acciones de mantenimiento predictivo.</p>				
<p><b>DEPENDIENTE</b>  <b>Análisis y comparación de las señales de vibraciones mecánicas para detectar las fallas y sus posibles causas presentes en los grupos de generación, según la norma ISO 10816.</b></p>	<p>El análisis de vibraciones mecánicas nos permite diagnosticar el estado de la máquina y sus componentes como parte de una planta de producción; basándose en la interpretación de las señales generadas que permitan determinar la severidad de la vibración, tomando como referencia los niveles de tolerancia establecidos por la norma ISO 10816</p>	<p>Señal</p>	<p>Tipo de señal generada</p>	<p>Digital</p>	<p>Mediciones</p>
				<p>Analógica</p>	
		<p>Componentes</p>	<p>Rango de frecuencia de ciclo máximo</p>	<p>720-1320 CPM</p>	<p>Ficha de campo</p>
		<p>Sensor</p>	<p>Rango de medición del acelerómetro piezoeléctrico</p>	<p>PC 420VR-10</p>	<p>Ficha de campo</p>
		<p>Sistemas de adquisición de datos (Sensor-Ordenador)</p>	<p>Acondicionamiento del conversor análogo/digital</p>	<p>PLC-Controllino MAX</p>	<p>Mediciones</p>

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

El proyecto en mención tiene como finalidad la medición y análisis de señales de vibraciones mecánicas en los grupos de generación pertenecientes a la central hidroeléctrica Illuchi II, como método de mantenimiento predictivo, empleando señales de salida de 4-20 mA proporcionales al nivel de vibración de velocidad general. Para medir las señales de vibración mecánica se emplea dos acelerómetros conectados a un convertidor corriente-voltaje cada uno, para el acondicionamiento de señal; todos los datos serán recopilados por medio de un PLC con conexión al sistema SCADA de la empresa ELEPCO S.A., Estos datos posteriormente serán analizados de acuerdo a la normativa internacional "BRITISH STANDARD, ISO 10816", lo que permitirá establecer una condición de clara de operatividad de la máquina.

#### **3.1. Modalidad de la investigación**

En la modalidad de la investigación se denota el tipo o tipos de investigación que se emplearán en el presente proyecto además de las técnicas y procedimientos a emplearse.

Los aspectos metodológicos dirigen el proceso de investigación del estudio elaborado, ya que dichos procedimientos orientan cualquier proyecto para su elaboración. Por esta razón se adopta la investigación bibliográfica y de campo.

### **3.1.1. Bibliográfica**

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se hará selección, recolección, análisis y uso de libros, documentos, artículos y demás fuentes bibliográficas que permitirán ampliar y, profundizar las diversas teorías y criterios para obtener definiciones y conceptos claros y aplicarlos en el análisis e interpretación de señales de vibraciones mecánicas, con el objetivo de adquirir los instrumentos apropiados para la correcta elaboración del proyecto.

### **3.1.2. De campo**

La investigación se la desarrollará en la central de generación hidroeléctrica Illuchi II perteneciente a la Empresa Eléctrica Provincial de Cotopaxi S.A., ya que este lugar es donde se realizará la implementación del proyecto. Se obtendrá la información del área que se tiene para la instalación del equipo y de disponibilidad de recursos como los grupos generadores que son indispensables para el desarrollo del proyecto.

## **3.2. Tipos de investigación**

### **3.2.1. Cuantitativo**

La obtención de datos de los parámetros de vibraciones mecánicas se realiza mediante el uso de acelerómetros con salida de 4-20 mA proporcionales al nivel de vibración de velocidad general, luego se procede al acondicionamiento de señales y su posterior validación teniendo en cuenta la normativa ISO 10816 la cual consta de 6 partes (ver ANEXO A).

### **3.3. Diseños de la investigación**

Este proyecto tiene como finalidad la medición de señales de vibración mecánica que presentan los grupos de generación hidroeléctrica (cojinete), mediante el uso de sensores de vibración y acondicionadores de señal, el proceso de obtención y procesamiento de datos se lo realiza mediante un PLC, y su interfaz mediante el software LabVIEW.

El enfoque a emplearse es Experimental.

#### **3.3.1. Método de hallazgo: Inductivo**

Busca el análisis posterior a la adquisición de las señales de vibración mediante los acelerómetros, que permita obtener los parámetros de diseño para los acondicionadores de señal que ingresarán al PLC.

#### **3.3.2. Método de contrastación: Experimental**

En la determinación de los parámetros de diseño, se realiza ensayos experimentales con el fin de obtener una señal proporcional al nivel de vibración de velocidad general, lo más apegada a la realidad filtrando el máximo de ruido posible que pueda provocar distorsiones indeseadas, con esto se procede a realizar el respectivo análisis de las datos obtenidos y permite establecer una condición de operabilidad real de la máquina, la misma que será usada como referencia para la aplicación del mantenimiento predictivo a ser aplicado en los grupos de generación de la central.

### **3.4. Niveles de investigación**

#### **3.4.1. Exploratoria**

En la central hidroeléctrica Illuchi II perteneciente a ELEPCO S.A., ubicada en la provincia de Cotopaxi no se dispone de un equipo de monitoreo de señales de vibración mecánica para los grupos de generación que permitan determinar el estado de operabilidad actual de las máquinas, se basa en el estudio de bancos de pruebas que contengan similares características debido a que no se cuenta con una idea clara y precisa para realizar el estudio y permitir la realización de nuevos estudios a futuro.

#### **3.4.2. Descriptiva**

A lo largo de la investigación se detalla paso a paso todo lo que se va realizando en el proyecto, es decir, se mencionará el adelanto del proyecto, los problemas que se van presentando en conjunto con sus posibles soluciones durante la medición y dimensionado del sistema de adquisición de datos, y sobre todo hacer constar el conocimiento adquirido.

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Población**

Para la recolección de la información necesaria en la aplicación del proyecto de investigación, se realiza una guía de observación en el cual se tomará nota de cada uno de los datos y características que arrojen las señales proporcionales al nivel de

vibración de velocidad general, puntos inferiores y superiores de la señal y tiempos en los cuales se presenten los puntos críticos en el mismo.

### 3.5.2. Muestra

A través de una guía de observación se toma nota del tiempo total estimado en los cuales se presenta las distorsiones más representativas de la señal como son los puntos máximos y mínimos, al ser un sistema de monitoreo continuo las mediciones se realiza durante períodos de 24 horas por cada eje (x, y), tomando de estas la más representativa y de mayor amplitud, para el análisis y contraste de las mediciones realizadas se usará la norma ISO 10816.

### 3.6. Técnicas y recolección de datos

En el desarrollo de la investigación se hizo uso de las siguientes técnicas de recolección de la información:

**Tabla 2**

*Técnicas de recolección de datos.*

Técnica	Tipo	Instrumento	Registro
<b>Observación</b>	Directa	Ficha de campo digitales: curvas, gráficos, imágenes	Archivos Digitales: Excel, Word

Toda la información es recolectada mediante observación directa la misma que permite estar en contacto con el objeto de estudio; con ayuda de una ficha de campo que describe lo observado, destacando los aspectos más sobresalientes logrando así información que sirva de aporte para el diseño y construcción del proyecto.

### **3.6.1. Instrumentos**

Para la obtención de datos de los parámetros de señales proporcionales al nivel de vibración de velocidad general se utilizan tablas de mediciones, fichas de campo digitales como curvas, gráficos, imágenes, etc.

### **3.6.2. Validez y confiabilidad**

Para el procesamiento de los datos recopilados, se procede mediante los siguientes criterios:

- Inspección de la información recopilada, hay que considerar que los datos tomados en cuenta, se encuentren dentro de los límites establecidos por la norma ISO 10816.
- Manejo de información, haciendo uso de gráficas y datos de los parámetros involucrados, con ayuda de herramientas computacionales.
- Presentación de resultados
- Contraste de resultados

### **3.7. Técnicas de análisis de datos**

- Revisión crítica de toda la información recopilada.
- Representación gráfica donde se indican los puntos máximos y mínimos que presenten las anomalías para un determinado tiempo.
- Representación tabulada que presenten los datos numéricos obtenidos, con las especificaciones de los puntos máximos y mínimos obtenidos para la determinación de posibles fallas de operabilidad correspondiente a cada ensayo.

### **3.8. Técnicas de comprobación de hipótesis**

- Interpretación y contraste de datos resultantes con la norma ISO 10816.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

En el presente capítulo se detallan cada uno de los resultados obtenidos por la encuesta realizada al Director de Generación y a los Técnicos que trabajan en la Central Hidroeléctrica Illuchi II, obteniendo resultados favorables para poder continuar con el tema de **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN EL SISTEMA SCADA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA CENTRAL ILLUCHI II DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A”**

Es importante mencionar que previo al trabajo de campo que se realizó con sus respectivas visitas y aplicación de encuestas, se definió una población de 6 encuestados, los cuales fueron: Director de Generación de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi ELEPCO S.A y los Técnicos encargados de realizar la toma de datos de generación de los grupos de generación de la central en cada uno de los tres turnos.

#### **4.1. Análisis de los resultados**

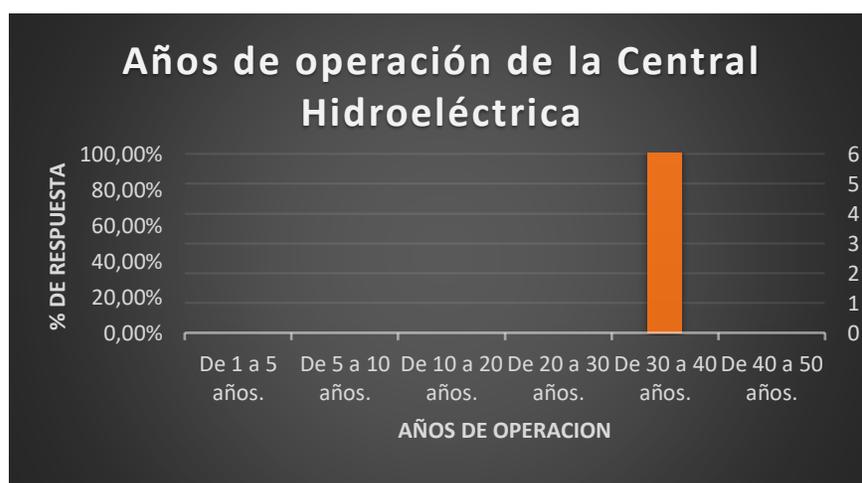
##### **PREGUNTA 1:**

- ¿Años que operan los generadores hidroeléctricos de la Central Hidroeléctrica Illuchi II?

**Tabla 3**

*Años de operación de los generadores.*

AÑOS	FRECUENCIA	PORCENTAJE
De 1 a 5 años.	0	0,0%
De 5 a 10 años.	0	0,0%
De 10 a 20 años.	0	0,0%
De 20 a 30 años.	0	0,0%
De 30 a 40 años.	6	100,0%
De 40 a 50 años.	0	0,0%
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>	<b>100,0%</b>



*Figura 12. Resultados de la encuesta, pregunta 1.*

## ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

De acuerdo a los datos obtenidos, se puede apreciar que el 100% de los encuestados afirman que el tiempo de operación de la central hidroeléctrica está entre 30 y 40 años, motivo por el cual la central hidroeléctrica ha superado la mitad de su vida de operación lo cual requiere realizar un plan de mantenimiento predictivo hacia los grupos de generación, en nuestro caso se realizaría el análisis de vibraciones mecánicas a cada grupo de generación.

### PREGUNTA 2:

- ¿Conoce usted el tiempo de vida útil de una central de generación hidroeléctrica Illuchi II?

**Tabla 4**

*Tiempo de vida útil de una central hidroeléctrica.*

AÑOS	FRECUENCIA	PORCETAJE
15 años.	0	0,00%
30 años.	0	0,00%
50 años.	4	66,67%
60 años.	2	33,33%
80 años.	0	0,00%

CONTINUA



<b>TOTAL</b>	6	100,00%
--------------	---	---------



*Figura 13.* Resultados de la encuesta, pregunta 2.

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:**

El 66,67% de los encuestados menciona que el tiempo de operación es de 50 años mientras que el 33,33% se inclina por 60 años de operación de una central hidroeléctrica, debido a éste resultado se ve la necesidad de realizar un monitoreo de vibraciones mecánicas a los grupos de generación para controlar su estado de funcionamiento debido a que han sobrepasados la media de su tiempo de operación.

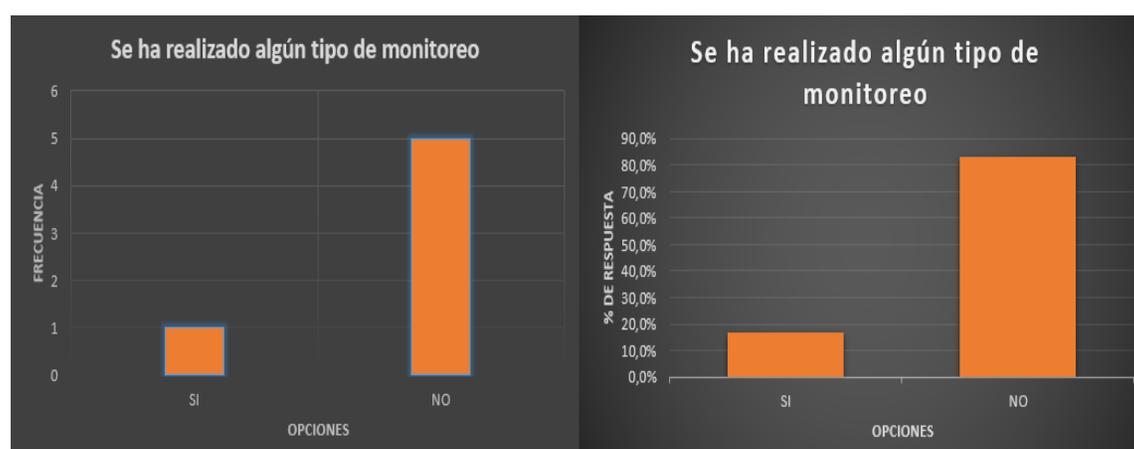
### **PREGUNTA 3:**

- ¿Se ha realizado algún tipo de monitoreo o mantenimiento de vibraciones mecánicas a los grupos de generación de la central hidroeléctrica Illuchi II durante su tiempo de operación?

**Tabla 5**

*Frecuencia con las que se realiza mantenimientos.*

OPCION	FRECUENCIA	PORCENTAJE
SI	1	16,7%
NO	5	83,3%
TOTAL	6	100,0%



*Figura 14. Resultados de la encuesta, pregunta 3.*

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:**

El 83,3% afirma que nunca se ha realizado un mantenimiento predictivo sobre vibraciones mecánicas a los generadores, pero el 16,7% menciona que, si se ha realizado mantenimientos, pero han sido chequeos de rutina como el cambio de bandas, engrasar los rodamientos tanto en la turbina como el cojinete.

