



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Gestión Industrial

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS  
PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**

**Ing. Sergio Jonathan Aguilar Carranza**

Asesorado por el Mtro. Ing. Luis Alberto Velásquez Aguilar

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS  
PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA A Y LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE  
POSTGRADO

POR

**ING. SERGIO JONATHAN AGUILAR CARRANZA**  
ASESORADO POR EL MTRO. ING. LUIS ALBERTO VELÁSQUEZ AGUILAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN GESTIÓN INDUSTRIAL**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA**

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Dra. Aura Marina Rodríguez Pérez
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Humberto Aroche Sandoval
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha octubre de 2017.

**Ing. Sergio Jonathan Aguilar Carranza**

DTG. 351.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**, presentado por el Ingeniero **Sergio Jonathan Aguilar Carranza**, estudiante del programa de **Maestría en Gestión Industrial**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc



**Guatemala, Agosto 2021**

EEPFI-1122-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA”** presentado por el Ingeniero **Sergio Jonathan Aguilar Carranza** quien se identifica con Carné **201020161** correspondiente al programa de **Maestría en Artes en Gestión Industrial** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**



Guatemala, Agosto 2021

EEPFI-1123-2021

Como Coordinador de la **Maestría en Artes en Gestión Industrial** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA”** presentado por el Ingeniero **Sergio Jonathan Aguilar Carranza** quien se identifica con Carné **201020161**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

**Mtro. Ing. Carlos Humberto Arocne Sandoval**  
**Coordinador de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**



**Guatemala, Agosto 2021**

EEPM-1124-2021

En mi calidad como asesor del profesional **Sergio Jonathan Aguilar Carranza** quien se identifica con Carné **201020161** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA** quien se encuentra en el programa de Maestría en Gestión Industrial en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Mtro. Luis Alberto Velásquez Aguilar**  
**Asesor**

Luis Alberto Velásquez Aguilar  
Ingeniero Mecánico Industrial  
Colegiado No. 7358

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por brindarme la sabiduría, inteligencia y los medios para lograr esta meta, por ello la gloria y la honra es solo para Él.
- Mi madre** Emma Susana Aguilar Carranza, por su apoyo incondicional durante toda mi vida.
- Mis abuelos** Alicia Carranza de Sarceño y Carlos Humberto Sarceño Méndez, porque siempre han estado pendientes de mis metas, y han sido partícipes de mis logros.
- Mis hermanas** Mildred Alicia y Jaqueline Yazmín Paz Aguilar, por su apoyo, paciencia en las dificultades y por ese vínculo que nos une como hermanos.
- Mis amigos** Por el apoyo durante los diferentes ciclos de mi vida como estudiante ya que ellos también tienen méritos en esta meta alcanzada.



**Mis educadores**

A todos los profesionales que me impartieron clases, por compartirme sus conocimientos y experiencias de forma desinteresada y generosa.

**Revisor de EEP**

A la Dra. Aura Marina Rodríguez Pérez, por toda la paciencia y apoyo durante el proceso de revisión y corrección de este informe final.

**Facultad de Ingeniería**

Por permitirme egresar como profesional de esta gloriosa Facultad.

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por brindarme la oportunidad de estudiar en esta prestigiosa casa de estudios.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS ....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Generación de energía.....	1
1.1.1. Diferencia entre generación y cogeneración.....	1
1.1.2. Generación de energía con biomasa y carbón.....	2
1.1.3. ¿Qué es biomasa?.....	2
1.1.4. Generación de energía con biomasa.....	3
1.1.5. Generación de energía con carbón.....	4
1.1.6. Medidas para controlar riesgos ambientales por generación de energía con carbón.....	5
1.2. Productividad.....	7
1.2.1. Tipos de índices de productividad.....	8
1.2.2. Productividad parcial.....	8
1.2.3. Productividad total de factores.....	8
1.2.4. Productividad bruta.....	8
1.2.5. Productividad neta.....	9

1.2.6.	Importancia de mantener la productividad en generadoras de energía .....	9
1.2.7.	Medición de productividad en generación de energía .....	9
1.3.	Equipos rotativos críticos de operación en planta generadora .....	10
1.3.1.	Ventiladores tiro forzado (FD FAN) .....	11
1.3.2.	Ventiladores aire secundario (SA FAN).....	11
1.3.3.	Ventiladores de tiro inducido (ID FAN) .....	12
1.3.4.	Sistema alimentación de combustible .....	13
1.3.5.	Sistema de alimentación de agua.....	15
1.3.6.	Monitoreo de condiciones en equipos críticos .....	16
1.3.7.	Mantenimiento predictivo .....	16
1.3.8.	Principales objetivos de mantenimiento predictivo .....	17
1.3.9.	Ventajas del mantenimiento predictivo.....	17
1.3.10.	Monitoreo del aceite lubricante .....	18
1.3.11.	Monitoreo de vibraciones .....	19
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	25
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	31
3.1.	Diagnóstico .....	31
3.2.	Análisis.....	97
3.3.	Propuesta del modelo .....	105
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	109
4.1.	Análisis interno .....	112
4.2.	Análisis externo .....	113

CONCLUSIONES .....	117
RECOMENDACIONES .....	119
REFERENCIAS.....	121
APÉNDICE .....	125



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Bagazo de caña.....	3
2.	Carbón mineral .....	4
3.	Sistema de cenizas secas.....	5
4.	Precipitador electrostático (ESP).....	6
5.	Silo de cenizas.....	6
6.	Reservorio de cenizas.....	7
7.	Comportamiento de las fallas en equipos rotativos.....	21
8.	Diagrama tipo posiciones de medición en equipos rotativos.....	27
9.	Diagrama tipo de máquinas.....	28
10.	Bomba de agua de alimentación 1 .....	31
11.	Diagrama de equipo .....	32
12.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de bomba de agua de alimentación 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	33
13.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de alimentación 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	34
14.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de alimentación 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	35
15.	Bomba de agua de alimentación 2 .....	36
16.	Diagrama de equipo .....	37
17.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de bomba de agua de alimentación 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	38
18.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de alimentación 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	39

19.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de alimentación 2 en los 4 puntos de análisis determinados .....	40
20.	Bomba de agua de alimentación 3 .....	41
21.	Diagrama de equipo .....	42
22.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de bomba de agua de alimentación 3 en los 4 puntos de análisis determinados .....	43
23.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de alimentación 3 en los 4 puntos de análisis determinados .....	44
24.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de alimentación 3 en los 4 puntos de análisis determinados .....	45
25.	Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1 .....	46
26.	Diagrama de equipo .....	46
27.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1 en los 4 puntos determinados. ....	48
28.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1 en los 4 puntos determinados. ....	49
29.	Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2 .....	50
30.	Diagrama de equipo .....	50
31.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos determinados. ....	52
32.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos determinados. ....	53
33.	Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3 .....	54
34.	Diagrama de equipo .....	54

35.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3 en los 4 puntos determinados.....	56
36.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3 en los 4 puntos determinados.....	57
37.	Ventilador de tiro inducido 1 .....	58
38.	Diagrama de equipo .....	58
39.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro inducido 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	60
40.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro inducido 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	61
41.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro inducido 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	62
42.	Ventilador de tiro inducido 2 .....	63
43.	Diagrama de equipo .....	63
44.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro inducido 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	65
45.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro inducido 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	66
46.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 ventilador de tiro inducido 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	67
47.	Ventilador de tiro forzado primario 1 .....	68
48.	Diagrama de equipo .....	68
49.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado primario 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	70
50.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro forzado primario 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	71

51.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado primario 1 en los 4 puntos de análisis determinados.....	72
52.	Ventilador de tiro forzado primario 2.....	73
53.	Diagrama de equipo .....	73
54.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado primario 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	75
55.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro forzado primario 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	76
56.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado primario 2 en los 4 puntos de análisis determinados.....	77
57.	Ventilador de tiro forzado secundario 1 .....	78
58.	Diagrama de equipo .....	78
59.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado secundario 1 en los 4 puntos de análisis determinados .....	80
60.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 fr ventilador de tiro forzado secundario 1 en los 4 puntos de análisis determinados .....	81
61.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado secundario 1 en los 4 puntos de análisis determinados .....	82
62.	Ventilador de tiro forzado secundario 2.....	83
63.	Diagrama de equipo .....	83
64.	Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado secundario 2 en los 4 puntos de análisis determinados .....	85
65.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro forzado secundario 2 en los 4 puntos de análisis determinados .....	86
66.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado secundario 2 en los 4 puntos de análisis determinados .....	87
67.	Ventilador de torre de enfriamiento 1 .....	88
68.	Diagrama de equipo .....	88

69.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de torre de enfriamiento 1 en los 4 puntos de análisis determinados .....	89
70.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de torre de enfriamiento 1 en los 4 puntos de análisis determinados .....	90
71.	Ventilador de torre de enfriamiento 2 .....	90
72.	Diagrama de Equipo.....	91
73.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos de análisis determinados .....	92
74.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos de análisis determinados .....	93
75.	Ventilador neumático de aire de alimentación de carbón .....	94
76.	Diagrama de equipo .....	94
77.	Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador neumático de aire de alimentación de carbón en los 4 puntos determinados .....	96
78.	Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador neumático de aire de alimentación de carbón en los 4 puntos determinados .....	97
79.	kW /t. caña generados 2014-2015 .....	98
80.	kW /t. caña generados 2015-2016 .....	98
81.	kW /t. caña generados 2016-2017 .....	99
82.	Eficiencia Bruta 2014-2015.....	100
83.	Eficiencia bruta 2015-2016 .....	101
84.	Eficiencia bruta 2016-2017 .....	101
85.	Eficiencia neta 2014-2015.....	103
86.	Eficiencia neta 2015-2016.....	103
87.	Eficiencia neta 2016-2017.....	104
88.	Formatos para medición de motor y bomba .....	106
89.	Formatos para medición de motor y ventilador .....	107

## TABLAS

I.	Variables e indicadores .....	XXII
II.	Resumen de productividad cogeneración de energía .....	99
III.	Resumen de productividad bruta .....	102
IV.	Resumen de productividad neta .....	104
V.	Cuadro de consumo de carbón diario .....	111
VI.	Cuadro costo de carbón mensual .....	111
VII.	Comparación costo de carbón mensual por periodo .....	111

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>US\$</b>	Dólar americano
<b>US\$/kWh</b>	Dólares por kilowatt-hora
<b>gal/m</b>	Galones por minuto
<b>°C</b>	Grados centigrados
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>kWh</b>	Kilowatt-hora
<b>kWh/t</b>	Kilowatt-hora por tonelada
<b>mm/s</b>	Milímetros sobre segundo
<b>%</b>	Porcentaje
<b>t</b>	Tonelada
<b>RMS</b>	Velocidad de amplitud de raíz



## GLOSARIO

<b>Biomasa</b>	Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.
<b>Carbón</b>	Sustancia fósil, dura, bituminosa, de color oscuro o casi negro y muy combustible, que resulta de la descomposición de cuerpos orgánicos.
<b>Ceniza</b>	Polvo de color gris claro que queda después de una combustión completa, y está formado, generalmente, por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos metálicos.
<b>Cogeneración</b>	Producción simultánea de vapor y electricidad en una central termoeléctrica mediante procesos interrelacionados.
<b>Generación</b>	Acción que consiste en producir energía mediante un proceso independiente.
<b>Mantenimiento</b>	Conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, equipos, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente.

<b>mm/s</b>	Unidad de medida para la velocidad de amplitud de raíz que equivale a el desplazamiento en milímetros por cada segundo transcurrido.
<b>Predictivo</b>	Que predice o sirve para predecir.
<b>Productividad</b>	Relación entre lo producido y los medios empleados para ello.
<b>T</b>	Abreviatura para la unidad de masa tonelada que equivale a 1,000 kg.