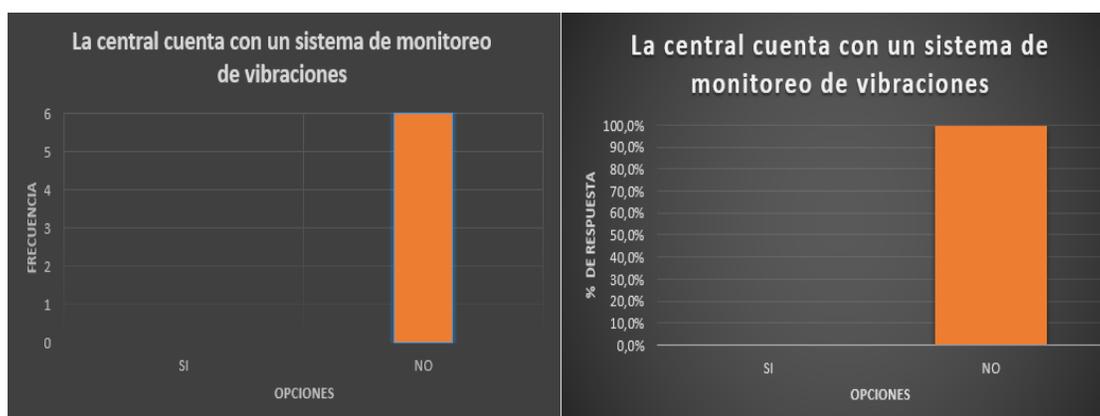
**PREGUNTA 4:**

- ¿La central hidroeléctrica Illuchi II actualmente cuenta con un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas para los grupos de generación?

**Tabla 6**

*La central cuenta con un sistema de monitoreo.*

OPCION	FRECUENCIA	PORCENTAJE
SI	0	0,0%
NO	6	100,0%
TOTAL	6	100,0%



*Figura 15. Resultados de la encuesta, pregunta 4.*

## ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:

El 100% menciona que no se cuenta con un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en la central hidroeléctrica, ya que en todos los chequeos que se han realizado años atrás no se ha podido verificar ese tipo de daños ya que nunca se ha contado con un equipo apropiado para dicho análisis, motivo por el cual en la actualidad no se tiene un diagnóstico adecuado para saber el estado de los generadores con respecto a las vibraciones mecánicas que generan cada grupo.

### PREGUNTA 5:

- ¿Actualmente se efectúa algún tipo de control de vibraciones mecánicas a los grupos de generación de la central hidroeléctrica Illuchi II?

**Tabla 7**

*Se realiza un control de vibraciones.*

OPCION	FRECUENCIA	PORCENTAJE
SI	0	0,0%
NO	6	100,0%
TOTAL	6	100,0%



Figura 16. Resultados de la encuesta, pregunta 5.

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:

El 100% asegura que en la actualidad no se realiza ningún tipo de control o monitoreo de vibraciones a los grupos de generación, motivo por el cual no saben el estado en el que se encuentren los generadores en relación a su tiempo de operación.

### PREGUNTA 6:

- ¿Qué tipo de causas conoce usted que ocasionen vibraciones en una máquina rotativa?

**Tabla 8**

*Causas que generan las vibraciones.*

CAUSAS	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Desequilibrio de elementos rotativos.	5	83,3%

CONTINUA



<b>Desalineación en acoplamientos.</b>	4	66,7%
<b>Engranajes desgastados o dañados.</b>	4	66,7%
<b>Rodamientos deteriorados.</b>	3	50,0%
<b>Fuerzas aerodinámicas o hidráulicas.</b>	5	83,3%
<b>Problemas eléctricos.</b>	1	16,7%
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>	<b>100,0%</b>



Figura 17. Resultados de la encuesta, pregunta 6.

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:

El 83,3% menciona que las vibraciones son causadas por un desequilibrio de elementos rotativos y por fuerzas aerodinámica o hidráulicas, el 66,7% dice que las

causas para que exista una vibración en los generadores es por la desalineación en acoples y engranajes desgastados, un 50% piensa que se debe al deterioro de los rodamientos, mientras que un 16,7% menciona que se debe a problemas eléctricos, en general todas estas causas pueden ocasionar una falla mecánica en los generadores en especial las vibraciones, ya que están los generadores expuestos a diversos tipos de materiales y partículas que puede producir cualquier daño a sus componentes lo que provocará una falla mecánica.

#### **PREGUNTA 7:**

- ¿Qué causas más comunes pueden existir de fallas en los rodamientos para los grupos de generación?

**Tabla 9**

*Causas por las que existen fallas en los rodamientos.*

CAUSAS	FRECUENCIA	PORCENTAJE
<b>Carga excesiva</b>	4	66,67%
<b>Falta de alineamiento</b>	5	83,33%
<b>Montaje defectuoso</b>	2	33,33%
<b>Ajuste incorrecto</b>	6	100,00%
<b>Lubricación inadecuada o incorrecta</b>	4	66,67%

CONTINUA



<b>Sellado deficiente</b>	1	16,67%
<b>Falsa brinelación (Deformación bajo carga)</b>	0	0,00%
<b>TOTAL</b>	6	100,00%



*Figura 18.* Resultados de la encuesta, pregunta 7.

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:**

El 100% asegura que una de las causas más comunes para que exista una falla mecánica en los rodamientos es por el ajuste incorrecto de cada uno de sus elementos ya que las vibraciones ocasionan un desajuste y conlleva a su desgaste y/o ruptura, un 83,33% menciona que se debe a una falta de alineamiento, todo esto se debe realizar en un mantenimiento predictivo, pero por no disponer de un sistema de monitoreo no se puede realizar dicho mantenimiento, el 66,67% dice que se debe a una carga excesiva

y una lubricación inadecuada de los rodamientos ya que con la fricción que se genera a largo plazo conlleva a un desgaste, el 33,33% se debe al montaje defectuoso que se puede haber realizado al momento de realizar la sustitución de los rodamientos ya defectuosos y un 16,67% menciona que es por un sellado deficiente debido a que al momento de realizar el mantenimiento no se tomó precauciones de hacer un sellado óptimo.

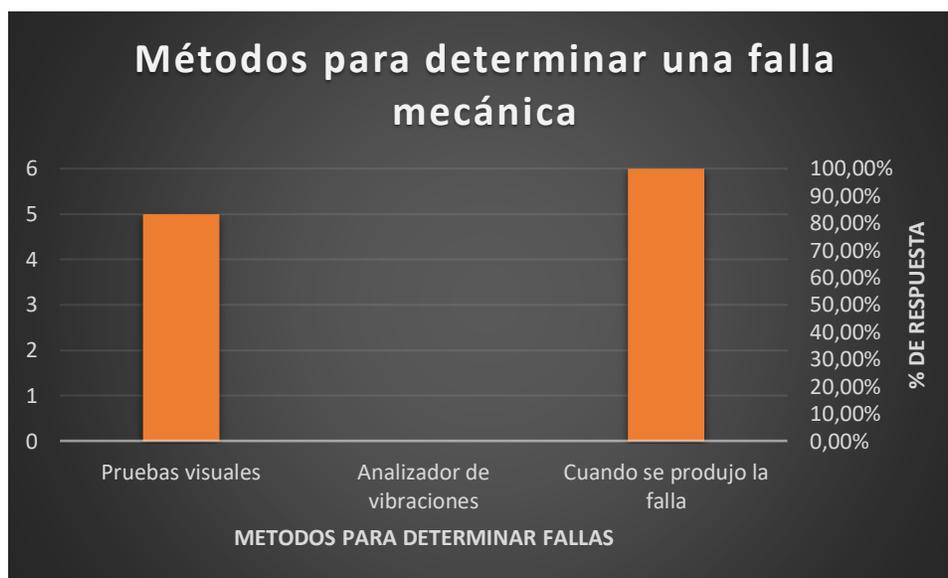
### **PREGUNTA 8:**

- ¿Cómo determina usted una falla de vibración en los grupos de generación de la central hidroeléctrica Illuchi II?

**Tabla 10**

*Métodos para determinar una falla debido a la vibración.*

<b>DETERMINACION DE FALLAS</b>	<b>FRECUENCIA</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<b>Pruebas visuales</b>	5	83%
<b>Analizador de vibraciones</b>	0	0%
<b>Cuando se produjo la falla</b>	6	100%
<b>TOTAL</b>	6	100%



*Figura 19.* Resultados de la encuesta, pregunta 8.

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:**

El 100% de los operadores determinan un daño mecánico por vibración cuando se produce la falla ya sea desbalance del eje o golpes fuertes en el eje del generador, es un método empírico ya que no disponen de un sistema de monitoreo o un equipo adecuado el cual les permita tener un monitoreo en tiempo real del estado del generador, de igual manera el 83% detecta una falla mediante pruebas visuales, con este método solo se puede determinar cuando exista un daño excesivo, es decir cuando es muy evidente la vibración y ya no se puede realizar un mantenimiento predictivo sino más bien realizar la sustitución del elemento defectuoso.

### **PREGUNTA 9:**

- ¿Qué tipo de mantenimiento se ha realizado a los grupos de generación?

Tabla 11

*Tipos de mantenimientos.*

TIPOS DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Mantenimiento predictivo	4	67%
Mantenimiento preventivo	6	100%
Mantenimiento correctivo	6	100%
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>	<b>100%</b>



*Figura 20. Resultados de la encuesta, pregunta 9.*

## ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:

El 100% menciona que se ha realizado un mantenimiento preventivo y correctivo a los grupos de generación, pero han sido reparaciones leves como el cambio de bandas, mangueras de lubricación, rodamientos y el 67% dice que se ha realizado un mantenimiento predictivo en lo que se refiere al control de presiones, temperaturas y niveles del agua, pero nunca se ha realizado un análisis de vibraciones mecánicas.

### PREGUNTA 10:

- Durante el mantenimiento realizado a los grupos de generación. ¿Qué elementos se ha reemplazado?

**Tabla 12**

*Elementos del generador.*

ELEMENTOS DEL GENERADOR	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Bandas	4	67%
Rodamientos	2	33%
Cojinetes	4	67%
Álabes de la turbina	0	0%
Turbina	5	83%

CONTINUA



<b>Sistema de lubricación</b>	2	33%
<b>Eje del generador</b>	0	0%
<b>Cañerías</b>	3	50%
<b>TOTAL</b>	6	100%

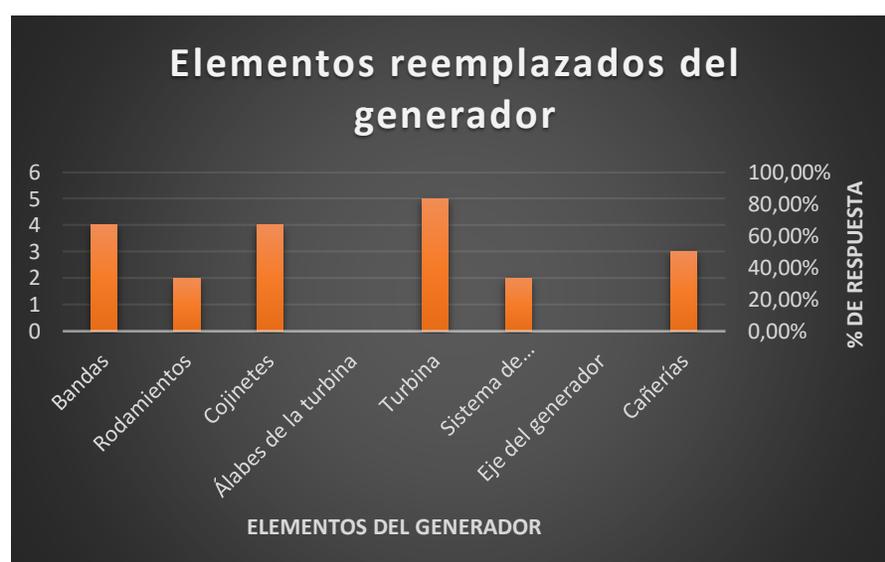


Figura 21. Resultados de la encuesta, pregunta 10.

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN:

El 83% comenta que por partículas sólidas (piedras, palos, etc.), se han visto en la necesidad de reemplazar la turbina (PELTON) de los generadores, ya que los alabes de las turbinas se llegan a romper con el golpe de las partículas que vienen en el agua, el 67% dice que se han reemplazado las bandas y los cojinetes, debido a que con el tiempo se llegan a desgastar y se produce la ruptura de dicho elemento, mientras que el

50% menciona que se han tenido que cambiar las cañerías ya que con los años se empiezan a desgastar y trizar y esto conlleva a que exista fugas de líquidos y el 33% comenta que se han reemplazado los rodamientos y el sistema de lubricación, éstos de igual forma porque han llegado al límite de su vida útil y fue necesario la sustitución de estos elementos.

## **CAPITULO V**

### **PROPUESTA**

#### **5.1. Datos informativos**

##### **5.1.1. Tema de la Propuesta**

Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en el sistema SCADA de los grupos de generación hidroeléctrica en la central Illuchi II de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A.

##### **5.1.2. Nombre de la empresa**

Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A.

##### **5.1.3. Localización**

Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Marqués de Maenza 5-44 y Av. Quijano y Ordoñez, Central Hidroeléctrica Illuchi II.

#### **5.2. Antecedentes de la propuesta**

La Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A. tiene como visión “Constituirse en una Empresa Líder del sector eléctrico de distribución del país, reconocida, distinguida y renombrada por su excelencia, que garantiza un servicio de energía eléctrica a los sectores, residencial, comercial y industrial con calidad y eficiencia sostenibles” (ELEPCO S.A., 2014), tomando en cuenta esta visión se resolvió la implementación de un sistema de monitoreo continuo de vibraciones mecánicas para los grupos de

generación de la central hidroeléctrica Illuchi II, lo que permite tener un oportuno control de situaciones que alteren el normal funcionamiento de la máquina y la continuidad del proceso.

La propuesta pretende el diseño y construcción de un sistema de monitoreo continuo y adquisición de datos que permita obtener parámetros de vibración mecánica presentes en los grupos de generación de la central, logrando obtener señales proporcionales al nivel de vibración de velocidad general. Dichas señales serán registradas y almacenadas en una base de datos a partir del estudio de las vibraciones mecánicas, el mismo que será usado como referencia para la aplicación del mantenimiento predictivo a ser aplicado en los grupos de generación de la central.

### **5.3. Justificación**

Los antecedentes mencionados denotan la necesidad de implementar en la central un sistema capaz de monitorear continuamente las vibraciones mecánicas presentes en los grupos de generación, y que permita establecer una clara condición de operabilidad de la máquina.