## RESUMEN

La implementación del sistema de análisis de condiciones que se ejecutó en la planta generadora tiene el propósito de garantizar que la productividad de la planta se mantenga constante o aumente. Con ello, también se evitan los paros no programados que causan costos excesivos en la recuperación de los equipos críticos por trabajos de mantenimiento de emergencia y en las sanciones o penalizaciones por no cumplir con los programas de generación previamente establecidos y con los compromisos adquiridos por tener la planta disponible con el Administrador de Mercado Mayorista.

Se implementó la metodología descriptiva para definir las variables e indicadores. Por eso, fue trascendental identificar los equipos denominados críticos, sus condiciones iniciales de operación y una tendencia de operación a lo largo de los periodos de trabajo en la planta. Se define como cogeneración al periodo comprendido entre noviembre y mayo en el cual se fabrica azúcar y se genera energía como subproducto de la caña de azúcar. El segundo periodo denominado generación utiliza como combustible el carbón mineral porque durante los siguientes meses no se fabrica azúcar, es decir, se tiene como proceso independiente.

El resultado de la información obtenida fue que los equipos estaban trabajando de manera adecuada debido a que los parámetros analizados se encontraban en una zona de operación a largo plazo. Es importante mencionar que el aporte más significativo fue que durante la implementación se mejoraron los valores de productividad de generación de energía en los periodos posteriores a la implementación. Otro beneficio obtenido fue la mitigación de algunas alarmas

en los equipos, las cuales se identificaron mediante la variación de las mediciones tomadas. Sin embargo, se controlaron mediante paradas de mantenimiento programadas y con un diagnóstico previo. Por ello, se contó con los repuestos y equipos necesarios para que el tiempo del mantenimiento fuese el menor posible.

Se concluye que, para garantizar la productividad en la generación de energía donde los equipos críticos son de vital importancia, el análisis de condiciones es la mejor opción para evitar paros no programados. Con ello, se obtiene un ahorro de costos no proyectados. Por esta razón, es necesario que estos análisis se realicen en las plantas generadoras de energía del sector, ya que si se incumple con la programación del AMM generan gastos fuertes. Por ello, también se incrementan los costos de reparaciones por emergencias. Se sugiere, además, que en la planta donde se llevó a cabo la implementación se continúe con la determinación de fallas para aumentar la productividad.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS**

Las fallas en los equipos críticos afectaban la producción de energía y el Administrador de Mercado Mayorista (AMM) aplicaba sanciones muy drásticas ya que es quien realiza los programas de generación de energía donde detalla la cantidad de energía que debe ser suministrada a la red interconectada del país. Este suministro obedece a la demanda y a la oferta en las diferentes generadoras. Dichas sanciones consistían en penalizar a la planta reduciendo la cantidad de energía con la cual es convocada y degradando su capacidad instalada y dejando de obtener los ingresos por la energía que se suministraba.

La planta generadora tenía una capacidad instalada para generar 38MWh durante el periodo de generación con biomasa y 45MWh durante el periodo generación de energía con carbón.

Se tuvo como antecedente en la planta que durante los periodos de cogeneración de energía 2013-2014 y 2014-2015 se contaba con un turbogenerador de menor capacidad con el cual se tuvo problemas en el diseño de una caja reductora de velocidad que conectaba la turbina con el generador. Dicha falla provocó paradas no programadas por mantenimiento, que la generación fuera inestable y no se pudiera alcanzar la venta más de 29 MWh (generación bruta – consumo de energía). Esto afectó directamente la productividad de la planta y causó que el AMM penalizara a la planta, reduciendo la capacidad instalada de 31.5 MWh hasta llegar a 27 WMh.

La planta generadora buscó garantizar sus ingresos realizando contratos con una empresa distribuidora de energía en el país. Para ello, se comprometió a tener disponibilidad para vender 31.5 MWh durante el periodo de generación con biomasa. Se fijó una meta de productividad mayor o igual a 68 kW/t. de caña molida; mientras que durante el periodo de generación con carbón se seguía teniendo la misma disponibilidad contratada de 31.5 MWh y, como meta, una productividad de 2200 kW/t. de carbón mineral.

Para el desarrollo del trabajo se plantea el siguiente problema

¿Qué sistema analítico en equipos rotativos se puede utilizar para garantizar la productividad de generación de energía?

A consecuencia esto, surgen las siguientes preguntas de investigación.

- ¿Cuáles son las condiciones iniciales de operación y las posibles fallas en los equipos rotativos críticos que causarían paros afectando la productividad de energía?
- ¿Cómo afectan los paros no programados de los equipos críticos en la productividad de energía?
- ¿Cómo se pueden disminuir los costos por paros por producción generando baja productividad en la generadora?

# OBJETIVOS

## General

Diseñar un sistema de análisis de condiciones en equipos rotativos para garantizar la productividad de generación de energía.

## Específicos

1. Determinar las condiciones iniciales de operación de las máquinas rotativas y las posibles fallas que podrían darse en las mismas que afectarían la productividad de generación de energía.
2. Determinar cómo afectan los paros no programados de los equipos críticos en la productividad de generación de energía.
3. Reducir los costos por tiempos perdidos debido a la baja productividad de generación de energía, por medio de la implementación de un sistema de análisis de condiciones en los equipos rotativos.



## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

En esta investigación se aplicó el enfoque de una investigación mixta cualitativa-cuantitativa porque se buscó explicar el comportamiento de los equipos críticos desde la situación inicial de operación de modo cualitativo, llevando una secuencia de obtención de datos y verificar las condiciones durante la operación normal de los mismos de modo cuantitativo. Así mismo se presentan valores de productividad periódica para determinar qué factores influyeron en la búsqueda de garantizar la productividad de generación de energía eléctrica.

El diseño de la investigación fue no experimental basado en la interpretación de los datos obtenidos de los análisis de vibraciones de los equipos claves de operación.

El tipo de estudio definido fue descriptivo debido a que se realizó un análisis de datos a través de toma de datos periódicos para finalizar con una propuesta de monitoreo de condiciones y debido a que se identificaron posibles fallas que se podían haber dado en los equipos críticos.

Las variables que se utilizaron durante la investigación son de tipo cuantitativo al igual que los indicadores con lo que se busca determinar la relación entre los mismos, tal como se detalla en la tabla I. Variables e Indicadores.

El tipo de productividad utilizada para el periodo de generación con biomasa fue la productividad total debido a que fue medida en base la generación de energía total diaria dividida únicamente por la cantidad de caña que se muele durante el día.

Para el periodo de generación con carbón fueron dos la productividad bruta que consistió en energía generada total diaria dividido por la cantidad total de combustible utilizado para generarla y la productividad neta que es la energía entregada a la venta en el sistema nacional interconectado dividido por la cantidad total de combustible utilizado para generarla

Tabla I. **Variables e indicadores**

Núm.	Variable	Indicador	Instrumentos
1	• Generación de energía	• kWh	Contadores de Energía.
2	• Precio <i>spot</i>	• US\$/kWh	Con base en el precio del mercado.
3	• Precio Contrato	• US\$/kWh	En base al precio pactado.
4	• Condiciones de operación de los equipos	• RMS	En obtendrá en las mediciones de vibraciones.
5	• Generación y venta por consumo de Combustible	• kWh/t	Se medirá la productividad con base en la eficiencia del rendimiento por combustible.

Fuente: elaboración propia.

El nivel de investigación que se diseñó fue el explicativo ya que se identificaron posibles problemas que se dan en los equipos claves de operación en la generación de energía.

Se realizó un análisis exploratorio donde se necesitó obtener toda la información posible para identificar los equipos críticos, esto para garantizar la productividad de energía.

Se utilizó un análisis poblacional debido a que se trabajó con el 100 % de los equipos determinados como críticos los cuales son los siguientes:

Motor y bomba:

- Bomba de agua de alimentación 1
- Bomba de agua de alimentación 2
- Bomba de agua de alimentación 3
- Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1
- Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2
- Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3

Motor y ventilador:

- Ventilador de tiro inducido 1
- Ventilador de tiro inducido 2
- Ventilador de tiro forzado primario 1
- Ventilador de tiro forzado primario 2
- Ventilador de tiro forzado secundario 1
- Ventilador de tiro forzado secundario 2

Motor:

- Motor de ventilador de torre de enfriamiento 1
- Motor de ventilador de torre de enfriamiento 2
- Motor de ventilador neumático de aire de alimentación de carbón



## INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia que reviste la energía en las actividades diarias, tanto en el ámbito doméstico como industrial, muchas empresas que al principio realizaban procesos agroindustriales tomaron la iniciativa de involucrarse en el mercado energético. En los años comprendidos entre 2009 y 2013, incluyeron el proceso de cogeneración de energía como un departamento en las empresas. Por ello, fue necesaria la adquisición de equipos especiales con mayor capacidad de generación. De esta forma se logró que la generación sea continua durante todo el año. Como consecuencia, cobró importancia la aplicación de un control adecuado del funcionamiento y operación de los equipos que pudieron causar que la generadora saliese de línea. Se llevó a cabo una innovación donde se buscó garantizar la productividad de la planta generadora durante el año operacional.

El problema que se buscó mitigar fue que se presentaran algunas fallas o algún desperfecto en los equipos críticos afectando la productividad de energía. La importancia de la solución se dio en evitar que la planta generadora se viera afectada en términos de sanciones y degradaciones por no aportar la cantidad de energía pactada en contrato, sobrecostos por la realización de mantenimientos correctivos y las ineficiencias que pudieron darse en el proceso por la ausencia de algún equipo crítico. Por tales razones, en la generadora para la cual se diseñó el presente proyecto, adquirió un equipo para realizar análisis de vibraciones bajo la cual se basó el análisis de condiciones en los equipos claves en el proceso de generación de energía.

Los resultados que se esperaban obtener eran las tendencias de condiciones normales de trabajo de los equipos rotativos críticos para garantizar la productividad de energía en la planta donde se realizó el diseño de investigación. A partir de esto se buscó la información de operación de los equipos críticos, con lo que se identificó de una manera más sencilla cuando se presentaba alguna falla y la criticidad de estas que se pudieron haber dado en los equipos rotativos, logrando determinar si eran de alto grado de riesgo o no.

El aporte principal del diseño de investigación fue que se garantizó la productividad en la planta generadora. Los principales beneficios obtenidos estuvieron dados con base en la reducción de costos por tiempos perdidos, mantenimientos no programados y evitar penalizaciones y degradaciones en la capacidad instalada de la planta generadora, además hay que resaltar el hecho que Guatemala es el mayor exportador de energía de la región, debido a que la capacidad instalada de generación es mayor que la demanda nacional. Como parte de la metodología se trabajó en una investigación descriptiva, en la cual se identificaron y monitorearon los equipos claves sin los cuales la generación, se hubiese visto afectada y así mismo se les dio seguimiento periódico obteniendo tendencias y estadísticas de operación para garantizar que la generación fuera continua.

En el capítulo uno del Marco teórico se mencionan conceptos generales de generación de energía en una planta térmica, conceptos de productividad, así como su relación con la generación de energía, se realizó una descripción de los equipos rotativos que son críticos en la planta de generación, así también se mencionó el sistema de monitoreo de condiciones en equipos rotativos entre los cuales se encuentra el presentado en este trabajo como análisis de vibraciones.

En el capítulo dos se presenta paso a paso el desarrollo de la investigación así como la obtención de datos, la tabla patrón contra la cual se revisaron los resultados obtenidos, se hace mención de la importancia de tener claro, que estas mediciones se realizan en los elementos rodantes y se deben realizar tres mediciones por cada punto en donde se encuentren estos elementos rodantes las cuales se hacen en tres posiciones distintas: vertical, horizontal y axial para tener una perspectiva global del estado del equipo y así determinar las posibles fallas que se estarían formando y atacarlas de manera temprana.