Con el sistema de monitoreo continuo de vibraciones mecánicas se asegura tener un oportuno control de situaciones que alteren la operabilidad de la máquina y la continuidad de los procesos, ya que, mediante un computador conectado al sistema de adquisición de datos permitirá visualizar los niveles inferiores y superiores de la señal y tiempos en los cuales se presente los puntos críticos en el mismo; todos estos datos contrastados junto con la norma ISO 10816 permitirá determinar el estado de operación

actual de la máquina, lo que servirá para realizar un mantenimiento predictivo a tiempo; todo esto se verá reflejado en la reducción de costos por: mantenimiento, reparaciones mayores, o en el peor de los casos paros de producción, además de aumentar la seguridad tanto del personal, de los equipos y de la planta en general.

#### **5.4. Objetivos**

- Construir el equipo analizador de vibraciones que será instalado en cada uno de los grupos de generación hidroeléctrica en la central Illuchi II.
- Implementar un sistema que permita el monitoreo y toma de datos en tiempo real del nivel de vibración de velocidad general en el cojinete (turbina-generador) para los ejes axial y radial.
- Presentar en un panel de visualización las gráficas y su historial de registro utilizando el software LabVIEW, donde quedan registrados aquellos eventos de funcionamiento a condiciones normales y de falla, entre otros.
- Analizar las señales gráficas proporcionales al nivel de vibración de velocidad general obtenidas en tiempo real, aplicando la norma ISO 10816, por mediciones en partes no giratorias para conjuntos de máquinas en plantas de generación y bombeo de energía hidráulica.
- Crear un registro histórico de valores RMS proporcionales al nivel de vibración de velocidad general, el mismo que se almacenará automáticamente y permitirá ser exportable en archivo de extensión (.xlsx).

## **5.5. Fundamentación propuesta**

La propuesta aquí mencionada se realiza en referencia a la implementación de un sistema de monitoreo continuo de vibraciones mecánicas presentes en los grupos de generación, nacida por la necesidad del departamento de generación de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A., para la implementación de un plan de mantenimiento predictivo, a partir de un sistema de adquisición de datos que permita obtener y analizar señales proporcionales al nivel de vibración de velocidad general, para su posterior análisis y contraste en conjunto con la norma ISO 10816, permitiendo conocer el estado actual de operabilidad de la máquina.

Los inicios del proyecto estarán basados en el dimensionamiento y selección de los acelerómetros y ADC, seguido por un diseño y calibración de los acondicionadores de señal, y la programación de interfaz en LabVIEW.

## **5.6. Diseño de la propuesta**

### **5.6.1. Pasos de diseño del sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas.**

- Selección del acelerómetro
- Selección de ADC
- Sistema acondicionador de señal
- Interfaz

Para el sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas se emplearon equipos, elementos eléctricos y electrónicos, como son los acelerómetros marca WILCOXON

serie PC420VR con salida de 4 a 20 mA proporcional al nivel de vibración de velocidad general, convertidores de corriente a voltaje, fuentes de alimentación, ADC se detalla las conexiones en la figura 32, allí se puede identificar con gran claridad los elementos que intervienen y esquema eléctrico empleado, para lograr el proceso de adquirir, validar, y visualizar los datos.

En la figura 33 se detalla los pines del ADC (PLC CONTROLLINO MAXI) usados para leer las señales análogas; además en las figuras (34-40) se muestra la programación implementada, para lograr la interfaz con el usuario.

## **5.7. Metodología para ejecutar la propuesta**

### **5.7.1. Selección del acelerómetro y ADC**

Para la selección del acelerómetro y el ADC se empleó una tabla comparativa de datos técnicos y de costos, lo que permitió decidir entre las opciones que más se pegan a las necesidades que exigía la implementación de este proyecto, alcanzando un punto de equilibrio entre eficiencia – eficacia.

#### **¿Qué tipo de acelerómetro otorga mayor precisión y rango de operación para la medición de las señales generadas?**

En este caso se han seleccionado dos de los sensores de movimiento más utilizados en la actualidad en el campo del análisis de vibraciones mecánicas y que se encuentran fácilmente en el mercado como son:

**Tabla 13**

*Sensor de 4 – 20 mA PC420VR P-10.*

	Señal de salida	4 – 20 mA
	Unidad de medida	IPS – mm/seg
	Elemento de diseño	Piezoeléctrico
	Rango de escala yy	1.0 IPS – 25.4 mm/seg
	Respuesta de frecuencia	± 10% 10Hz – 1.0 kHz ± 3dB 4.0Hz – 2.0 kHz
	Salida del conector	2 pines, MIL – C – 5015
	Orientación del conector	salida superior
	Rango de temperatura	-40°C a +85°C
	Peso	162 gr
	Precio	\$ 254,23



Fuente: (WILCOXON (LPS), 2015)

Tabla 14

Sensor IEPE 780A.

	Señal de salida	IEPE
	Unidad de medida	mV/g – mV/m/seg <sup>2</sup>
	Elemento de diseño	Piezoeléctrico
	Rango de escala	80 g pico – 784 m/seg <sup>2</sup>
	Respuesta frecuencia	± 5% 180 – 300,000 RPM
		± 10% 60 – 540,000 RPM
		± 3dB 30 – 840,000 RPM
	Salida del conector	2 pines, MIL – C – 5015
	Orientación del conector	Salida superior
	Rango de temperatura	-50°C a +120°C
	Peso	62 gr
Precio	\$ 992,57	

Fuente: (WILCOXON, 2014)

**Tabla 15***Criterios de ponderación.*

Criterio de ponderación	Sensor 4 – 20 mA	Sensor IEPE 780A
	PC420VR P-10	
Alto (3) Medio (2) Bajo (1)		
<b>Señal de salida</b>	3	3
<b>Unidad de medida</b>	3	1
<b>Elemento de diseño</b>	3	3
<b>Rango de escala</b>	2	1
<b>Respuesta frecuencia</b>	3	3
<b>Salida del conector</b>	3	3
<b>Orientación del conector</b>	3	3
<b>Rango de temperatura</b>	2	2
<b>Peso</b>	2	3
<b>Precio</b>	3	1
<b>PROMEDIO</b>	2,7	1,9

**Conclusión:** Mediante el cuadro de ponderaciones se determina que el sensor de 4 a 20 mA PC420VR P-10 es el adecuado ya que presenta características de

funcionamiento más idóneas para el proyecto a implementar, entre ellas se puede mencionar que la señal de salida se mide en un valor RMS de corriente entre 4 a 20 mA proporcional a la velocidad de vibración general, permitiendo mayor facilidad en el manejo e interpretación de los mediciones obtenidas tal como lo recomienda la norma ISO 10618 lo que incluso mejorará la comunicación con el PLC, además de que su costo es mucho más asequible comparado con el sensor IEPE 780A.

**¿Cuál será el equipo ADC o viceversa que proporcione un rango de operación adecuado para la obtención de las señales generadas?**

Se seleccionó un PLC y una tarjeta de adquisición de datos más utilizados en la actualidad en el campo del control y medición industria, como son:

**Tabla 16**

*PLC CONTROLLINO MAXI.*

	<b>Alimentación</b>	<b>12 – 24 V</b>
	Rango de temperatura	0 ° C a 55° C
	Señal IEPE	NO
	Altitud	2000 msnm
	Grado de contaminación	2
	Respuesta de choque	15 g, 11 ms

CONTINUA



	Precio	\$ 327.63
--	--------	-----------

Fuente: (Controllino, 2015)

### Tabla 17

Tarjeta de adquisición de datos NI-9234 Series C.

	<b>Alimentación</b>	<b>30 V</b>
	Rango de temperatura	-40° C a 70° C
	Señal IEPE	SI
	Altitud	5000 msnm
	Grado de contaminación	2
	Respuesta de choque	30 g, 11 ms
	Precio	\$ 3890,66

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016)

### Tabla 18

Criterios de ponderación.

Criterio de ponderación	PLC	Tarjeta de adquisición de datos NI-
Alto (3) Medio (2) Bajo (1)	CONTROLLINO MAXI	9234 Series C
<b>Alimentación</b>	3	1

<b>Rango de temperatura</b>	2	2
<b>Señal IEPE</b>	1	3
<b>Altitud</b>	3	1
<b>Grado de contaminación</b>	2	2
<b>Respuesta de choque</b>	2	3
<b>Precio</b>	3	1
<b>PROMEDIO</b>	2,29	1,86

**Conclusión:** Mediante el cuadro de ponderaciones se determina que el PLC CONTROLLINO MAXI es el adecuado ya que presenta características de funcionamiento más idóneas para el proyecto a implementar, entre ellas se puede mencionar que es el que mejor se acopla a las características de señal de salida del sensor PC420VR P-10 y la rapidez de respuesta es suficiente para medir el nivel de vibración de velocidad general, por lo que la otra opción es sobredimensionada para esta implementación y requeriría escoger otro tipo de sensor, adicionalmente se debe indicar que no hay temperaturas de entorno y operación muy elevadas ni muy bajas, tampoco es necesario tener una respuesta de choque elevada puesto que son generadores de potencia media y su costo es mucho más asequible comparado con el de la tarjeta de adquisición de datos NI-9234 Series C.

### 5.7.2. Categorización de los grupos de generación hidroeléctrica de la central Illuchi II, según la NORMA ISO 10816.

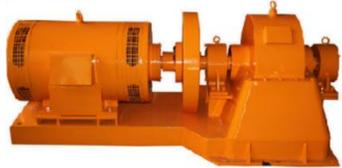
La recopilación de información de campo es fundamental antes de cualquier tipo de análisis, para esto además es necesario tener muy en claro los conceptos y fenómenos presentes en la vibración mecánica, lo que asegura un correcto análisis y su posterior diagnóstico.

La inspección visual y manual son obligatorias al momento de determinar el tipo de categoría en la que es considerada una máquina industrial; la central Illuchi II cuenta con dos grupos generadores, los cuales a continuación detallaremos sus datos técnicos.

**Tabla 19**

*Datos técnicos de los grupos de generación 1 y 2.*

CENTRAL HIDROELECTRICA ILLUCHI II	
DATOS TECNICOS GRUPOS DE GENERACION 1 Y 2	
CARACTERISTICAS	GENERADOR
<b>Año</b>	1.979
<b>No. De fábrica</b>	2.080
<b>Potencia</b>	2.848 kW
<b>Velocidad</b>	720 rpm



CONTINUA



Velocidad de embalam.	1.320 rpm
Altura piso – eje “H”	530 mm
Diámetro eje	320 mm



*Figura 22.* Dimensiones con respecto al eje de medición.

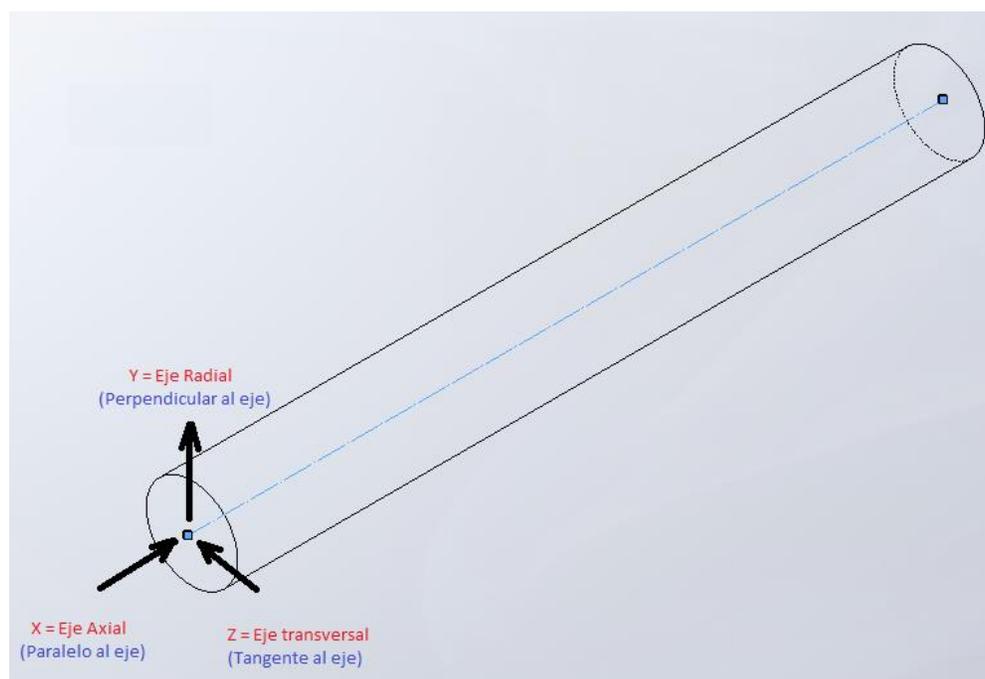
Las diferencias significativas en el diseño y la disposición de los conjuntos de máquina hidráulica requieren una separación en cuatro grupos principales con respecto a la rigidez del cojinete radial. Tomando en cuenta estos aspectos y los datos técnicos mostrados en la tabla 19, se determina que los grupos de generación pertenecientes a la central se asientan en la categoría del Grupo 1 que indica “los conjuntos de máquina horizontales con pedestal o cojinetes de extremo montado sobre una base rígida, generalmente con velocidades operacionales de más de 300 RPM (ver ANEXO A).

### 5.7.3. Selección de los puntos para medir la vibración

Las localizaciones o puntos para la medición tienen que estar lo más cercano al elemento que se desea monitorear, adicional es necesario que estén asentadas en estructuras sólidas permitiendo que las vibraciones lleguen hasta el sensor sin sufrir las influencias externas, ya que esto podría provocar que la señal transmitida muestre problemas falsos. Nunca se debe escoger como punto de medición a carcasas externas, tapas, guardas, etc., los puntos que pueden brindar más información son aquellos que se encuentran más cerca de los rodamientos de la máquina.

Para máquinas horizontales, los ejes de orientación son:

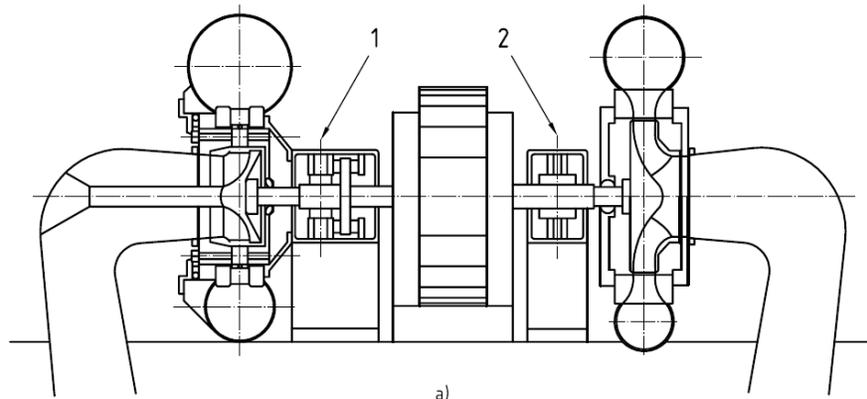
- X = Axial = Paralelo al eje de la máquina
- Y = Radial = Vertical
- Z = Tangencial = Horizontal



*Figura 23.* Orientación de los ejes en una máquina horizontal.