En el capítulo tres se presenta el diagnóstico de los resultados obtenidos de los equipos analizados con sus características principales y se definen los límites de las zonas de operación según la tabla ISO 10816-3, así también se muestran gráficas en donde se comparan los resultados obtenidos con la tabla antes mencionada utilizada para determinar las condiciones en las que se encuentra el equipo, se presenta el análisis de los valores de productividad parcial para el período de cogeneración de energía utilizando como combustible biomasa (Zafra) y productividad bruta y neta para el período de generación con carbón. También se elaboró la propuesta de la implementación donde se presentó una porción del manual de mantenimiento en el cual, actualmente se agrega al monitoreo de condiciones entre el mantenimiento predictivo mecánico, así como los formatos con los cuales se realizó la medición de los equipos para obtener tendencias, todo esto debidamente registrado en el sistema de gestión de calidad de la empresa.

En el capítulo cuatro se presenta la discusión de resultados realizando un análisis interno de las fortalezas y debilidades del estudio, así también se realizó un análisis externo considerando las oportunidades y amenazas que se tienen del mismo, donde se realiza una comparación con resultados que se tuvieron en otros estudios relacionados.

Por último se concluye que, para garantizar la productividad en la generación de energía en donde los equipos críticos son de vital importancia, el análisis de condiciones es la mejor opción debido a que se adapta fácilmente en la planta para tener un control adecuado de los equipos ya que permite llevar un control estrecho de los valores de operación y los límites en los que debería operar, por esta razón es que se recomienda utilizar este tipo de análisis para las plantas generadoras de energía ya que las sanciones pueden llegar a ser muy drásticas por parte del AMM, así mismo, se puede implementar en los distintos sectores de la industria para garantizar la productividad de las mismas.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Generación de energía**

En la búsqueda de garantizar la generación de energía en la planta es muy importante tener indicadores e índices y el de la productividad es uno de los principales debido a que se debe tener muy bien definido cuál es el rendimiento que se está teniendo de los insumos que se invierten para la misma.

Aguilar (2012), realizó un análisis de cómo se da la generación de energía y afirma que esta es proveniente principalmente de fuentes primarias como el bunker, el diésel, las hidroeléctricas, el vapor de agua y las plantas geotérmicas, el carbón mineral y la biomasa.

### **1.1.1. Diferencia entre generación y cogeneración**

Energiza (s.f.) afirma que la cogeneración significa producción simultánea de dos o más tipos de energía. Normalmente las energías generadas son electricidad y calor, aunque puede ser también energía mecánica y calor (y/o frío).

Mediante la producción en conjunto de los diferentes tipos de energía se busca que la evacuación de cierta cantidad de calor que no puede ser convertido en trabajo no sea eliminado al ambiente, sino que sea aprovechado en otro proceso y no se pierda la cantidad de energía que se invirtió para transformarla.

Mientras en la generación de energía se obtiene mediante la combustión en una caldera de combustible fósil para generar energía calorífica que se

aprovecha para generar vapor de agua. Este vapor acciona una turbina de vapor, transformando la energía calorífica en energía mecánica. Endesa Educa, (s.f.)

### **1.1.2. Generación de energía con biomasa y carbón**

En una planta que cuenta con un proceso simultáneo en donde se obtiene como desecho biomasa el aprovechamiento de esta para generar energía representa un beneficio económico para la empresa, mientras que con relación a la generación con carbón se da de modo que la generadora es convocada y el costo del carbón es reintegrado debido a que este se incluye en el precio de la energía con el que se distribuye a la red nacional.

### **1.1.3. ¿Qué es biomasa?**

Biomasa se denomina al grupo de productos energéticos y materiales renovable tienen su origen a partir de materiales orgánicos.

Endesa Educa (s.f.) afirma que la palabra biomasa describe los materiales provenientes de seres vivos animales o vegetales. Es decir, toda la materia orgánica (materia viva) procedente del reino animal y vegetal obtenida de manera natural o procedente de las transformaciones artificiales.

Figura 1. **Bagazo de caña**



Fuente: [fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

#### **1.1.4. Generación de energía con biomasa**

La generación de energía con biomasa en el ámbito nacional (principalmente en la industria azucarera) es utilizada debido a que el proceso fabril genera desechos que se pueden aprovechar tipo fibra, que son utilizados como combustible en una caldera de presión en donde evaporar agua y el vapor generado es llevado a una turbina de vapor desde donde se pueden tomar extracciones de vapor que son enviadas a otro proceso fabril como podría ser una destilería para la producción de alcohol y es en este momento que se tiene una cogeneración de energía.

Endesa Educa (s.f.) Afirma: “utilizan el mismo esquema de generación eléctrica que una central térmica convencional. La única diferencia es el combustible utilizado en la caldera, que proviene de nuestros residuos”. (párr. 1)

### **1.1.5. Generación de energía con carbón**

Tenaris (s.f.) afirma:

Las plantas a carbón producen electricidad a partir de la combustión de carbón, en un generador de vapor que transforma el agua en vapor de alta presión y temperatura. El vapor circula por una serie de turbinas de vapor que impulsan un generador eléctrico para producir electricidad. El vapor de escape de las turbinas se refrigera, por condensación se convierte en agua y finalmente se devuelve al generador de vapor para recomenzar el proceso. (párr. 3)

Figura 2. **Carbón mineral**



Fuente: [fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

### **1.1.6. Medidas para controlar riesgos ambientales por generación de energía con carbón**

La mayoría de los combustibles utilizados para combustión siendo la única excepción el gas natural, contienen impurezas que generan cenizas al quemarse (residuos sólidos de la combustión). Estos, en algunos casos, son escorias, cuando las cenizas se funden y aglomeran forman partículas más o menos grandes o bloques que se pegan a las paredes del horno de la caldera o en algunos casos partículas más finas son arrastradas por los humos. Prieto (2000)

Además, los avances tecnológicos han hecho que las exigencias ambientales sean más rigurosas haciendo que la generación a base de combustibles sea manejada de manera más limpia y responsable ambientalmente.

Algunos equipos para garantizar el control del riesgo ambiental por generación con carbón son los siguientes:

**Figura 3. Sistema de cenizas secas**



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 4. **Precipitador electrostático (ESP)**



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 5. **Silo de cenizas**



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 6. **Reservorio de cenizas**



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

## **1.2. Productividad**

El grado de utilidades de las empresas y en general de un país es medido en gran parte a los altos niveles de productividad, por lo que se vuelve indispensable garantizar que la misma tenga el mayor porcentaje de esta.

Además, los altos niveles de productividad de una empresa por lo regular van relacionados con el alto grado de calidad tanto del trabajo desempeñado por cada parte de la organización como de los aliados estratégicos con los que cuenta la empresa.

Arimón (1997), afirma: “El concepto de productividad refiere a la eficiencia productiva con que es utilizada una unidad de factor o insumo, implica por tanto un cociente entre lo producido y lo insumido.” (p. 15)

### **1.2.1. Tipos de índices de productividad**

Estos se utilizan por lo regular cuando se tienen varios tipos de insumos en la producción del producto terminado.

### **1.2.2. Productividad parcial**

Carro y González (s.f.), afirman: “La productividad Parcial es la que relaciona todo lo producido por un sistema (Salidas) con uno de los recursos utilizados (insumos o entradas).” (párr. 1)

$$Productividad\ Parcial = \frac{Total\ Salidas}{Una\ Entradas}$$

### **1.2.3. Productividad total de factores**

Carro y González (s.f.), afirman: “La productividad total involucra, en cambio, a todos los recursos (Entradas) utilizados por el sistema; es decir el cociente entre las salidas y el agregado del conjunto de entradas.” (párr. 2)

$$Productividad\ Total = \frac{Total\ Salidas}{Total\ Entradas}$$

### **1.2.4. Productividad bruta**

Carro y González (s.f.), afirman: “La productividad bruta es el cociente entre el valor bruto de la salida (que incluye el valor de todos los insumos) y la entrada (o un conjunto de entradas) que incluye también el valor de todos los insumos”. (párr. 3)

### **1.2.5. Productividad neta**

Carro y González (s.f.), refieren que la productividad neta se define como el valor que se da agregado a la salida, por una entrada del cual el valor de ciertos insumos es excluido del numerador y denominador del índice.

### **1.2.6. Importancia de mantener la productividad en generadoras de energía**

Esta es fundamental para determinar si las diferentes máquinas y equipos están funcionando al máximo de su capacidad y con ello definir si la planta está en condiciones de aportar la energía con base en la capacidad instalada de la planta.

### **1.2.7. Medición de productividad en generación de energía**

Para medir la productividad en la generación de energía es necesario determinar las entradas y salidas del proceso, para este caso se debe analizar ambos casos, debido a las dos temporadas de generación en la planta como lo son la cogeneración de energía y la generación de energía.

En el primer caso, la salida son kWh debido a que se trata de un término de energía en donde tenemos la unidad de potencia disponible de la planta por el periodo de tiempo en el que es medido.

La entrada al proceso se refiere al combustible básicamente, debido a que en el caso primero se refiere a la temporada de cogeneración de energía, donde varios procesos intervienen entre sí y la generación de energía no depende de la

misma planta para su operación, debido a que se recibe el combustible del proceso de molienda de caña el cual se cuantifica como Toneladas de bagazo,

Se determina la ecuación de la productividad de la siguiente manera:

$$Productividad\ Energia = \frac{KWh}{Tonelada\ de\ Bagazo}$$

En el segundo caso, las salidas son kWh aún, mientras la entrada para este proceso debido a la temporada de generación de energía son toneladas de carbón, el cual no es adquirido por medio de un proceso previo, sino que es adquirido de forma externa.

Con dicha información se determina la ecuación de la productividad de la siguiente manera:

$$Productividad\ Energia = \frac{KWh}{Tonelada\ de\ Carbón}$$

En ambos casos el valor de la productividad será determinado por las características específicas de las entradas, las cuales son definidas por el combustible de la caldera, los cuales tienen diferentes poderes caloríficos brindando resultados sumamente diferentes ya que el proceso se vuelve más eficiente utilizando combustible carbón, pero el costo de este es más elevado, encareciendo la operación en esta temporada.

### **1.3. Equipos rotativos críticos de operación en planta generadora**

Estos equipos pueden causar que la planta generadora detenga su operación por lo que son de vital importancia para la productividad de esta.

### **1.3.1. Ventiladores tiro forzado (FD FAN)**

Gaffert (1981), describe la función de estos como:

Como la combinación que suprime el aire de tiro inducido y el aire de tiro forzado para producir una presión de aire suficiente para forzar los gases a la caldera.

Estos ventiladores suministran el aire primario que va directo para la combustión, el cual ingresa por debajo de las tolvas giratorias y de la parrilla viajera. El aire reacciona y combustiona con el combustible, y viaja después como humo (gases de combustión). Este flujo de aire ingresa al precalentador de aire (*air heater*), en la sección inferior del mismo. Se logra mejorar la eficiencia de la combustión cuando se hace una buena regulación de aire primario-combustible. (p.81)

### **1.3.2. Ventiladores aire secundario (SA FAN)**

Estos ventiladores tienen cuatro funciones básicas en la caldera que son las siguientes:

- Con las boquillas distribuidas en las paredes frontal y trasera, el aire ingresa al horno (hogar), produciendo turbulencia y rompiendo el efecto chimenea, logrando así una buena distribución del calor en todo el horno y en el sobre calentadores.
- La segunda función es que, a la salida de los silos de alimentación de bagazo, están las compuertas reguladoras, que es meter aire secundario

para atomizar y lograr dispersar y poner en suspensión el bagazo, para que se quemara en el aire en su mayoría.

- La tercera función, es que se utiliza este aire secundario, para enfriamiento de los visores en la parte frontal de la parrilla viajera (*stocker*).
- Por último, este flujo de aire secundario ingresa al precalentador de aire (*air heater*), en la sección superior del precalentador de aire.

Golato (2005) describe en su artículo la importancia del aire inducido en la eficiencia térmica de calderas bagaceras productoras de vapor:

Se evalúa la inyección de aire secundario al hogar, previamente calentado. Además, se reúne información sobre la combustión y los factores que influyen en dicho fenómeno. Se calculó el rendimiento térmico en una caldera bagacera con inyección de aire secundario frío, mediante el empleo de balances de masa y energía con datos de ensayos experimentales. Se planteó luego un modelo teórico para el caso de calentar todo este aire secundario, y se determinó el nuevo rendimiento térmico. Finalmente, se realizó un análisis técnico-económico para evaluar la rentabilidad del uso de esta tecnología, teniendo en cuenta el ahorro de bagazo y su equivalente en gas natural.

### **1.3.3. Ventiladores de tiro inducido (ID FAN)**

La función de los tiros inducidos es extraer los gases de la combustión desde el horno (hogar), hasta la chimenea donde se van los gases a la atmósfera, pasando primero por la ruta del gas que es horno, sobre calentadores, evaporadores, economizador, calentador de aire, precipitador electrostático

(ESP) y chimenea. Otra función importante del tiro inducido es mantener negativa la presión en el horno (hogar), y en todo el recorrido de los gases.

#### **1.3.4. Sistema alimentación de combustible**

El sistema de alimentación de combustible con el que se cuenta con dos sistemas independientes el primero es de alimentación de bagazo, se compone de los siguientes equipos:

- Conductor de banda alimentación núm. 8: recibe el bagazo que viene directo de molinos.
- Conductor de tablillas núm. 9: recibe el bagazo del conductor de alimentación, y lo transporta y distribuye en las seis entradas de bagazo a la caldera, y el remanente que no se va a la caldera, lo devuelve al siguiente conductor.
- Conductor de banda de retorno núm. 10: recibe el bagazo remanente del conductor de tablillas, y lo devuelve al conductor principal de calderas, para almacenarlo en la bodega bagacera.
- Compuertas (Piñon Gate): son las 6 compuertas, que regulan la entrada del bagazo a los silos antes de caer a los alimentadores de bagazo.
- Silos de bagazo: son 6 silos rectangulares, los cuales se encargan de controlar la capacidad de almacenaje de bagazo, mientras los alimentadores desmenuzan y distribuyen apropiadamente el bagazo.

- Alimentadores de bagazo (*Drums Feeders*): son 6 alimentadores tipo tambor, con raspillas en sus rodos, para desterronar el bagazo y enviarlo desmenuzado al horno.
- Chutes de bagazo: son las caídas inclinadas que van de los alimentadores de bagazo hasta la entrada del bagazo al horno.
- *Dampers* Reguladores (*Spreaders dampers*): son los *dampers* reguladores del aire secundario, que entra a la salida de los chutes de bagazo en el horno, para esparcir el bagazo en el horno. Al final de los tubos de los reguladores, también hay 6 compuertas que regulan la inclinación y la distancia a la que se desea que caiga el bagazo dentro del horno.

El segundo sistema de alimentación de combustible para la caldera es de combustible carbón mineral que se compone de lo siguiente:

- Bodega de carbón: con capacidad de almacenar hasta 15,000 toneladas de carbón mineral, desde donde se suministra a los conductores de carbón por medio de un cargador frontal.
- Conductor de banda núm. 5 de carbón: en este se alimenta el carbón directamente desde la bodega de carbón.
- Conductor de banda núm. 6 de carbón: este recibe el carbón del conductor 5 con un ángulo de 30 grados sobre la horizontal hasta un silo que conecta con la trituradora de carbón.

- Trituradora de carbón: esta se encarga de triturar los trozos grandes de carbón para facilitar que sean quemados en el horno.
- Conductor de banda núm. 7 de carbón: transporta el carbón triturado desde la una altura de 1 metro hasta el nivel superior de la caldera.
- Conductor de banda núm. 8 de carbón: recibe el carbón del conductor núm. 7 y lo deposita en 2 tolvas de carbón desde donde se conectan con los alimentadores de Carbón.
- Alimentadores de carbón: son 8 alimentadores tipo tambor independiente entre sí, cuya función es enviar el mismo a los chutes de carbón.
- Chutes de carbón: son las caídas inclinadas que van de los alimentadores de carbón hasta la entrada del horno.

### **1.3.5. Sistema de alimentación de agua**

Consta de los siguientes equipos:

Bombas Alimentación (BFP): son 3 bombas con capacidad de 365 GPM cada una, y alimenta a 1500 PSI. Operan 2 continuamente y 1 se mantiene de respaldo. Potencia 650 kW. Estas reciben el agua del desareador, y descargan directamente al economizador hasta el domo.

Atemperador: de la línea de descarga de las BFP, salen tres líneas en particular, que se dirigen hacia los cabezales del sobre calentador primario 1 y el sobre calentador primario 2, para meter un espray de agua de alimentación en la tubería de vapor, para bajar la temperatura en sobre calentadores.

### **1.3.6. Monitoreo de condiciones en equipos críticos**

Se denomina análisis de condiciones debido a que se comparan las condiciones de operación de los equipos con parámetros ya establecidos por normas y tablas.

### **1.3.7. Mantenimiento predictivo**

Como su nombre lo indica este tipo de mantenimiento se basa en predicción de fallas, se diferencia de los típicos en que para que el mantenimiento sea correctivo la falla ya ha sucedido y para que el mantenimiento sea preventivo se necesita tener los equipos fuera de operación este tipo de mantenimiento es el que le sigue al mantenimiento predictivo luego de detectar la falla.

Martínez (2001), Afirma: es la aplicación racional de tecnologías de punta con el objetivo de identificar y monitorear las fallas, para planificar en forma conveniente su reparación, minimizando las pérdidas en la producción por parada de la máquina.

Martínez (2001), sostiene que: los principales éxitos de Mantenimiento Predictivo en la gran mayoría de plantas industriales, han sido los significativos ahorros que ha logrado, al evitar paradas de planta por fallas imprevistas en las máquinas principales de las líneas de producción, luego su área de responsabilidad se ha extendido a los demás equipos de la planta industrial, eliminándose paulatinamente el Mantenimiento Preventivo en la mayoría de los equipos rotativos y ejecutándose los mantenimientos a solucionar fallas específicas que presentan cada máquina en particular.

Emerson Process Management (s.f.) afirma que el mantenimiento predictivo es el mejor que el mantenimiento preventivo debido a que por medio de este se puede predecir problemas potenciales, así como se puede definir el momento oportuno para aplicar el mantenimiento, ya que con la detección de fallas de fallas se puede aumentar la producción y planificar de mejor manera los mantenimientos correctivos que se requieran en los equipos prolongando la operación de estos.

### **1.3.8. Principales objetivos de mantenimiento predictivo**

- Minimizar las pérdidas por tiempos perdidos en la planta generadora.
- Reducir los costos de mantenimiento correctivo.
- Minimizar las fallas durante la operación.
- Realizar un plan de mantenimiento preventivo específico únicamente cuando es necesario.
- Mantener confiabilidad de los equipos.

### **1.3.9. Ventajas del mantenimiento predictivo**

- Maximizar la vida útil de los elementos de las máquinas y equipo.
- Permite visualizar la evolución de una falla en el tiempo.
- Permite administrar al personal de mantenimiento de manera correcta.
- Permite crearle un registro de trazabilidad de condiciones a las máquinas y los equipos.
- Facilita el análisis de las fallas.
- Permite el análisis estadístico del comportamiento de las máquinas y los equipos.
- Permite crear un programa de paros en programados antes que suceda la falla.

- Optimiza las labores de mantenimiento.
- Minimiza el consumo de repuestos.
- Aumenta la confiabilidad y disponibilidad de las máquinas.

### **1.3.10. Monitoreo del aceite lubricante**

Este tipo de análisis de condiciones se lleva a cabo al extraer de los equipos críticos a analizar una pequeña muestra de aceite de la maquina o equipo en funcionamiento y se analiza en laboratorios específicos que se encargan de brindar un diagnóstico de las condiciones del aceite.

Martínez (2001) Afirma: hay varias técnicas disponibles, sin embargo, es importante no olvidar lo siguiente:

- Visual, inspección del almacenaje a granel para ver señales de agua o aeración severa, el color resaltará cualquier cambio del estado de aceite.
- Olores, los olores picantes indicarán oxidación del aceite y aditivos, los olores desagradables indicarán el crecimiento microbiano.
- La prueba del papel secante es útil en aceites para motores diésel, varios problemas son identificados fácilmente, tales como: productos de oxidación, lodo, glicol y agua.
- La prueba del chasquido de la humedad, cuando la humedad o el agua está presente en el aceite, será evidente con un chasquido, cuando el aceite se somete a una alta temperatura, al dejar caer una gota sobre una plancha caliente (>125 °C) y se escucha el chasquido, si no se oye entonces el aceite está debajo del punto de saturación.
- La vida del Filtro, la vida corta del elemento del filtro identificará el problema real, el cual requiere ser analizado.

### **1.3.11. Monitoreo de vibraciones**

Este tipo de monitoreo de condiciones es quizás el más importante a desarrollarse en una planta, debido a que muestra las condiciones de operación actuales, además es muy amplio ya que es aplicable tanto a transmisiones de cadenas, reductores con engranajes, hasta rodamientos, que se encuentran como elementos rodantes en las máquinas y equipos en la planga de generación.

Cada uno de los equipos rotativos generan una vibración distinta la cual brinda condiciones de ruido característico que dejan una huella con el cual se puede determinar un patrón normal. Cuando existen variaciones en los patrones determinados como normales se pueden detectar de manera temprana, estos patrones anormales se denominan fallas con las cuales se puede clasificar el problema y atacarlo de modo programado.

El análisis de vibraciones brinda el diagnóstico, con el cual se determina por medio de los resultados si es necesario llevar a cabo acciones inmediatas o bien monitorear el comportamiento de los equipos para las próximas revisiones, donde se debe considerar tener los repuestos y equipos necesarios para su reparación de manera programada, con lo cual se busca disminuir los costos por paros no programados y adquisición de repuestos por emergencia.

Para llevar a cabo un análisis adecuado de condiciones en equipos rotativos donde se tiene como base el monitoreo de vibraciones en equipos rotativos se deben considerar 3 fases o etapas claves para determinar en qué momento es el óptimo para realizar el mantenimiento.

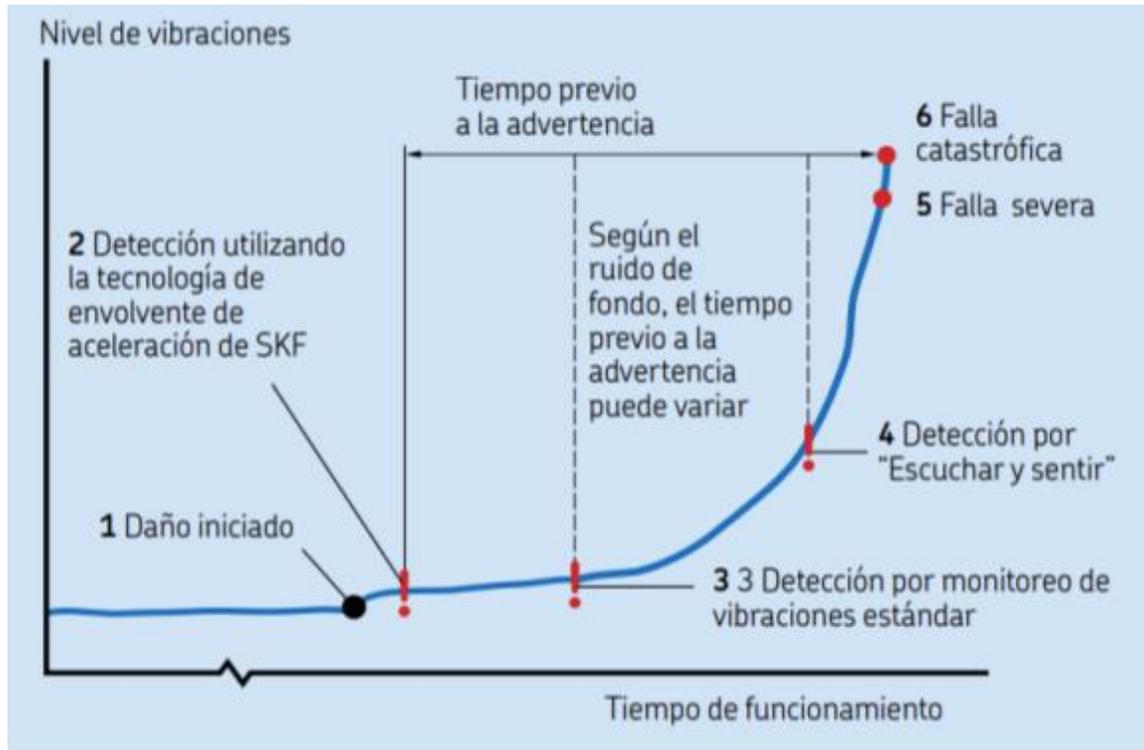
La primera etapa es la detección: en ella se determina el tipo de falla que se presenta en los equipos rotativos, esta etapa es crucial ya que en ella se debe

obtener la mayor cantidad de información del funcionamiento y del ambiente en el cual está sometido el equipo para obtener un análisis más efectivo sobre la situación de la falla. El monitoreo adecuado de vibraciones brinda la oportunidad de detectar la mayoría de posibles fallas de modo anticipado, con lo cual se tendrá el tiempo suficiente para la planificación de un adecuado mantenimiento de los equipos.