**a) Determinación de los puntos de medición para máquinas horizontales pertenecientes al Grupo 1.**

Es conveniente normalizar la manera de nombrar las posiciones de los apoyos a medir en una máquina, para un grupo de generación hidroeléctrica según lo indica la norma ISO 10816 en la cual este proyecto de investigación toma como única referencia a lo largo del mismo, lo recomendable es realizar la medición en los matrimonios turbina – eje y eje – generador, esto dependerá mucho de la longitud de la máquina hidroeléctrica donde se realizará la medición, para ello sería necesario la colocación de un sensor en cada posición tal como se indica en la figura 24.



*Figura 24. Máquina horizontal con cojinete de pedestal.*

Fuente: (AENOR, 2017)

Los grupos de generación hidroeléctrica de la central Illuchi II perteneciente a ELEPCO S.A., son el lugar donde se realiza el análisis de vibraciones mecánicas, estos grupos poseen una turbina recubierta por una carcasa que recubren tanto los alabes como el matrimonio turbina – eje, con lo que imposibilita realizar una medición en este punto. Por ello únicamente se colocará un sensor con base magnética en la carcasa del matrimonio eje – generador (cojinete). Cabe recalcar que la distancia del eje de acople entre turbina y generador no excede los 100 centímetros de distancia, por lo que la medida en un solo punto es suficiente para dar un análisis de vibración exacta.



*Figura 25. Ubicación del punto de medición en los ejes.*

**b) Ubicación de los ejes medición en cojinetes de pedestal**

En la figura 26, se puede observar la ubicación de los puntos de medición y la dirección de los ejes en los que según la norma ISO 10816 recomienda para la medición de vibraciones mecánicas aplicables en máquinas horizontales, es decir, los puntos de señalización “X”, “Y”, referentes a los ejes Axial, Radial respectivamente, son las dos únicas direcciones necesarias para la colocación de los sensores sobre el cojinete y su adquisición de datos. (AENOR, 2017)

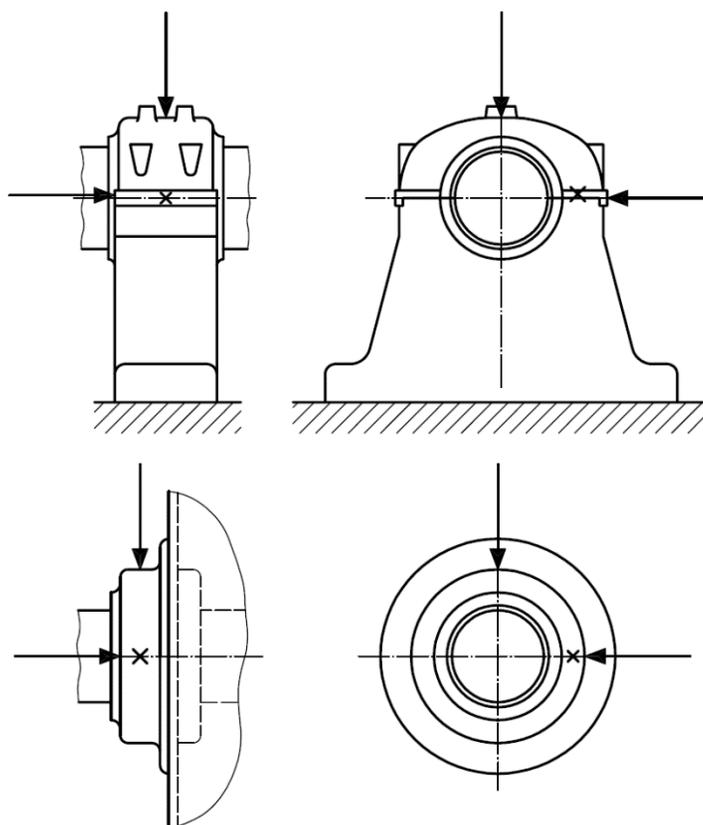


Figura 26. Ubicación de los ejes medición en cojinetes.

Fuente: (AENOR, 2017)

### c) Selección y fijación del acelerómetro

Una vez se tiene claro el número de puntos y ejes de ubicación, es necesario tener en cuenta el tipo de sensor que más se acopla a las exigencias que demanda el proyecto y el fin que se pretende darle. El mercado actual presenta una amplia variedad de acelerómetros tanto para ejes como en el tipo de señal de salida, para este caso puntual según lo señala la norma ISO 10816 es suficiente usar un sensor biaxial o un sensor uniaxial ubicado en cada eje de medición; con la finalidad de realizar un

proyecto de investigación dinámico, innovador, de fácil operación y comodidad se optó por la opción de usar un sensor uniaxial (para cada grupo de generación) con base de montaje magnética, especificada por el fabricante las mismas que permiten adherirse sobre la superficie limpia y plana de la máquina, permitiendo al operador montarlo y desmontarlo de forma rápida y práctica.

Cabe indicar que no es necesario que los puntos de señalización para cada eje sean colocados en el mismo punto ni que tengan la misma orientación como los que se muestran en las figuras (27 y 28), la colocación de los puntos pueden llegar a variar debido a factores como la facilidad de acceso al punto de medida, facilidad de montaje del sensor, comodidad del técnico operador, etc., pero si se recomienda que siempre se debe poner lo más cercano posible a los rodamientos permitiendo obtener una lectura adecuada y asegurarse de que el equipo de adquisición de datos reciba la información correcta sobre la dirección y sentido en la que está actuando el sensor.



*Figura 27.* Ubicación del sensor en el eje "X".



Figura 28. Ubicación del sensor en el eje "Y".

**NOTA:** Para obtener tendencias precisas, es necesario marcar las ubicaciones de medición para asegurarse que las lecturas se tomen en la misma posición durante rangos de tiempo similares.

#### 5.7.4. Criterios de selección de equipos

##### a) Criterios de selección del acelerómetro

#### Tabla 20

Sensor de 4 – 20 mA PC420VR P-10.

SENSOR DE 4 – 20 mA PC420VR P-10

CONTINUA



CARACTERISTICAS	ELEMENTO
Escala completa, 20 mA, $\pm 5\%$	4 – 20 mA
Respuesta de frecuencia:	10 Hz - 1.0 kHz
$\pm 10\% \pm 3$ dB	4.0 Hz - 2.0 kHz
Repetibilidad	$\pm 2\%$
Sensibilidad transversal, max	5%
Requerimientos de potencia, bucle de potencia a 2 hilos:	12 - 30 VDC
Voltaje, entre los pines A y B	
Resistencia de lazo 1 at 24 VDC, max	600 $\Omega$
Tiempo de respuesta, lazo 4-20 mA	30 segundos
Caja de puesta a tierra	Blindada internamente
Rango de temperatura de funcionamiento	-40 a +85° C
Límite de vibración	250 g pico
Límite de choque	2,500 g pico
Sellado	Hermético



CONTINUA



<b>Diseño del elemento sensor</b>	Piezoeléctrico
<b>Peso</b>	162 gramos
<b>Material de carcasa</b>	316L acero inoxidable
<b>Imán de Neodimio MD055</b>	Acople R6W-0- J9T2A-16

Fuente: (Meggitt Sensing Systems, 2014)

## b) Criterios de selección del ADC

**Tabla 21**

*PLC CONTROLLINO MAXI*

PLC CONTROLLINO MAXI		ELEMENTO
CARACTERÍSTICAS		
Tipo de CPU	ATmega2560	
Velocidad del CPU	16 MHz	
Corriente Máxima	20 Amperios	
Soporta RTC	YES	
Interfaz LAN	1x	
Interfaz SERIAL	2x	

CONTINUA



<b>Interfaz RS485</b>	1x
<b>Interfaz SPI</b>	1x
<b>Interfaz I2C</b>	1x
<b>Entradas Digitales</b>	2x (IN0, IN1)
<b>Entradas Análogas</b>	----
<b>Entradas Digitales/Análogas</b>	10x (A0-A9)
<b>Salidas Digitales</b>	12x Interruptor lateral alto – 2A @ 12V or 24V (D0-D11)
<b>Salidas de Relé</b>	10x – 230V / 6A
<b>Salidas Analógicas</b>	12x PWM (D0-D11)

Fuente: (Controllino, 2015)

### c) Criterios de selección convertidor de corriente a voltaje

**Tabla 22**

*Convertidor de corriente a voltaje.*

<b>CONVERTIDOR DE CORRIENTE A VOLTAJE</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS:</b>	<b>ELEMENTO</b>
Soporta entradas de corriente de 4-20 mA, 0-20mA	

CONTINUA



**Soporta salidas de voltaje 0-3.3 V 0-5 V 0-10 V**

**Amplio rango de tensión de alimentación y salida para soportar múltiples rangos**

**Alta estabilidad, buena linealidad, grado industrial**

**Muestreo de alta precisión**

**RANGOS DE TRABAJO:**

**Para el rango 4-20ma: 0-2.5 V: J1 corto entre los pines1,2, y corto entre los pines 3,4**

**Para el rango 0-3.3 V: J1 corto entre los pines1,2, y 3,4 abierto**

**Para el rango 0-5.0 V: J1 corto entre los pines1,2, y corto entre los pines 3,4**

**Para el rango 0-10.0V: J1 corto entre los pines1,2, y 3,4 abierto**

**Para el rango 0-20ma: 0--3.3V: J1 1,2 pies cortos, 3,4 pies en corto**

**Para el rango 0-5.0 V: J1 corto entre los pines1,2, y corto entre los pines 3,4**



**Fuente:** (ARISE, 2013)

## d) Criterios de selección STEP DOWN ARDUINO

Tabla 23

STEP DOWN ARDUINO.

STEP DOWN ARDUINO	
CARACTERÍSTICAS	ELEMENTO
<b>Modulo</b>	LM2596 tipo Buck + Voltímetro
<b>Medidas</b>	66mm x 35mm
<b>Voltaje de entrada</b>	DC 4.0~40V
<b>Output Voltaje</b>	1.25V~37V (ajustable, la tensión de entrada debe ser superior a 3V respecto de la tensión de entrada)
<b>Corriente máxima</b>	2A (normal y estable), 3A Max
<b>Ripple</b>	150Khz
<b>Ripple Peak</b>	100mV
<b>Color del display</b>	Rojo
<b>Error del medidos de voltaje</b>	$\pm 0.1V$
<b>Rango de medición</b>	4~40V (Para mediciones precisas la tensión de entrada debe ser de 4V o más)



CONTINUA



<b>IN+</b>	Entrada Positiva
<b>IN-</b>	Entrada Negativa
<b>Out+</b>	Salida Positiva
<b>Out-</b>	Salida Negativa

e) **Criterios de selección de la fuente AC/DC**

**Tabla 24**

*Fuente AC/DC*

<b>FUENTE FIJA AC/DC DE 12V 5A</b>	
<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>ELEMENTO</b>
<b>DIMENSIONES DEL EMPAQUE</b>	20.7 cm x 10.2 cm x 4.7 cm
<b>PESO DEL EMPAQUE</b>	483 Gramos
<b>VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN</b>	110/220 Vca50/60 Hz
<b>CONSUMO DE POTENCIA</b>	120 Watts
<b>SALIDA DE VOLTAJE</b>	11.5 – 12.5 V
<b>SALIDA DE CORRIENTE</b>	10 Amperios Máximo



CONTINUA



<b>TIPO DE PROTECCIÓN</b>	IP60
<b>DIMENSIONES</b>	145 mm x 62 mm x 43 mm
<b>PESO</b>	255 Gramos
<b>MATERIAL</b>	Carcasa Metálica
<b>TEMPERATURA DE TRABAJO</b>	-10° – 50° Celsius
<b>DESCRIPCIÓN DE SALIDAS</b>	V+ / 12Vcc V+ / 12 Vcc V- / GND V- / GND
<b>DESCRIPCIÓN DE ENTRADAS</b>	L / Entrada de línea “Viva” N / Entrada de Neutro W / Entrada Tierra Física
<b>DIMENSIONES DEL EMPAQUE</b>	20.7 cm x 10.2 cm x 4.7 cm
<b>PESO DEL EMPAQUE</b>	483 Gramos

Fuente: (FULLWAT, 2010)

### 5.7.5. DISEÑO DEL SISTEMA ACONDICIONADOR DE SEÑAL

Las adquisiciones de señales de voltaje son mediante el PLC CONTROLLINO MAXI, es un convertidor analógico/ digital, se conecta vía USB al computador, para que los datos adquiridos posteriormente sean procesados a conveniencia del usuario.

El PLC está diseñado para trabajar con variables de voltaje que acepten los elementos en estado sólido y para protección contra descargas. PLC CONTROLLINO MAXI tiene en sus entradas analógicas que aceptan señales de voltajes, que tiene un rango  $\pm 5Vac$ .

**a) Acondicionamiento de señal**

Todas las etapas de acondicionamiento de señal deben ser compatibles con los voltajes el PLC CONTROLLINO MAXI, para este proceso debe cumplir los siguientes requerimientos:

**b) Tipo de señal compatible con el PLC**

La señal de salida en la etapa de acondicionamiento debe ser voltaje.

**c) Niveles aceptables por el PLC**

La señal en la fase final tiene que ser mayor a  $-5 Vac$  y menor a  $+5 Vac$ , esta debe ser mayores o iguales por normas técnicas de fábrica y además también tiene que ser lo suficientemente pequeñas para probables aumentos en el nivel de voltajes, debidas a perturbaciones provocadas por agentes externos y cumplir con un margen de seguridad.

#### d) Niveles aceptables por el acelerómetro

El mínimo valor de resistencia  $R_L$  para el laso de conexión mostrado en la figura 29, no podrá ser menor a  $10 \Omega$ . (Meggitt Sensing Systems, 2014)

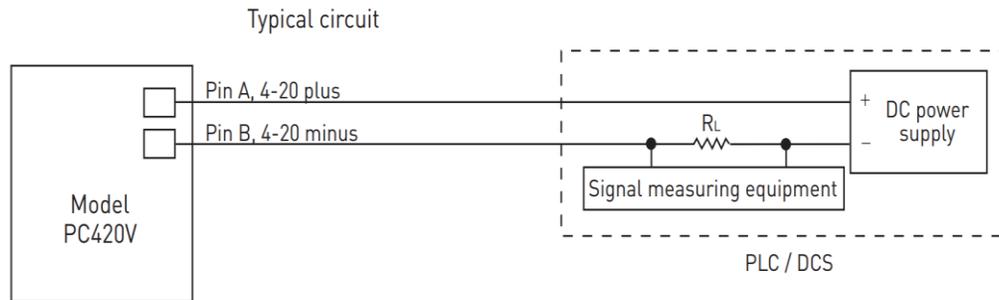


Figura 29. Laso de conexión para el Sensor PC420VR P-10

Fuente: (Meggitt Sensing Systems, 2014)

En la tabla 26 se indica los valores recomendados para  $R_L$ .

**Tabla 25**

*Máximo valor de resistencia del laso.*

DC supply voltage	$R_L$ (max resistance)	$R_L$ (minimun wattage capability)
12 VDC	100 $\Omega$	1/8 Watt
20 VDC	500 $\Omega$	1/4 Watt
24 VDC	700 $\Omega$	1/2 Watt

CONTINUA



<b>26 VDC</b>	800 $\Omega$	1/2 Watt
<b>30 VDC</b>	1.0 K $\Omega$	1/2 Watt

Fuente: (Meggitt Sensing Systems, 2014)

### 5.7.6. Cálculo de la máxima resistencia del laso.

$$R_L = \frac{V_{DCpower} - 10V}{20mA}$$

$$R_L = \frac{12V - 10V}{20mA}$$

$$R_L = 100\Omega$$

### 5.7.7. Calibración de los sensores PC420VR P-10 serie 61405 y serie 61404

Los sensores PC420VR P-10 serie 61405 y serie 61404 adquiridos cuentan con certificación de calibración de fábrica a la fecha 03/29/2018 (ver ANEXO C), en el que garantiza encontrarse dentro de los niveles de tolerancia del  $\pm 5\%$  a escala máxima de corriente de salida para el eje Y.

### 5.7.8. Ajuste de escala máxima de 4 a 20 mA para el eje "Y".

#### a) Cálculos del sensor PC420VR P-10 serie 61405 instalado en el G1

**Tabla 26***Salida en mA.*

Output, mA	
0 mm/sec	25,4 mm/sec
(4 mA)	(20 mA)
<b>3,9</b>	<b>19,4</b>

Fuente: (WILCOXON (CERTIFICACIÓN), 2015)

**Tabla 27***Salida en Voltios.*

Output, V	
0 mm/sec	25,4 mm/sec
(4 mA)	(20 mA)
<b>11</b>	<b>230</b>

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$m = \frac{25.4 - 0}{230 - 11}$$

$$m = 0.1159$$

$$Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

$$Y - 0 = 0.1159(X - 11)$$

$$Y = mX - b$$

$$Y = 0.1159X - 1.2749$$

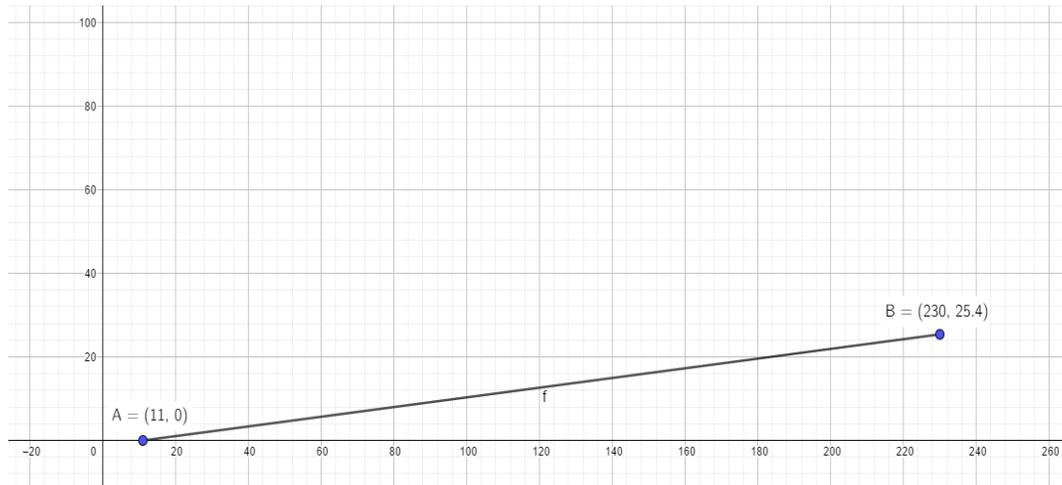


Figura 30. Ecuación de la recta del sensor PC420VR P-10 serie 61405.

**b) Cálculos del sensor PC420VR P-10 serie 61404 instalado en el G2**

**Tabla 28**

Salida en mA.

Output, mA	
0 mm/sec	25,4 mm/sec
(4 mA)	(20 mA)
<b>3,9</b>	<b>19,8</b>

Fuente: (WILCOXON (CERTIFICACIÓN), 2015)

**Tabla 29***Salida en Voltios..*

Output, V	
0 mm/sec	25,4 mm/sec
(4 mA)	(20 mA)
<b>14</b>	<b>240</b>

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$m = \frac{25.4 - 0}{240 - 14}$$

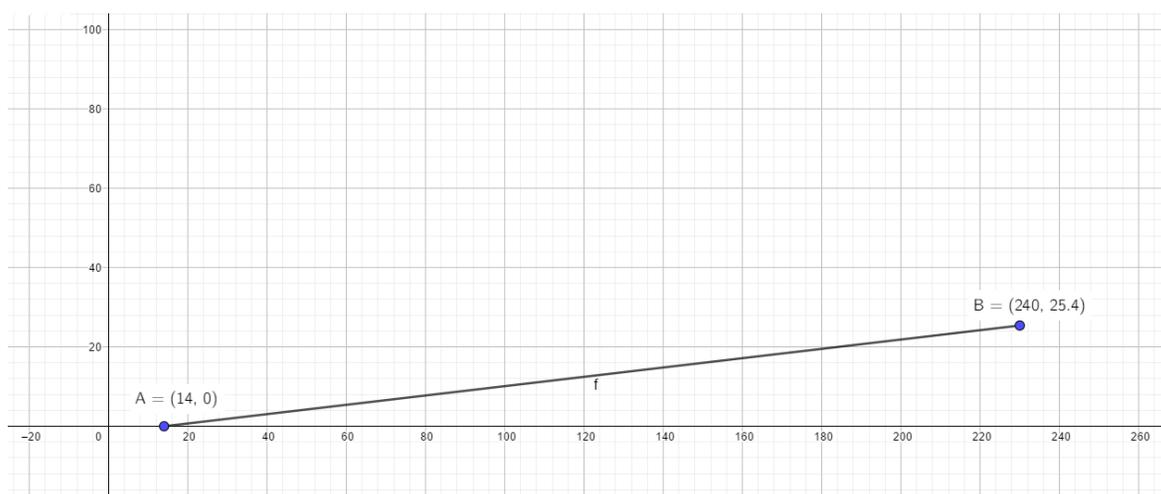
$$m = 0.11238$$

$$Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

$$Y - 0 = 0.11238(X - 14)$$

$$Y = mX - b$$

$$Y = 0.11238X - 1.57332$$



*Figura 31.* Ecuación de la recta del sensor PC420VR P-10 serie 61404.

### 5.7.9. Descripción del diagrama conexión

La entrada de alimentación del sistema está en un rango de 127/120V para AC/DC, como se detalla en la figura 32.

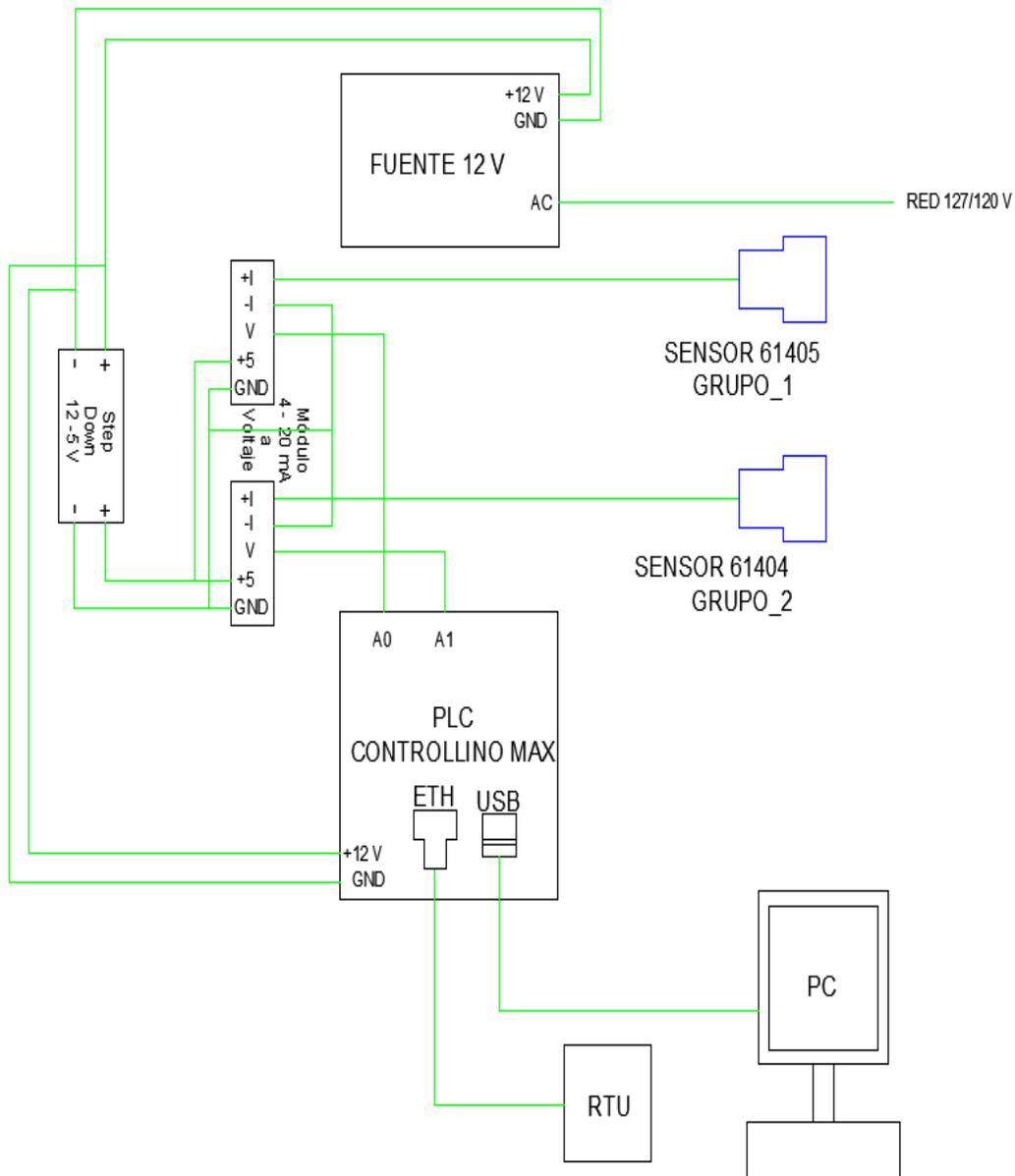


Figura 32. Diagrama de conexión.

- La salida de la fuente de alimentación es de 12 V DC, esta se encarga de alimentar al PLC y STEP DOWN.

- El STEP DOWN es regulado a un valor de salida de voltaje de 5V, el mismo que se encarga de la alimentación de los convertidores de corriente – voltaje, y los acelerómetros de los grupos 1 y 2.
- El sensor PC420VR P-10 serie 61405 conectado en el grupo 1, tiene una señal de salida de 3.9 a 19.4 mA, la cual se conecta a la entrada del módulo 1 de corriente – voltaje, antes de enviar la señal al PLC.
- El sensor PC420VR P-10 serie 61404 conectado en el grupo 2, tiene una señal de salida de 3.9 a 19.8 mA, la cual se conecta a la entrada del módulo 2 de corriente – voltaje, antes de enviar la señal al PLC.
- La señal análoga de voltaje, proveniente del módulo 1 es conectado a la entrada analógica A0 del PLC; lo que permite obtener la señal de nivel de vibración proporcional a la velocidad general del grupo 1.
- La señal análoga de voltaje, proveniente del módulo 2 es conectado a la entrada analógica A1 del PLC; lo que permite obtener la señal de nivel de vibración proporcional a la velocidad general del grupo 2.
- La conexión de interfaz con la PC, se la realiza a través del puerto USB del PLC.
- La conexión al sistema SCADA se la realiza desde el puerto ETHERNET del PLC, con cable de RED categoría 6 hacia la RTU ubicada en el concentrador de datos de la central.