La segunda etapa es el monitoreo: se basa en la información obtenida en la detección y luego de analizar el tipo de falla así como su gravedad se determina la frecuencia con la cual se lleva a cabo el monitoreo de los equipos, dándole especial importancia a los equipos en los cuales se haya determinado algún tipo de falla, esto se realiza con la finalidad de realizar el trabajo de mantenimiento en el momento adecuado, dándole el mayor tiempo de operación a los equipos mientras aún se encuentran en etapa de control o riesgo controlado.

La tercera etapa es la corrección: esta etapa consiste en reemplazar los adiamientos que se encuentran en falla en los equipos analizados y determinados como críticos. Es fundamental detectar la causa raíz de la falla para trabajar en brindarle una solución definitiva o bien mitigar el riesgo de que vuelva a suceder durante la operación de los equipos, estas causas muchas veces son identificadas desde la etapa de la detección y si se pueden mitigar desde ese momento es idóneo realizarlo o bien formar un plan de acción para realizarlo.

Figura 7. **Comportamiento de las fallas en equipos rotativos**



Fuente: Grupo SKF (2017). *La ventaja del monitoreo avanzado de la condición.*

Grupo SKF (2017), presenta una gráfica característica del comportamiento de las fallas que se tienen en la operación de equipos rotativos, donde se prioriza el uso de la tecnología para determinar y monitorear las fallas en los mismos.

Básicamente en la figura 7 se debe considerar que las detecciones de las fallas en los equipos se dan por lo regular en el punto 2, siempre que se cuente con la planificación del monitoreo de vibraciones adecuado y constante de los equipos, la etapa siguiente corresponde al monitoreo del equipo el cual se realiza de manera periódica para determinar el estado actual de estos para prolongar la operación del equipo y no realizar la corrección desde la detección, con ello se

logra tener una operación más eficiente, esto al dejar que el equipo trabaje de manera normal desde el punto 2 hasta el punto 4 y realizar la gestión para la obtención de los recursos necesarios para realizar la corrección antes de llegar al punto 5, de no hacerse así podría causar daños significativos en los elementos internos de los equipos.

Martínez (2001), afirma que el control y análisis vibracional espectral es la herramienta principal del mantenimiento predictivo, se basa en que las máquinas tienen un nivel normal de vibración, como resultado de estar dentro de las tolerancias de las especificaciones de fabricación, montaje y operación.

Martínez (2001), afirma que si hay algún parámetro fuera de especificación entonces es una falla que causará el incremento del nivel vibracional, esta falla puede ser identificada por su comportamiento dinámico (amplitud, frecuencia y ángulo de fase).

Las principales fallas detectadas por medio del monitoreo de vibraciones son las siguientes:

- Fallas por lubricación: estas se pueden dar por exceso o falta de lubricación en los elementos rotativos o bien por la aplicación de un lubricante incorrecto.
- Fallas por contaminación: los elementos rodantes de un equipo rotativo son muy susceptibles a este tipo de falla esto se debe a que las condiciones de operación de estos no siempre son controladas y existe mucha contaminación o particulado en el ambiente, así como la existencia de agua o saturación en el mismo.

- Fallas internas: se refiere a las fallas que se dan en los componentes internos de los equipos rotativos, tales como fisuras, desgastes, rupturas de estos, que generan una vibración fuera del parámetro normal de la operación del equipo.
- Fallas por montaje: estas fallas se refieren a las que se dan por montaje inapropiado de los elementos rotativos o bien por el montaje inapropiado del equipo como tal.
- Fallas de soportes: se refiere a las fallas que se dan en las bases de los equipos rotativos, así como el daño de las bases de los elementos rodantes, pueden darse fallas por solturas o por exceso de sujeción.
- Fallas por desalineación: estas fallas son muy comunes y se dan en el momento que un equipo rotativo este compuesto por una parte motriz y otra conducida las cuales deben estar perfectamente alineadas en sus ejes tanto en orientación angular como en orientación paralela tanto horizontal como vertical.
- Fallas por desbalance: esta falla se tiene en equipos rotativos tienen una carga diferente en alguno de los puntos sobre el eje de rotación causando fricción y por consiguiente calor que daña severamente los elementos rotativos.
- Fallas eléctricas: estas se dan básicamente en equipos conducidos donde se cuenta con motores y existe una influencia electromagnética, que afecta la operación normal del equipo.

- Fallas externas: se refiere a las fallas causadas en los equipos debido a la influencia otro equipo o bien de la operación simultanea que causa alguna sobrecarga en estos que genera una vibración anormal en los equipos

## 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizó identificando los equipos denominados críticos para la operación continua de la planta. Estos equipos denominados críticos conllevan un nivel de riesgo alto al momento de fallar. No obstante, para que estos equipos fallen se presentan alarmas físicas que permiten predecir las fallas que pueden suceder. De esta manera, se propondrá el plan de trabajo para mitigar el posible riesgo identificado.

Los equipos determinados como críticos fueron los siguientes:

### Motor y bomba

- Bomba de agua de alimentación 1
- Bomba de agua de alimentación 2
- Bomba de agua de alimentación 3
- Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1
- Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2
- Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3

### Motor y ventilador

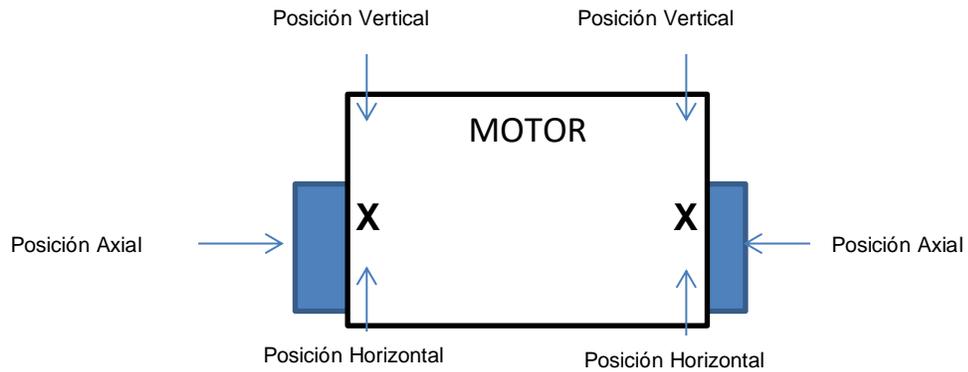
- Ventilador de tiro inducido 1
- Ventilador de tiro inducido 2
- Ventilador de tiro forzado primario 1
- Ventilador de tiro forzado primario 2
- Ventilador de tiro forzado secundario 1

- Ventilador de tiro forzado secundario 2
- Motor de ventilador de torre de enfriamiento 1
- Motor de ventilador de torre de enfriamiento 2
- Motor de ventilador neumático de aire de alimentación de carbón

Luego de identificar los equipos críticos se determinaron cuáles eran sus condiciones iniciales de operación. Esto se debe realizar, de preferencia, en equipos nuevos luego de la correcta instalación siempre basándose en las especificaciones del fabricante. En este caso se contaba con equipos con poco tiempo de funcionamiento cuando se iniciaron las mediciones a los equipos rotativos. Sobre la base de su robustez y que se diseñaron para funcionamientos continuos prolongados pueden tomarse como fiable las mediciones obtenidas.

Estas mediciones se realizaron en tres posiciones mediante el uso de un sensor de análisis de vibraciones llamado acelerómetro que se debe colocar en 3 posiciones diferentes para tener una perspectiva completa de la manera en la que se encuentra trabajando el equipo, las cuales son Vertical, Horizontal y Axial, cada una brinda información de las posibles fallas que pudieran haberse dado en los equipos analizados, estas mediciones se tomaron en los puntos más cercanos a los elementos rodantes como lo rodamientos, engranajes, tejas, entre otros. Es por ello que por cada equipo es necesario tomar varias mediciones.

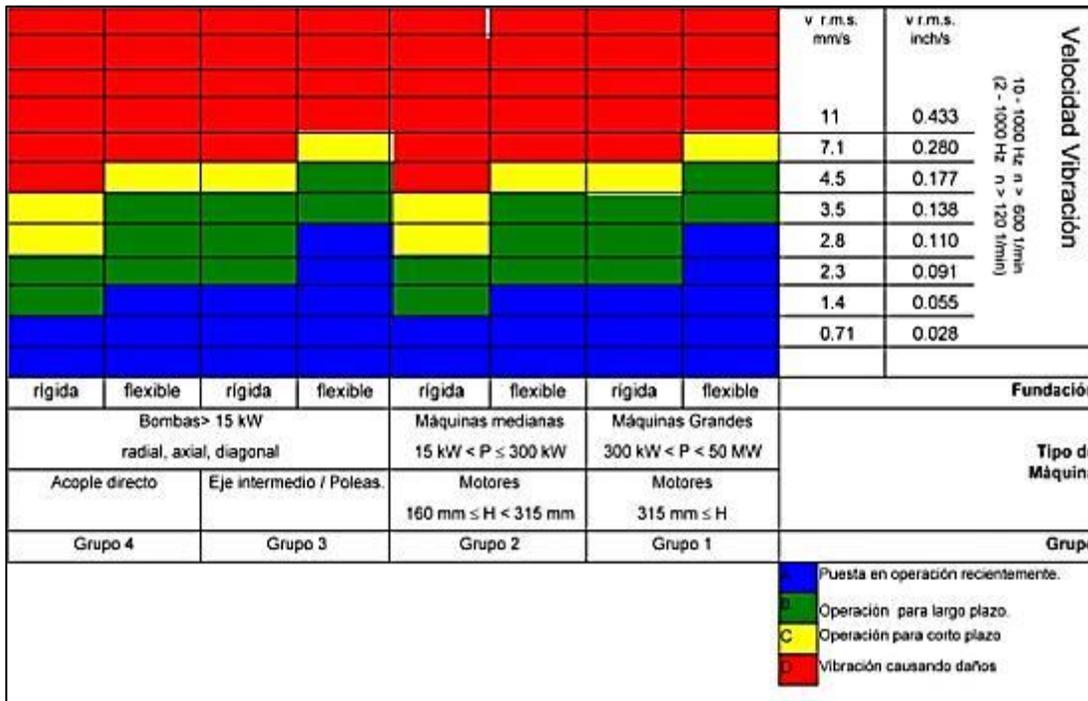
Figura 8. **Diagrama tipo posiciones de medición en equipos rotativos**



Fuente: elaboración propia.

Luego se compararon los primeros datos obtenidos en RMS (mm/s) de los equipos críticos con la tabla de análisis de vibraciones en velocidad de la Norma ISO 10816-3 para determinar si se encontraban en condiciones óptimas de operación a largo plazo de acuerdo con el tamaño y potencia de los equipos. Además, se debe determinar si el tipo de acople es rígido (menor resistencia a la vibración axial ya que opone más resistencia al torque del motor) o bien si es flexible (tiene mayor resistencia a la vibración axial).

Figura 9. Diagrama tipo de máquinas



Fuente: Norma ISO 10816-3. Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, potencia o altura de eje. Consultado el 25 de mayo de 2020. Recuperado de <https://www.rodamientos.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>.

Teniendo los equipos críticos, las condiciones iniciales de funcionamiento y el rango de parámetros de operación de estos, se obtuvo información básica de su funcionamiento para dar paso a la implementación del monitoreo de condiciones en equipos rotativos. Dada la necesidad de un monitoreo periódico, se crearon formatos específicos para cada equipo crítico. Posteriormente, se analizó la tendencia de comportamiento a lo largo del periodo de producción de energía. Se recolectaron los datos y se canalizaron por medio de una hoja de Excel en donde se analizaron las tendencias de condiciones. De esta manera se detectaron tempranamente las posibles fallas que pudieron causar paros no programados.

Con esto se logró alcanzar que la generación fuera continua, ya que, al momento de identificar tempranamente posibles fallas en los equipos críticos, se planificó el mantenimiento adecuado, con los repuestos, personal y equipos necesarios para realizarlo de manera eficiente. Además, se gestionaron los permisos con el AMM para no incumplir con la programación semanal.

Simultáneo a los análisis de equipos rotativos se llevaron a cabo las tendencias de productividad obtenidas del proceso completo de acuerdo con los diseños kW/t de combustible, así como las eficiencias de los equipos por separado mostrados de manera de indicadores de producción los cuales no fueron incluidos en el marco metodológico pero que fueron útiles para detectar si se está teniendo alguna ineficiencia en el ciclo completo en alguna parte y así poder analizar por separado también cada parte del proceso.

Durante el periodo de generación con bagazo mientras se realizó la propuesta se logró tener un impacto significativo en los resultados ya que a pesar de las fluctuaciones de los procesos combinados que se tienen con el área de proceso de fabricación de azúcar se lograron obtener buenos resultados logrando que las metas de producción se cumplieran logrando las productividades deseadas.

Simultáneamente, se diseñó un programa de mantenimiento predictivo para darle seguimiento a las condiciones de operación periódicamente en este programa se agregaron las mediciones de termografía y análisis de lubricantes además del análisis de condiciones rotativas.

Se creó también un plan de calidad de mantenimiento predictivo el cual se integró al sistema de gestión como parte del sistema de gestión de calidad del departamento.

Se trabajó también en la gestión de costos con relación al proceso de generación implementando un comodín para cada dos puestos de operación. En este plan se designa un día de descanso para los colaboradores de los tres turnos. Como resultado, el comodín cubrirá 3 días un puesto en cada turno y 3 días en el otro puesto de trabajo. El séptimo día le correspondería el descanso, ya que la operación de la planta es continua. Los turnos de los colaboradores eran demasiado desgastantes y el tiempo de descanso era insuficiente por lo cual podían provocar riesgos en la operación o para los operarios, por ello, además, se analizaron los costos con lo cual se demostró que la implementación del plan del comodín contribuyó a la mejora de esos aspectos.

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Diagnóstico

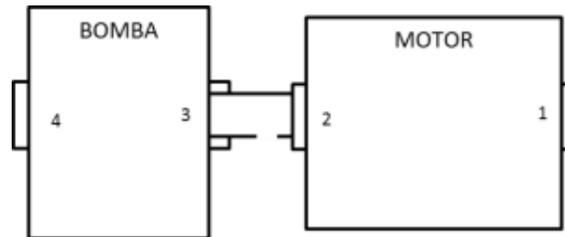
Determinar las condiciones iniciales de operación de las máquinas rotativas y las posibles fallas que podrían darse en las mismas que afectarían la productividad de generación de energía.

Figura 10. Bomba de agua de alimentación 1



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 11. **Diagrama de equipo**



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 640kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites de condiciones operacionales:

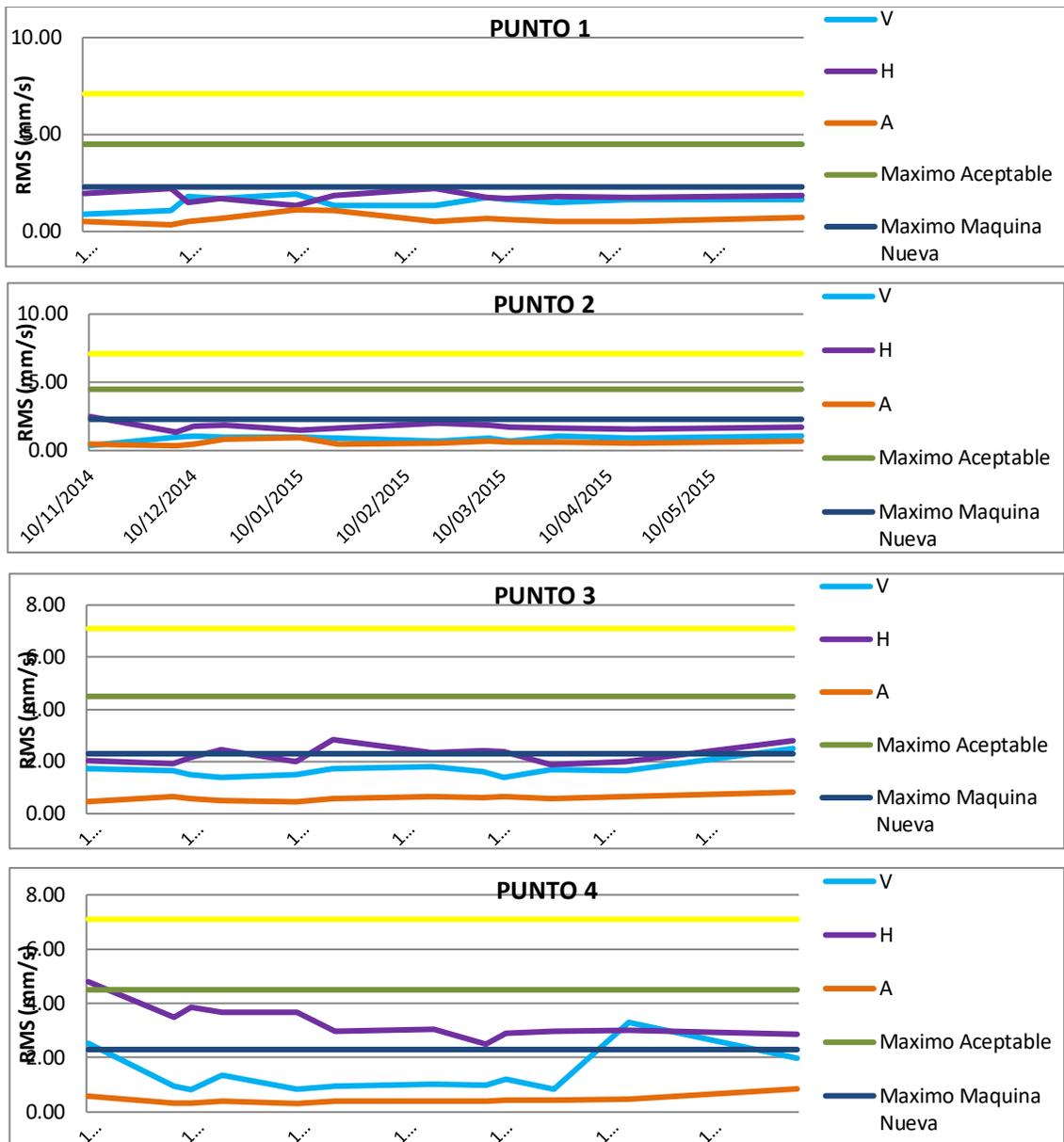
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo, se determina que los valores que van de 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

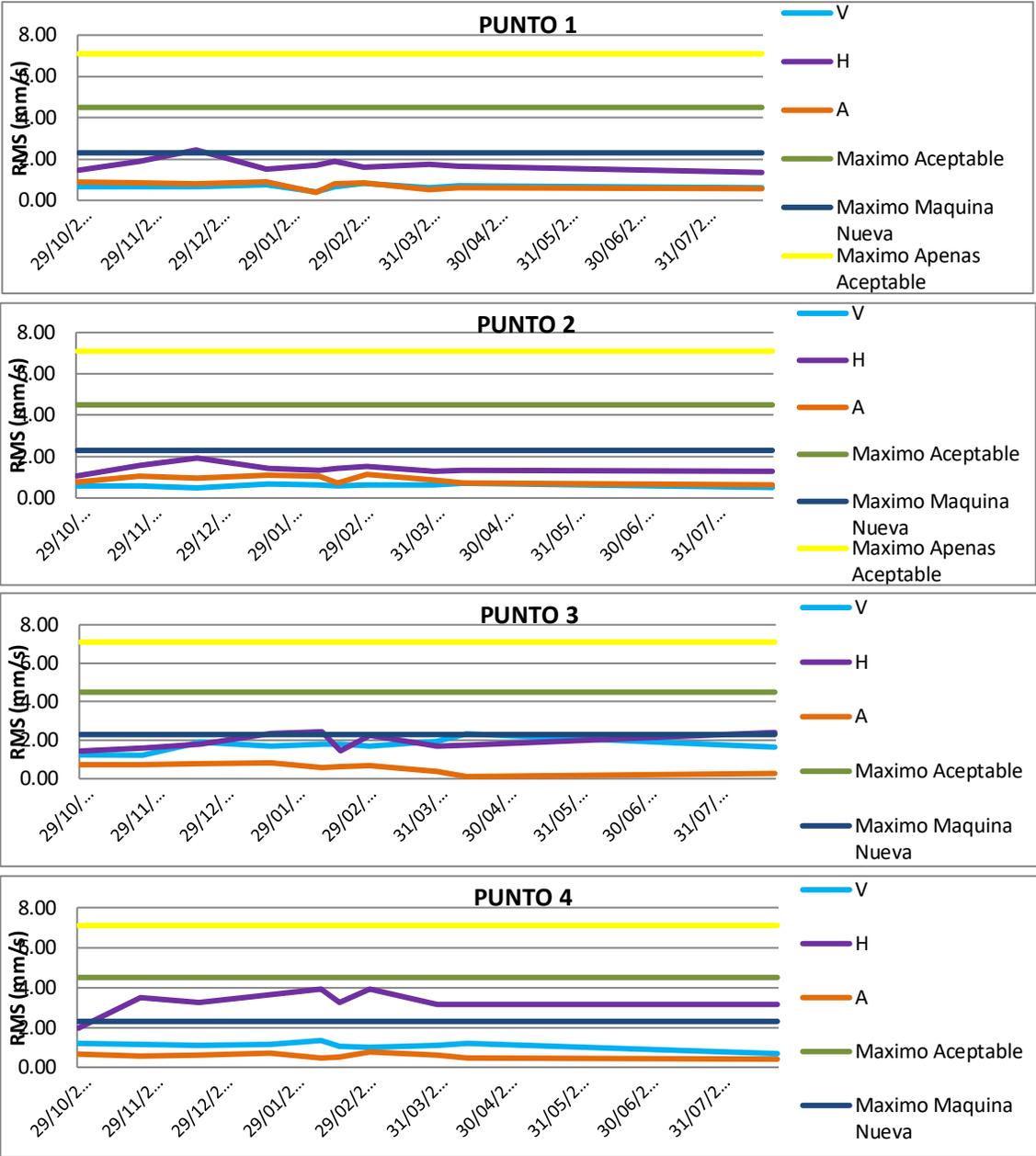
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición Vertical, Horizontal y Axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 12. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de bomba de agua de alimentación 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