**a) Diagrama de conexión en el PLC para las señales análogas de voltaje**

**Tabla 30***Conexiones análogas del PLC.*

CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL ANALOGA		
<b>Entradas de señal</b>	Nivel lógico "0"	0V -3,6V (Vin = 12V)
		0V-7,2V (Vin = 24V)
	Nivel lógico "1"	9V -13,2V (Vin = 12V)
		18V-26,4V (Vin = 24V)
<b>Corriente de entrada máxima</b>	<3mA	
<b>Rango de voltaje en caso de uso</b>	0 -13,2 V (Vin = 12 V)	
<b>de entrada analógica</b>	0-26,4 V (Vin = 24 V)	

Fuente: (Controllino, 2015)

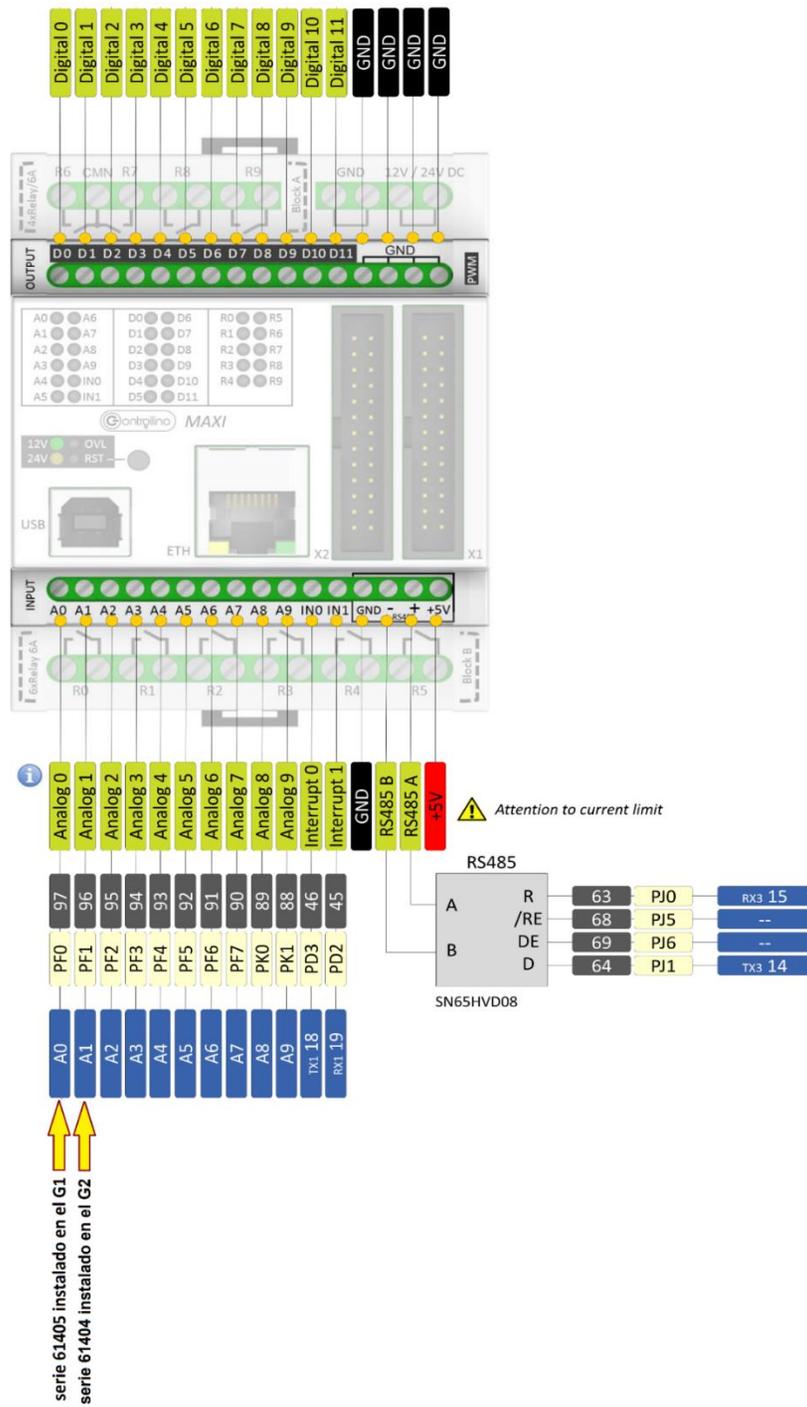


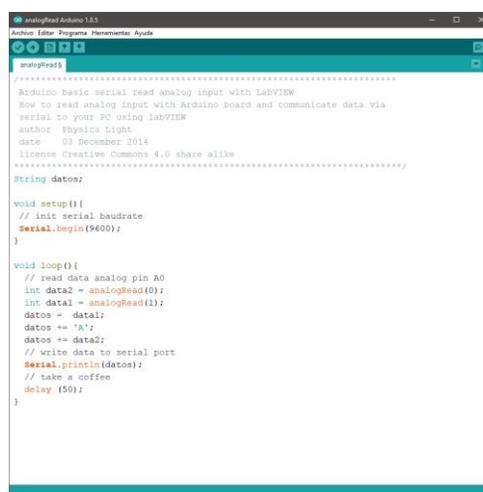
Figura 33. Diagrama de conexión PLC, entradas analógicas.

Fuente: (Controllino, 2015)

### 5.7.10. Programación del PLC

El PLC CONTROLLINO MAXI que se usó para la adquisición de datos, nos ofrece muchos beneficios entre ellos es su compatibilidad con el software analogRead Arduino lo que facilita la comunicación y su programación; convirtiéndolo en la mejor elección para muchos propósitos educativos e industriales.

En la figura 34 se visualiza la programación realizada en el software AnalogRead Arduino, en la que se establece una velocidad de datos en bits por segundo de 9600 con la finalidad de que la transmisión de datos en serie al comunicarse con la PC sea lo más rápido posible; seguido a esto se crea un ciclo repetitivo para la lectura de datos análogos correspondientes a la entrada A0 (acelerómetro conectado al grupo 1) y A1 (acelerómetro conectado al grupo 2), finalmente cada dato registrado se graba y es enviado al puerto serie USB a través del cual se comunica con la PC en la que previamente debe tener instalado LabVIEW.



```
analogRead133
Archivo Editor Programa Herramientas Ayuda
analogRead133
.....
Arduino basic serial read analog input with LabVIEW
How to read analog input with Arduino board and communicate data via
serial to your PC using LabVIEW
author: Physics Light
date: 03 December 2014
license: Creative Commons 4.0 share alike
.....
String datos;

void setup() {
  // init serial baudrate
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // read data analog pin A0
  int data2 = analogRead(A0);
  int data1 = analogRead(A1);
  datos = data1;
  datos += "A1";
  datos += data2;
  // write data to serial port
  Serial.println(datos);
  // take a coffee
  delay(500);
}
```

Figura 34 .Programación de PLC en AnalogRead Arduino.

### 5.7.11. Interfaz

A continuación, se detalla la programación implementada en LabVIEW, la descripción está dada por fase, para la implementación de la interfaz en el presente proyecto.

#### a) Reconocimiento de PLC CONTROLLINO MAXI

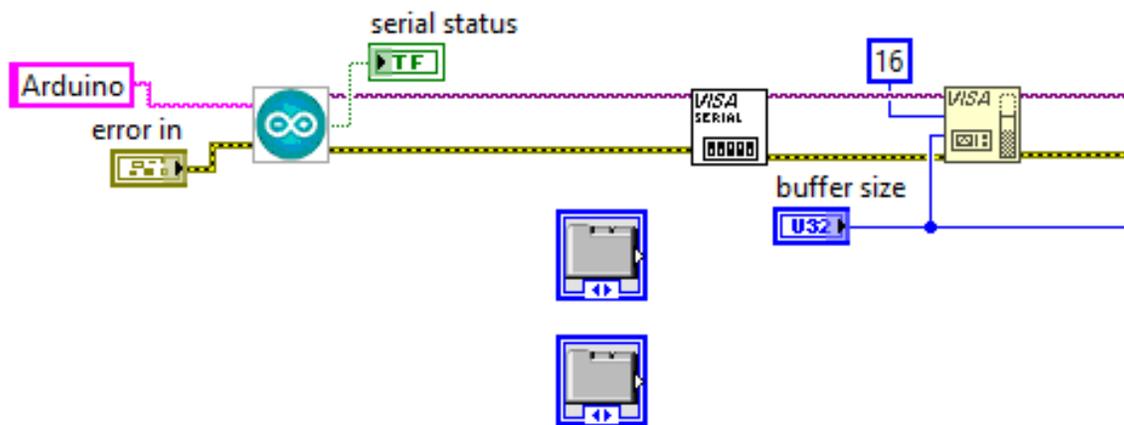


Figura 35. Reconocimiento de PLC CONTROLLINO MAXI.

En la figura 35 nos indica la programación en la interfaz de reconocimiento del PLC CONTROLLINO MAXI y la configuración del puerto serial que sirve para el reconocimiento automático del mismo cuando sea conectado a la PC.

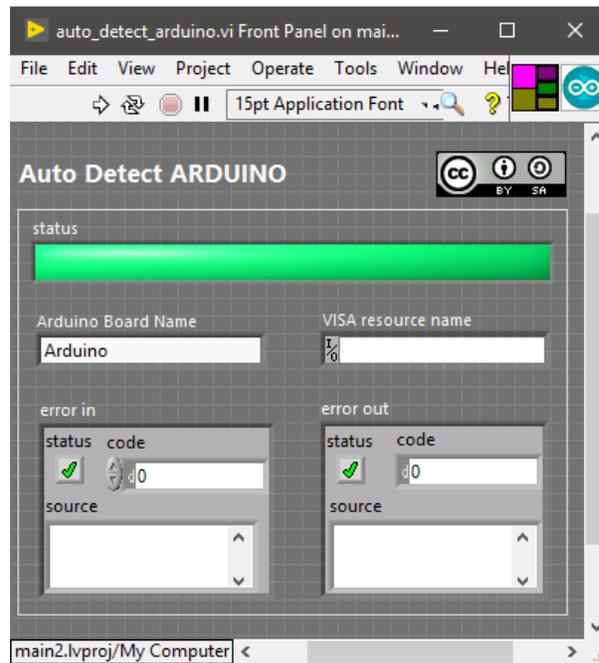


Figura 36. Auto Detected ARDUINO.

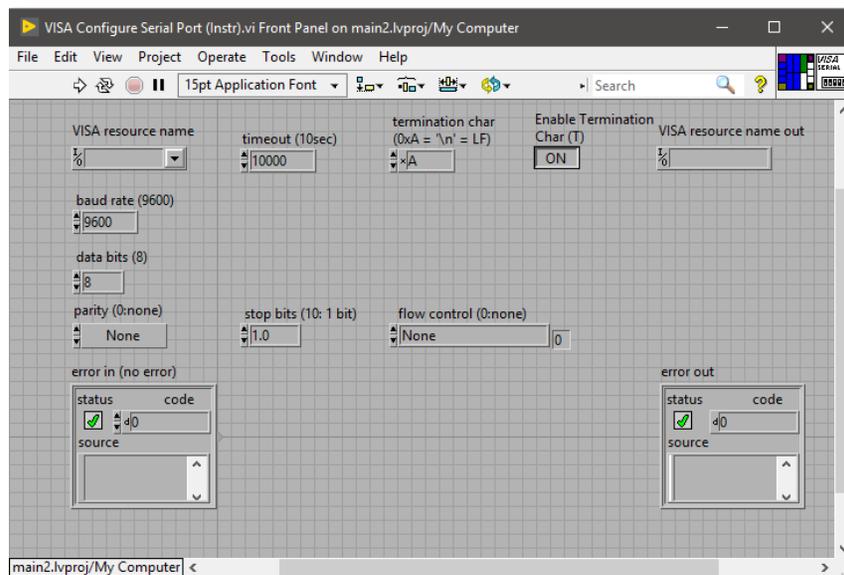


Figura 37. Configuración de puerto serial.

b) Divisor de cadena de bits para grupo 1 y grupo 2

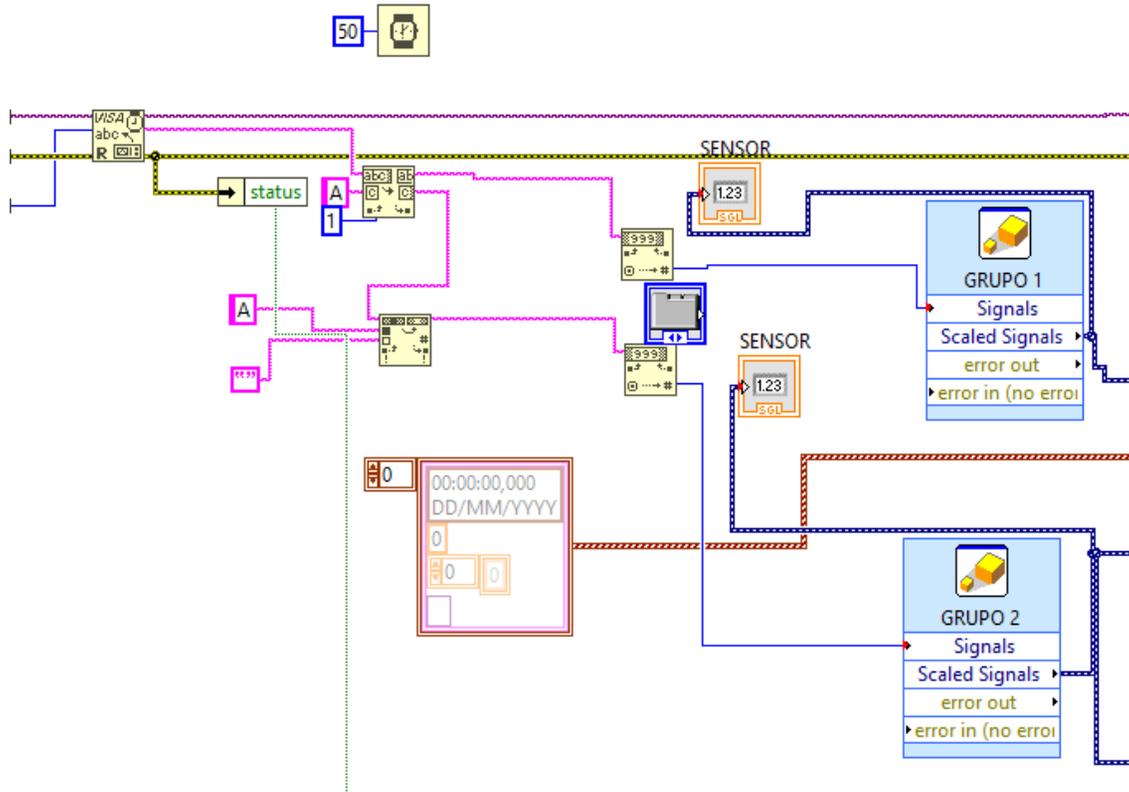
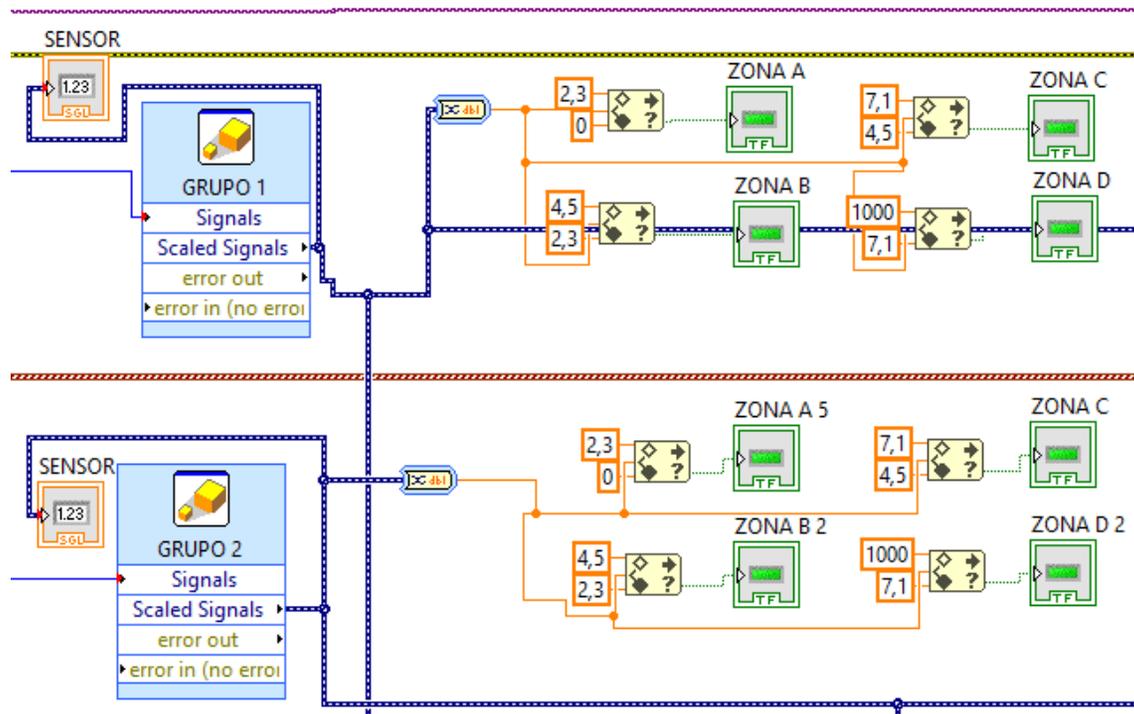


Figura 38. Divisor de cadena de bits.