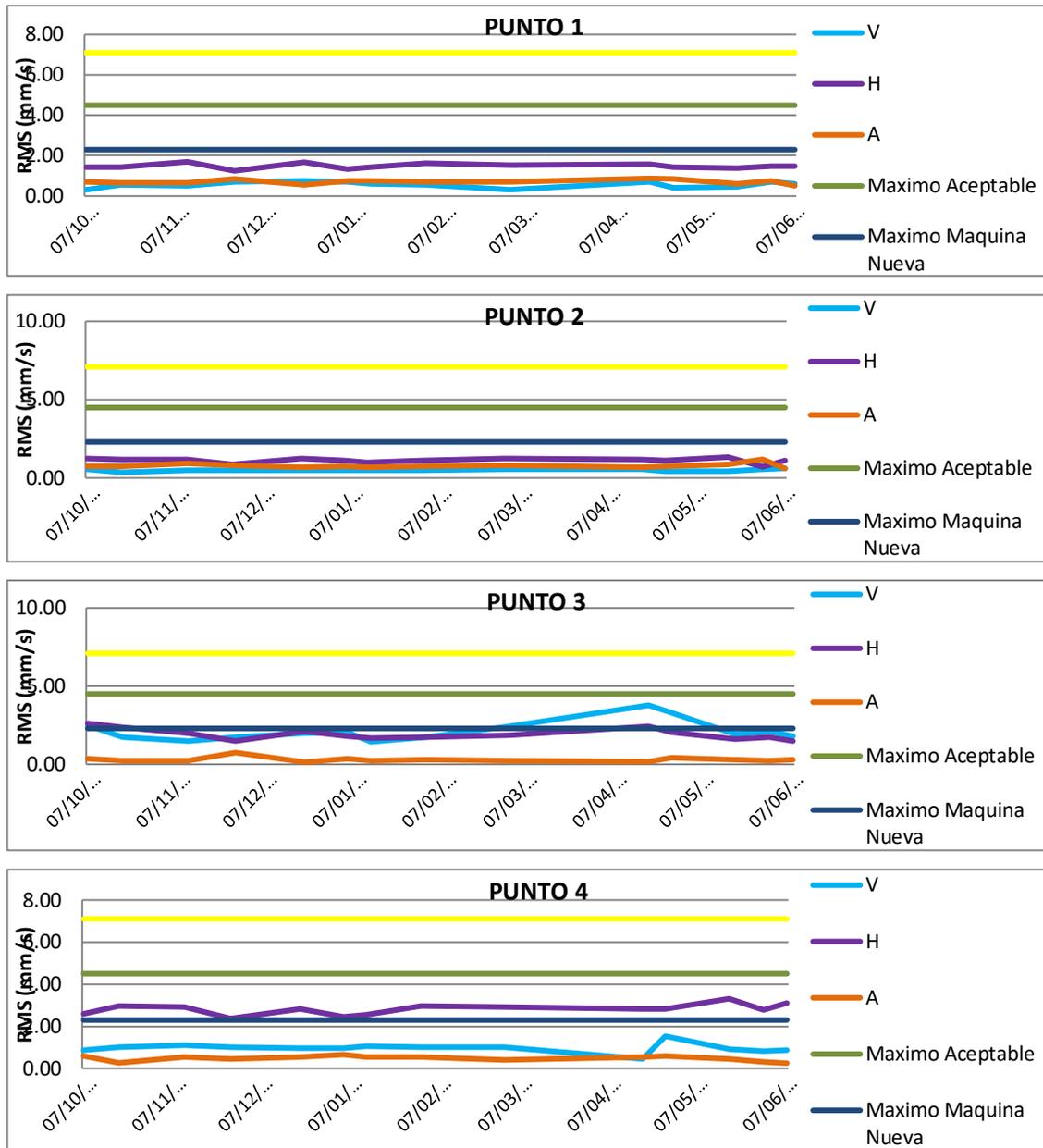
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de alimentación 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de alimentación 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



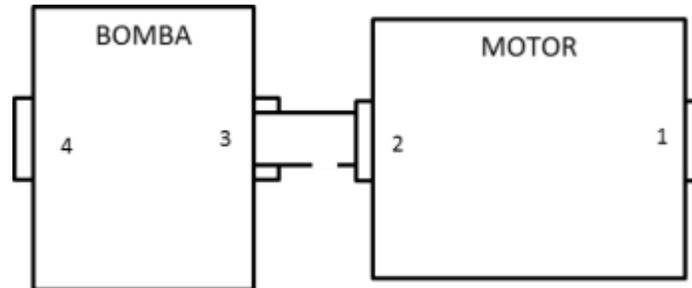
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Bomba de agua de alimentación 2



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 16. **Diagrama de equipo**



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 640kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

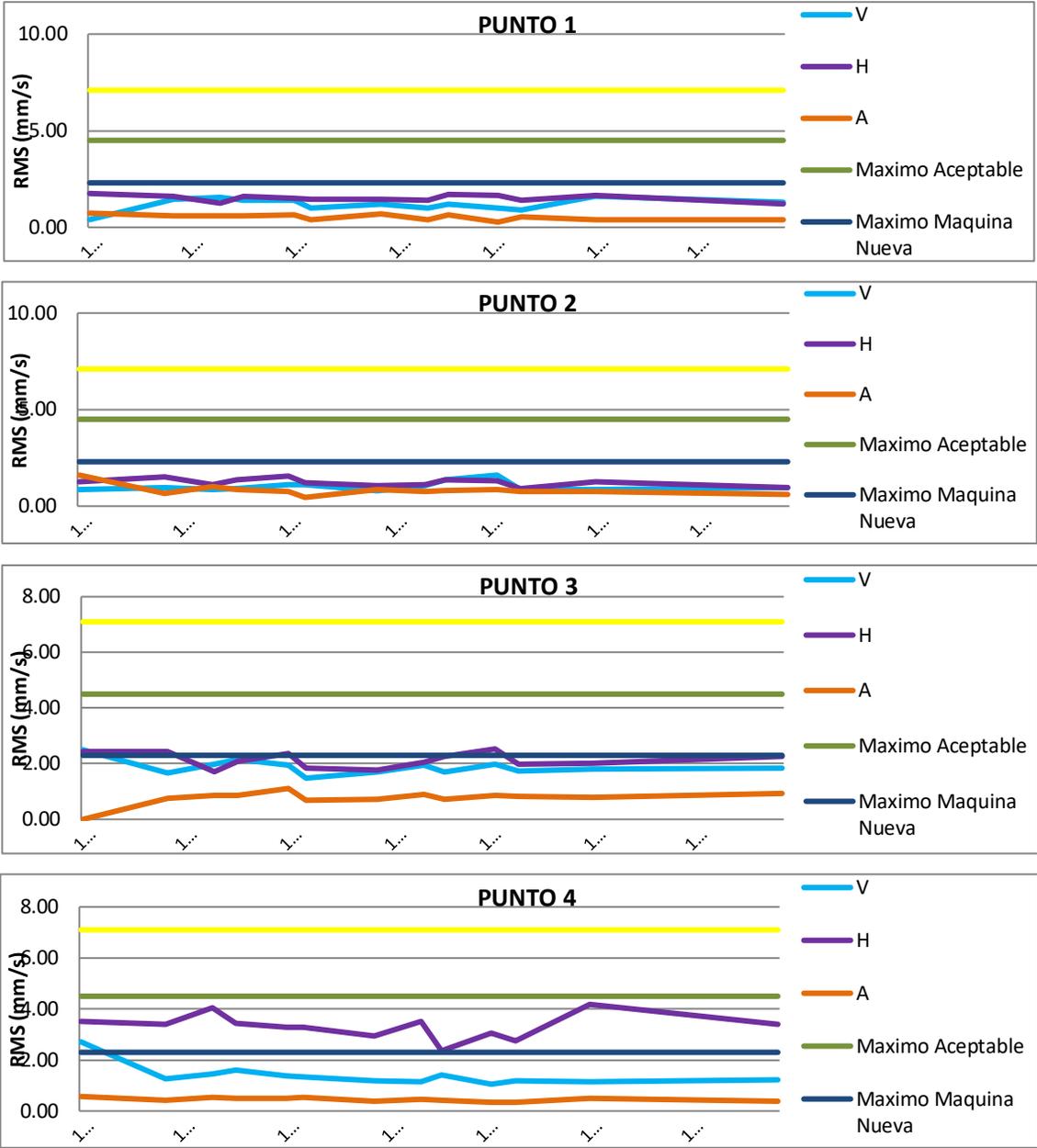
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

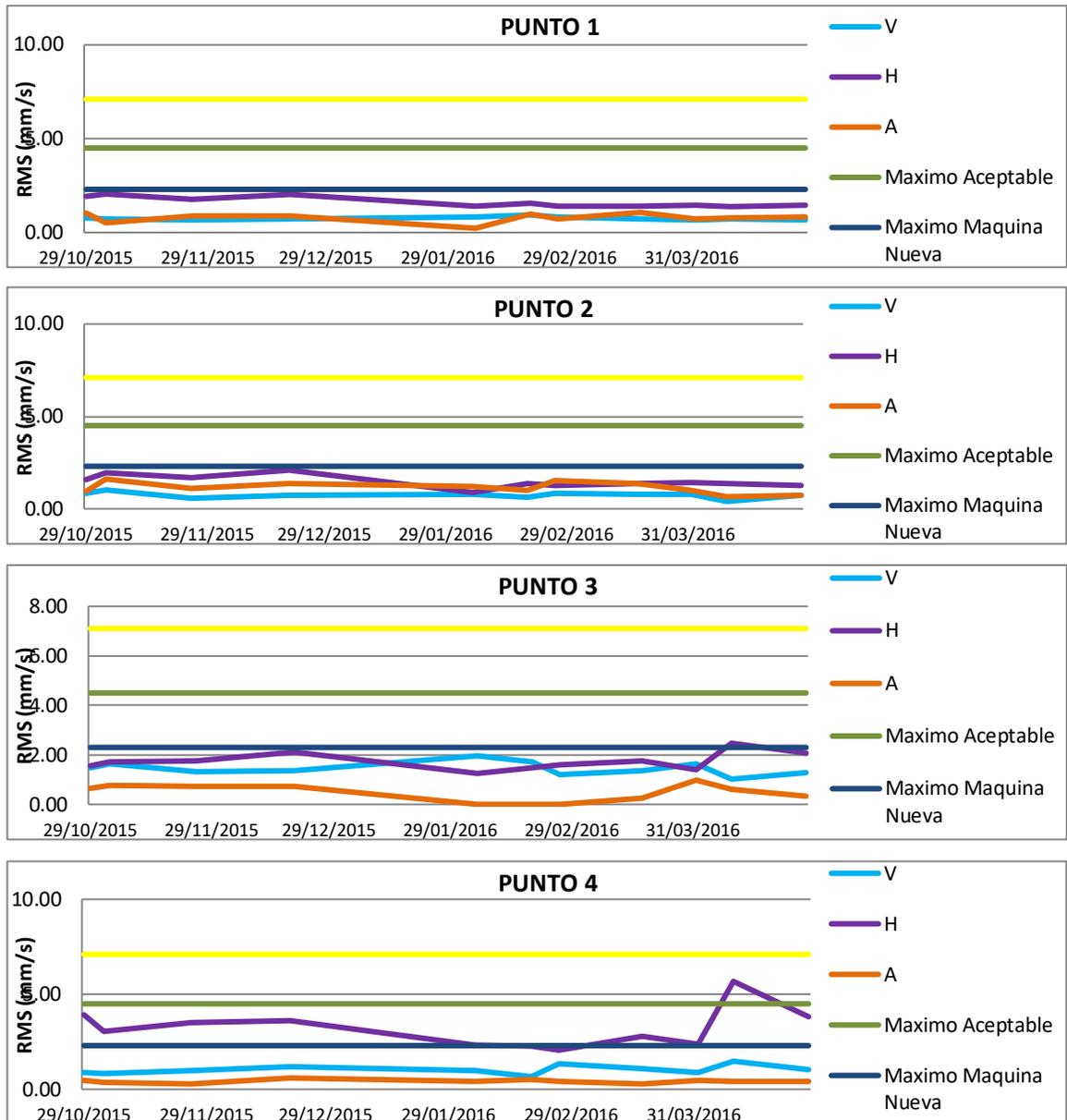
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 17. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de bomba de agua de alimentación 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