En la figura 38 se muestra la programación para la lectura de bits y la división de la misma desde el dispositivo o la interfaz especificada antes en "VISA" devolviendo los datos en el búfer de lectura, este proceso es tanto para los datos que se recibirán y enviarán los grupos 1 y 2.

c) **Lectura de señal de los acelerómetros a los grupos 1 y 2.**



*Figura 39.* Lectura de señal acelerómetro – grupo de generación.

En la figura 39 se muestra la programación de la lectura de señal emitida por los acelerómetros hacia cada uno de los grupos de generación 1 y 2, dicha señal es convertida en un valor numérico el mismo que permitirá regular los límites superiores e inferiores para cada una de las zonas críticas (A, B, C, D) según los parámetros descritos en la norma ISO 10816, con esto se busca dinamizar la interfaz con el usuario y permite conocer en qué zona crítica se encuentra la señal medida en ese instante de tiempo.

d) **Base de datos de vibración registrados**

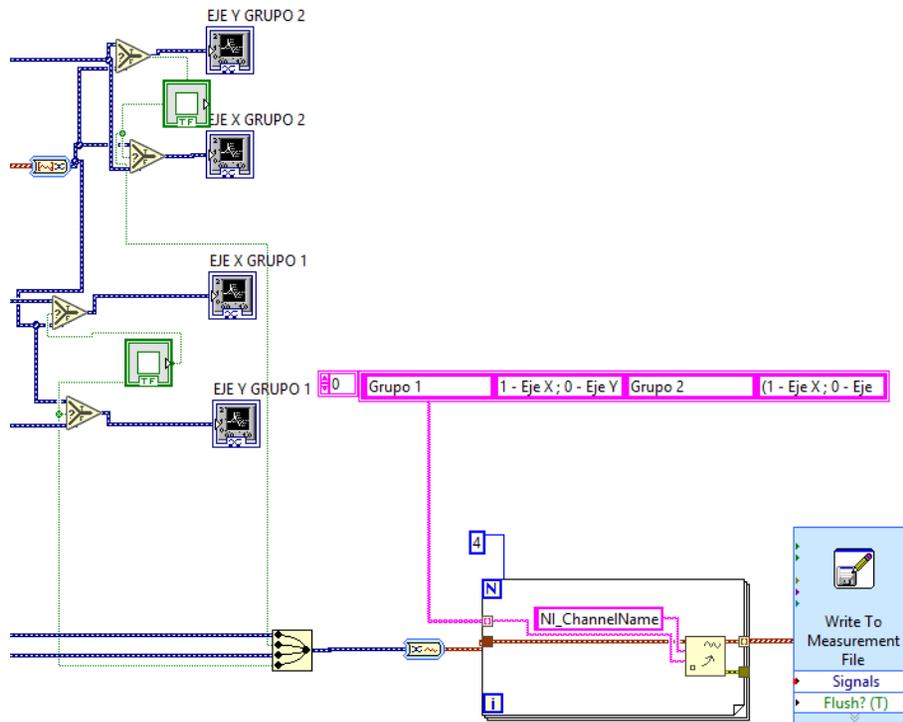


Figura 40. Base de datos de vibración registrados.

En la figura 40 se muestra la programación utilizada para la creación de tablas dinámicas, las mismas que permiten generar una base de datos histórica, el archivo generado tiene extensión (.xlsx) compatible con Excel, el mismo que muestra la información de los registros medidos cada 0.5 segundos tanto para los grupos 1 y 2, como para cada uno de sus ejes "X", "Y". Este archivo se genera y graba los datos de manera automática una vez que se ejecuta el programa.

### 5.7.12. HMI implementado para la lectura de los parámetros de vibración

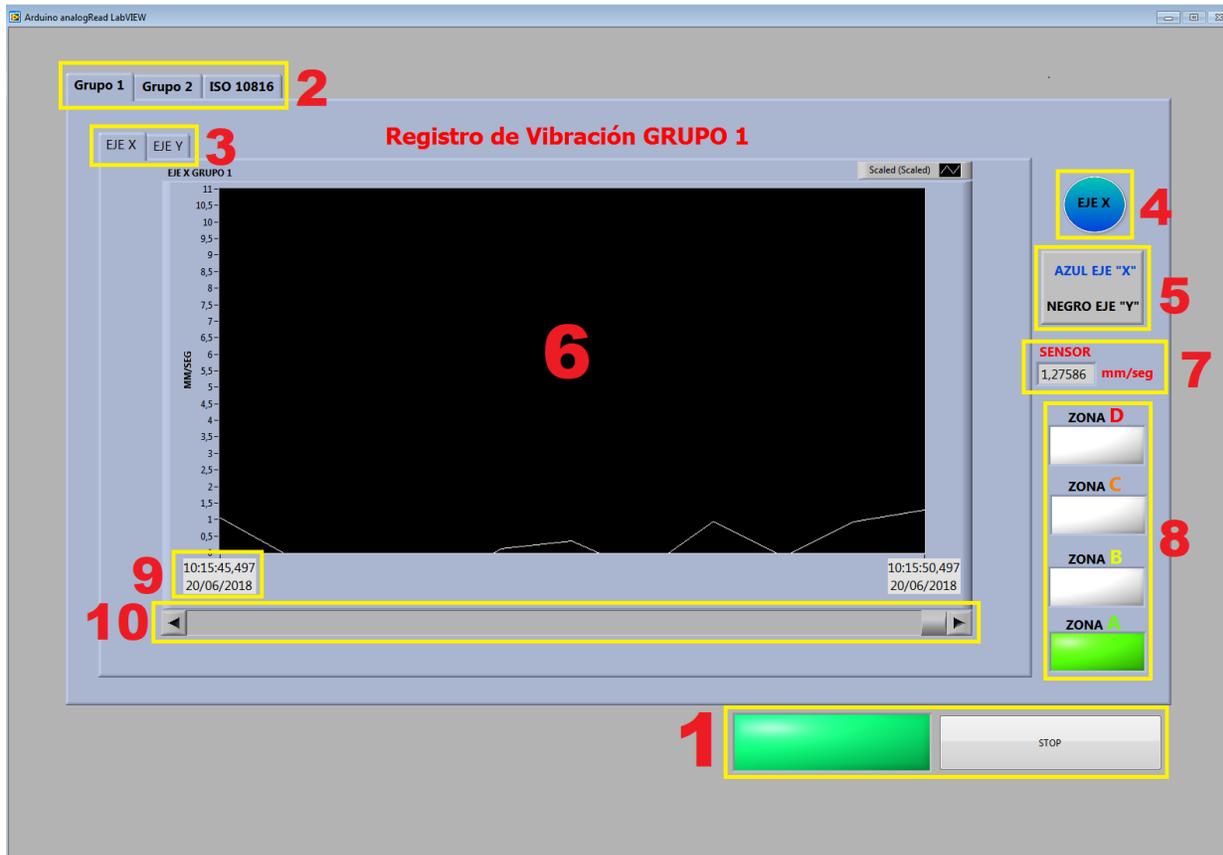


Figura 41. HMI grupo 1 y 2 pestaña “Registro de Vibración” (1) Botones RUN-STOP, (2) Selector de grupo 1, 2 y norma ISO 10816, (3) Selector de ejes “X”, “Y”, (4) Indicador de eje de medición actual, (5) Información de eje de medición, (6) Visor de señal de vibración mecánica, (7) Visor digital de vibración mecánica, (8) Zonas de criticidad de vibración mecánica, (9) Fecha y hora, (10) Barra de desplazamiento.

La figura 41 muestra el HMI implementado para seleccionar mediante botones si las mediciones se las realiza en el grupo 1 o 2 (2), la señal de vibración mecánica comienza a visualizarse de manera automática una vez que se abra el programa, una

vez ejecutado se observa en los visores la señal de vibración mecánica y sus zonas de criticidad (6),(7),(8), para seleccionar el eje en el que desea medir se debe navegar por las pestañas (3) y el botón (4), finalmente para detener presione el botón STOP (1).

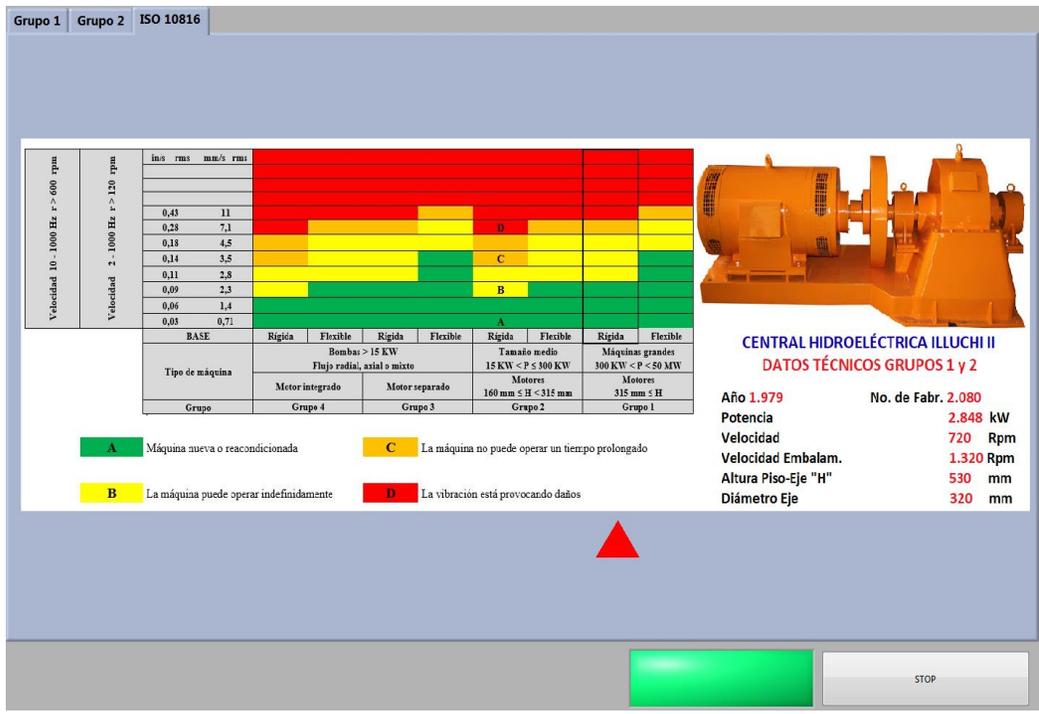


Figura 42.. HMI pestaña norma ISO 10816.

En la figura 42 muestra el HMI implementado para visualizar la norma ISO 10816, y los datos técnicos correspondientes a los grupos de generación 1 y 2 de la central hidroeléctrica Illuchi II.

**5.7.13. Pruebas y registro de vibración mecánica**

a) Grupo 1, ejes "X", "Y"



Figura 43. Registro de vibración, eje "X" grupo 1.



Figura 44. Registro de vibración, eje "Y" grupo 1.

La figura 43 y 44 muestran el registro proporcional al nivel de vibración de velocidad general para el grupo 1, en esta se puede observar como genera una señal en tiempo real medida en mm/sec (RMS), de acuerdo a los parámetros para los que fue adquirido el sensor PC420VR P-10, según las pruebas de medición y los registros históricos de la señal de vibración, arroja valores promedio que oscilan entre los 0.219 a 1.796 mm/sec (para el eje "X") y 0.395 a 2.235 (para el eje "Y"), cabe indicar que dichas mediciones fueron tomadas durante un período de tres semanas con cambios en la posición del eje "X", "Y" cada 24 horas, esto permitió tener una suficiente cantidad de mediciones registradas para establecer un diagnóstico claro del grupo 1.

Según indica la norma ISO 10816, los valores de monitorización registrados a lo largo de las 3 semanas en el grupo 1, no sobrepasan el límite de la ZONA A (máquina nueva o reacondicionada), la central de generación lleva 31 años de operación y en la zona normal en la que debía haber estado trabajando es en la ZONA B (la máquina puede operar indefinidamente), pero el motivo por el que esto no sucede y por ahora trabaja en la ZONA A se debe a que el grupo 1 hace dos años atrás fue sometido a trabajos de mantenimiento, donde se reparó y sustituyó varios elementos del equipo, en los que destaca el cambio de rodets y la sustitución por una turbina con mayor cantidad de álabes, esto permitió disminuir en gran cantidad las vibraciones mecánicas que este grupo de generación antes producía.

b) Grupo 2, ejes "X", "Y"



Figura 45. Registro de vibración, eje "X" grupo 2.



Figura 46. Registro de vibración, eje "Y" grupo 2.

La figura 45 y 46 muestran el registro proporcional al nivel de vibración de velocidad general para el grupo 2, según las pruebas de medición y los registros históricos de la señal de vibración, arroja valores promedio que oscilan entre los 0.536 a 1.372 mm/sec (para el eje "X") y 0.162 a 1.118 (para el eje "Y"), cabe indicar que dichas mediciones fueron tomadas durante un período de tres semanas con cambios en la posición del eje "X", "Y" cada 24 horas, esto permitió tener una suficiente cantidad de mediciones registradas para establecer un diagnóstico claro del grupo 2.

Según indica la norma ISO 10816, los valores de monitorización registrados a lo largo de las 3 semanas en el grupo 2, no sobrepasan el límite de la ZONA A (máquina nueva o reacondicionada), al igual que el grupo 1, por los años de operación de la central de generación, el grupo 2 también debió haber estado trabajando en la ZONA B (la máquina puede operar indefinidamente), este grupo fue sometido a trabajos de mantenimiento, donde se reparó y sustituyó elementos como rodetes y el cambio de turbina por una de mayor cantidad de álabes, si hacemos una comparación entre los valores promedios registrados entre los grupos 1 y 2, se puede observar que dichos niveles son menores para el grupo 2 y simplemente se debe a que esta fue reparada un año después que el grupo 1, por lo que aun el impacto de vibración mecánica es muy baja.

#### **5.7.14. Generación de la base de datos**

La base de datos es generada automáticamente con todos los registros históricos de vibración mecánica obtenidos tanto de los grupos 1 y 2, así como de los ejes "X", "Y"

para cada uno de los grupos; el archivo es generado con extensión (.xlsx) compatible con cualquier versión de Excel; la unidad de tiempo de registro es de 0.5 segundos como se indica en la figura 48. para acceder a dicha información únicamente hay que dirigirse en la PC a la dirección:

Bibliotecas>Documentos>LadVIEWData>test, como se visualiza en la figura 47.

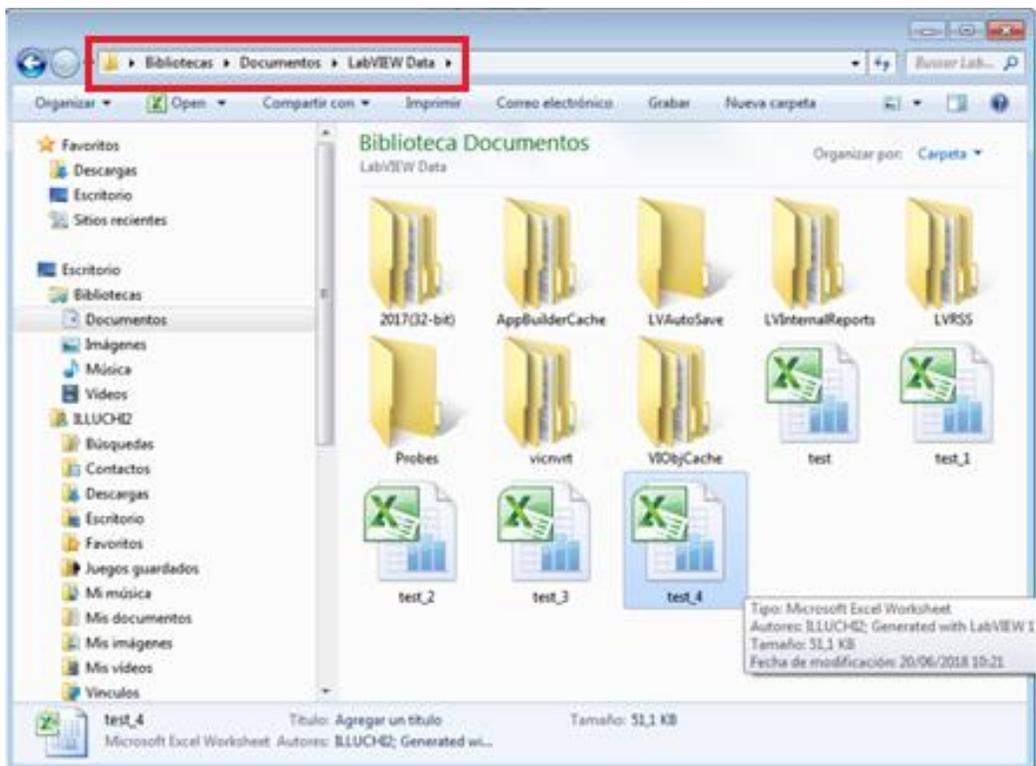


Figura 47. Ruta: Bibliotecas/Documentos/LadVIEWData/test.

	A	B	C	D	E	F
1	Time	Grupo 1	1 - Eje X ; 0 - Eje Y	Grupo 2	(1 - Eje X ; 0 - Eje Y)	
2	20/6/2018 10:12:13,846	0,56182	0,56182	0,56182	0,56182	
3	20/6/2018 10:12:14,345	-0,33722	-0,33722	-0,33722	-0,33722	
4	20/6/2018 10:12:14,846	0,33706	0,33706	0,33706	0,33706	
5	20/6/2018 10:12:15,344	-0,11246	-0,11246	-0,11246	-0,11246	
6	20/6/2018 10:12:15,845	0,33706	0,33706	0,33706	0,33706	
7	20/6/2018 10:12:16,344	0,33706	0,33706	0,33706	0,33706	
8	20/6/2018 10:12:16,847	0,56182	0,56182	0,56182	0,56182	
9	20/6/2018 10:12:17,349	1,2361	1,2361	1,2361	1,2361	
10	20/6/2018 10:12:17,848	1,01134	1,01134	1,01134	1,01134	
11	20/6/2018 10:12:18,348	0,44944	0,44944	0,44944	0,44944	
12	20/6/2018 10:12:18,847	0,56182	0,56182	0,56182	0,56182	
13	20/6/2018 10:12:19,348	-0,00008	-0,00008	-0,00008	-0,00008	
14	20/6/2018 10:12:19,851	0,6742	0,6742	0,6742	0,6742	
15	20/6/2018 10:12:20,350	0,22468	0,22468	0,22468	0,22468	

Figura 48. Base de datos.

## CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en el sistema SCADA para los grupos de generación hidroeléctrica en la central Illuchi II de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A.
- Mediante el uso de encuestas realizadas al personal operador de la central hidroeléctrica Illuchi II, se determinó una muestra representativa sobre el estado de funcionamiento de la central; los resultados recopilados fueron contrastados permitiendo tener una idea clara sobre los procesos de mantenimiento a lo que los grupos de generación 1 y 2 fueron sometidos y su método de operación a lo largo de este tiempo.
- Para la construcción del equipo analizador de vibraciones mecánicas y su implementación al sistema SCADA, fue necesario realizar la selección adecuada de los componentes que intervinieron en el diseño, se empleó cuadros comparativos según características técnicas, para la selección del acelerómetro y ADC, arrojando como resultados el sensor de 4 – 20 mA PC420VR P-10 y el PLC CONTROLLINO MAXI.
- En el ajuste de escala de la señal de los sensores se empleó cálculos matemáticos, para el diseño de circuito electrónico se tomó en cuenta la selección del ADC como punto de partida de los demás componentes, obteniendo como resultados la selección de convertidores de corriente a voltaje, step down arduino y una fuente fija ac/dc de 12V-5A, descritos en las tablas (22-24) respectivamente.

- Para la visualización, y validación en tiempo real de las señales de vibración mecánica, se usó herramientas como AnalogRead arduino y LabVIEW para la programación del PLC CONTROLLINO MAXI, la interfaz de comunicación y HM, implementado en un programa ejecutable de fácil acceso para el usuario, con un indicador de las zonas críticas (A, B, C, D) según lo establece la norma ISO 10816.
- Mediante la programación realizada en LabVIEW permitió generar una base de datos con los registros de las señales proporcionales al nivel de vibración de velocidad general, compatible con cualquier versión de Excel, se puede visualizar todos los registros generados cada 0.5 segundos por los grupos.
- Se elaboró un manual de operación del programa ejecutable para la medición de vibraciones mecánicas de los grupos de generación 1 y 2.
- Se capacitó a los operadores de la central hidroeléctrica Illuchi II en el manejo del software para el monitoreo de vibraciones mecánicas, además se orientó sobre la correcta manipulación y colocación de los acelerómetros según los tiempos recomendamos para el cambio de posición entre los ejes "X", "Y".

## RECOMENDACIONES

- Verificar que la zona donde se va a ubicar el sensor, se encuentre libre de impurezas, fluidos, etc., para que este quede totalmente fijo y adherido al cojinete.
- Colocar el acelerómetro lo más cercano posible a los rodamientos permitiendo obtener una lectura adecuada, asegurándose que el equipo de adquisición de datos reciba la información correcta sobre la dirección y sentido en la que está actuando el sensor.
- Para obtener tendencias precisas, es necesario marcar las ubicaciones de medición asegurando que las lecturas se tomen en la misma posición durante rangos de tiempo similares.
- Al momento de realizar la conexión del bus de datos del PLC CONTROLLINO MAXI al computador, esperar un momento hasta el reconocimiento NIVISA y después arrancar el programa.
- Antes empezar a visualizar la señal de vibración, luego de haber realizado el cambio de posición del sensor de un eje a otro verifique que el indicador en la pantalla este seleccionado con el nombre y color que identifican a la posición donde acaba colocar el sensor (Azul para eje "X", y Negro para eje "Y")
- Antes de salir de la aplicación para poder visualizar el archivo generado como base de datos, asegúrese primero presionar el botón STOP y posteriormente cierre el programa.

- Hacer una implementación a futuro de un sistema de monitoreo en línea de la temperatura en los cojinetes, ya que existe una elevación notoria cuando el grupo de generación trabaja a plena carga.
- Ampliar el sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas con la ubicación de nuevos sensores en el eje de acople excitatriz – generador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR. (2017). Norma ISO 10816.

Aldaz Mayorga, L. A. (2015). ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS CAUSADAS POR DESALINEACIÓN COMO MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN BOMBAS HIDRAULICAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES DE FLUJO RADIAL DE 1 HP. Ambato, Tungurahua, Ecuador.

A-MAQ S.A. (01 de 2005). *mantenimientoplanificado.com*. Obtenido de [http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO\\_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf](http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf)

ARISE. (2013). Conversor de corriente a voltaje.

Beltrán Escobar, F. (05 de 12 de 2009). *es.scribd.com*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/189718720/Trabajo-de-Mantenimiento>

Cañar Ramírez, A. H. (2009). "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA LA PENÍNSULA". Sangolquí, Pichincha, Quito.

Castillo, Y. A. (2014). *Monografías.com*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos101/programa-mantenimiento-industrial/programa-mantenimiento-industrial.shtml>

Chaljub, E. (22 de marzo de 2009). *Vibraciones mecánicas*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/13500991/TEMA-V-VIBRACIONES-MECANICAS>

Cherres Fajardo, D., & Ñauta Chuisaca, J. (2015). "ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LA COMPAÑÍA ECUATORIANA DEL CAUCHO ERCO". Cuenca.

Controllino. (2015). CONTROLLINO MAXI.

ELEPCO S.A. (julio de 2015). PLAN ESTRATEGICO INSTITUCIONAL 2014 - 2017. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

ELEPCO S.A. (2014). *ELEPCOSA.com*. Obtenido de [http://elepcosa.com/elepco/archivos/rcuentas/2016/DIRECCION%20DE%20PLANIFICACION/Planes%20Estrat%C3%A9gio%20Institucional\\_ELEPCOSA%20VF.pdf](http://elepcosa.com/elepco/archivos/rcuentas/2016/DIRECCION%20DE%20PLANIFICACION/Planes%20Estrat%C3%A9gio%20Institucional_ELEPCOSA%20VF.pdf)

Energiza. (2013). *www.energiza.org*. Obtenido de <http://www.energiza.org/mantenimiento-de-plantas/19-mantenimiento-de-plantas/516-analisis-de-vibraciones-una-tecnologia-clave-del-mantenimiento-predictivo>

Estévez Urra, A. (03 de diciembre de 2013). *http://bibing.us.es*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5309/fichero/memoria+pdf.pdf>

Expertos, D. (2013). *Grupo electrónica*. Obtenido de <http://www.grupoelectrotecnica.com/es/servicios/mantenimiento-preventivo-y-predictivo>

FULLWAT. (2010). Conversor de corriente a voltaje.

Garzón, D. (18 de febrero de 2016). *scribd.com*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/299620890/Medidor-de-Vibraciones>

Glorimel. (19 de 10 de 2011). *clubensayos.com*. Obtenido de <https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Vibraciones-Mecanicas/89327.html>

Gutiérrez Giraldo, D. M., & Serna Henao, E. (2014). "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UN EQUIPO ROTATIVO DE BUENCAFÉ LIOFILIZADO DE COLOMBIA (ESTUDIO DE CASO)". Pereira, Colombia.

INSTRUMENTS, N. (19 de agosto de 2013). *NATIONAL INSTRUMENTS T.M.* Obtenido de <http://www.ni.com/tutorial/7111/es/>

IRIM. (2013). *renovetec.com*. Obtenido de <http://www.renovetec.com/irim/infolegal>

Jaureguiberry, M. (2011). *fio.unicen.edu.ar*. Obtenido de <http://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/segumar/a13-3/material/Vibraciones.pdf>

Julian Pérez, M. M. (15 de 10 de 2015). *DEFINICIONES.DE*. Obtenido de <https://definicion.de/amplitud-de-onda/>

León Cedeño, I. (22 de febrero de 2006). ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS COMO BASE PARA LA EJECUCIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LA MAQUINARIA PETROLERA (BLOQUE 15) DE OCCIDENTAL EXPLORATION & PRODUCTION COMPANY. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.

MEER. (2015). *LEY ORGÁNICA DEL SERVICIO PÚBLICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. Quito.

Meggitt Sensing Systems. (2014). Wilcoxon Research PC420V series.

Miller, M. (2009). *Mantenimiento predictivo*. Obtenido de <http://mttopredictivocimi.blogspot.com/>

Muñoz Solís, E. I., & Salazar Malliquinga, J. L. (2005). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MÁQUINAS ROTATORIAS MEDIANTE ANÁLISIS ESPECTRAL DE VIBRACIONES. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

NATIONAL INSTRUMENTS. (2016). NI 9234.

Pérez, O., Delgado, D., Cruz, Q., Velásquez, J., & Martínez, Y. (25 de enero de 2012). *Mantenimiento de clase mundial*. Obtenido de

<http://www.monografias.com/trabajos98/mantenimiento-de-clase-mundial/mantenimiento-de-clase-mundial.shtml>

Ramón, M. (noviembre de 1999). *Monografias.com*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos/vibramec/vibramec2.shtml>

Royo, J., & Rabanaque, G. (2005). <http://guemisa.com>. Obtenido de <http://guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>

Sánchez, J. (27 de septiembre de 2013). *es.scribd.com*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/171310841/capitulo3>

SINAIS. (2013). *sinais.es*. Obtenido de <http://www.sinais.es/index.html>

Soto, E. (2008). <http://mechanical-engineering-rocker.blogspot.com>. Obtenido de <http://mechanical-engineering-rocker.blogspot.com/2008/11/vibraciones-mecnicas.html>

White, G. (2009). *Introducción al análisis de vibraciones*. U.S.A.: AZIMA DLI.

WILCOXON. (2014). General purpose compact accelerometer.

WILCOXON. (2015). RMS and peak velocity loop powered sensor (LPS).

Xareni, S. (04 de septiembre de 2013). *Prezzi.com*. Obtenido de <https://prezi.com/q2cwcuvzlmx/conceptos-basicos-de-vibraciones-mecnicas/>



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN EL SISTEMA SCADA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA CENTRAL ILLUCHI II DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A." ha sido realizado por los señores **CARLOS ANDRÉS MAIGUA LÓPEZ, CRISTIAN OMAR RODRÍGUEZ VILLARROEL**, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

En la ciudad de Latacunga, a los 25 días del mes de junio del 2018

ING. WASHINGTON FREIRE LL.  
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

ING. KATYA TORRES  
DIRECTORA DE CARRERA



DR. RODRIGO VACA  
SECRETARIO ACADÉMICO