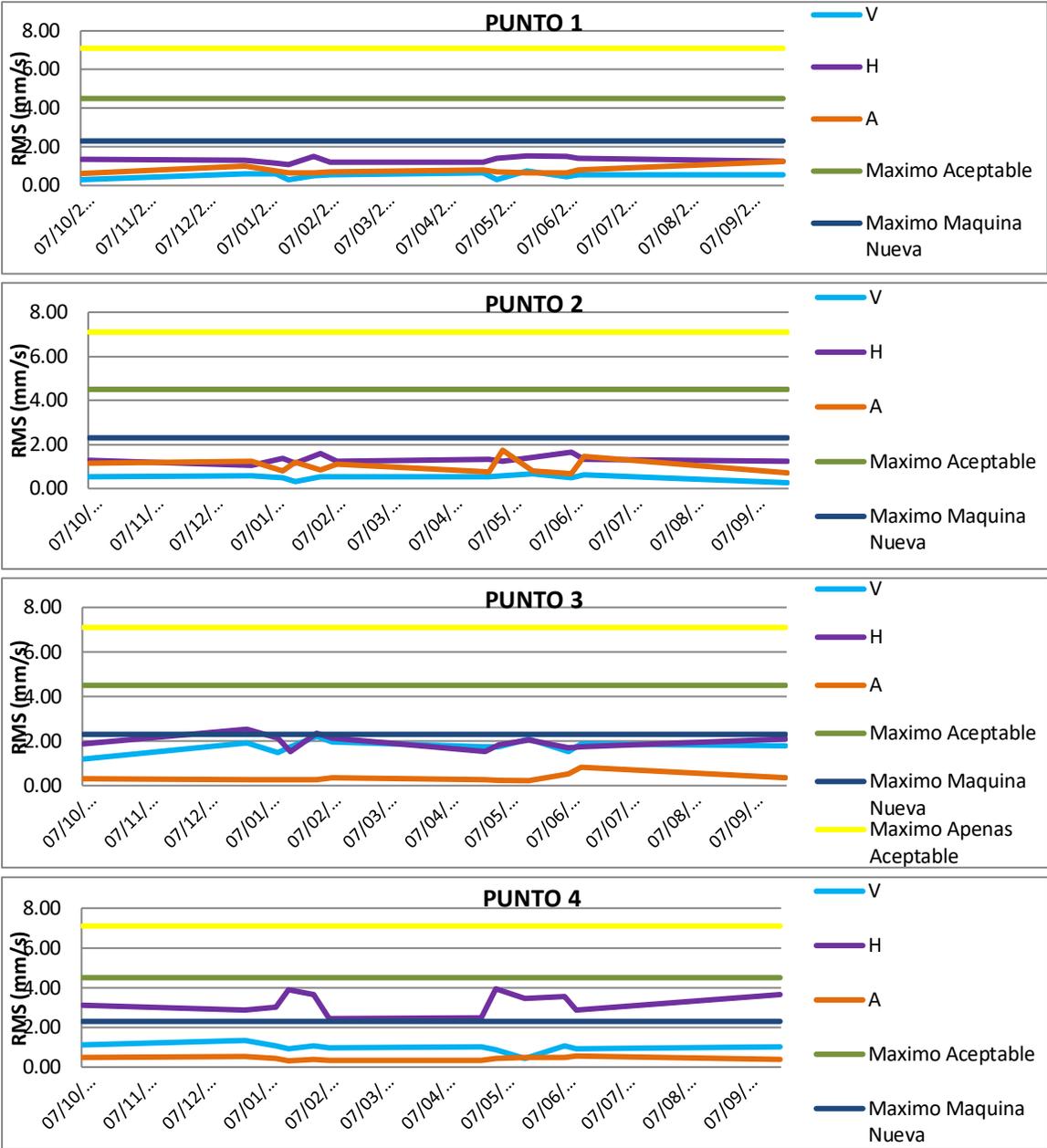
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de alimentación 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



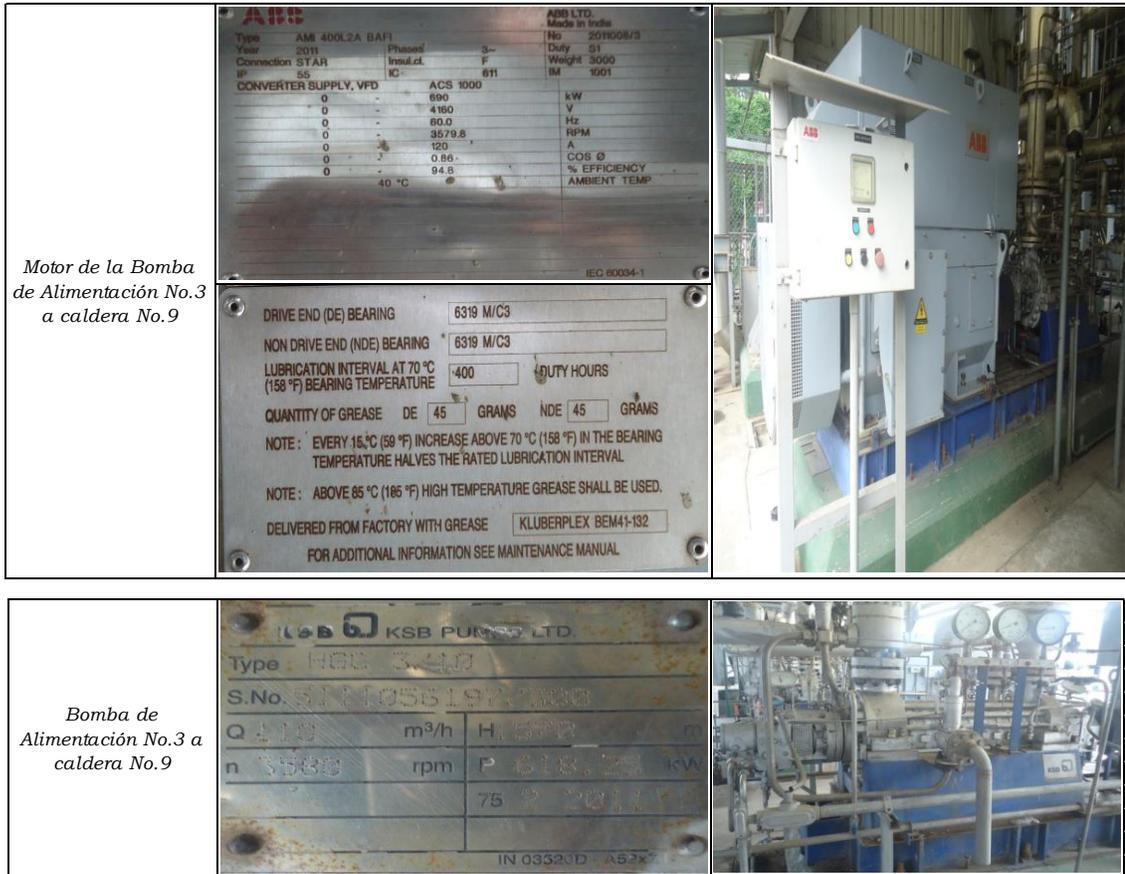
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de alimentación 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



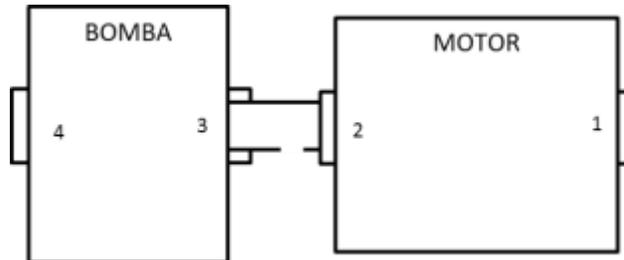
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Bomba de agua de alimentación 3



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 21. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 640kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

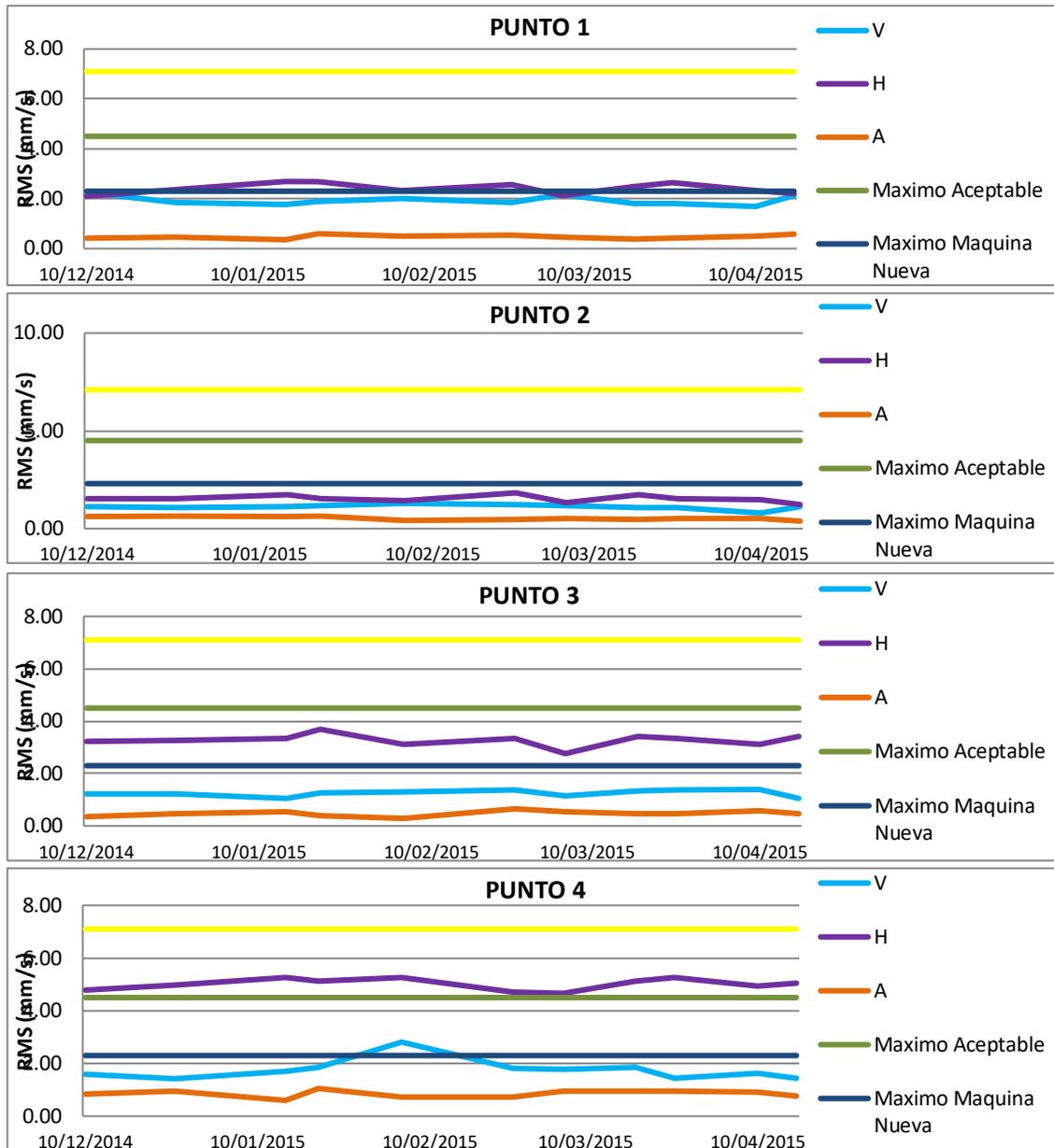
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo, se determina que los valores entre 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

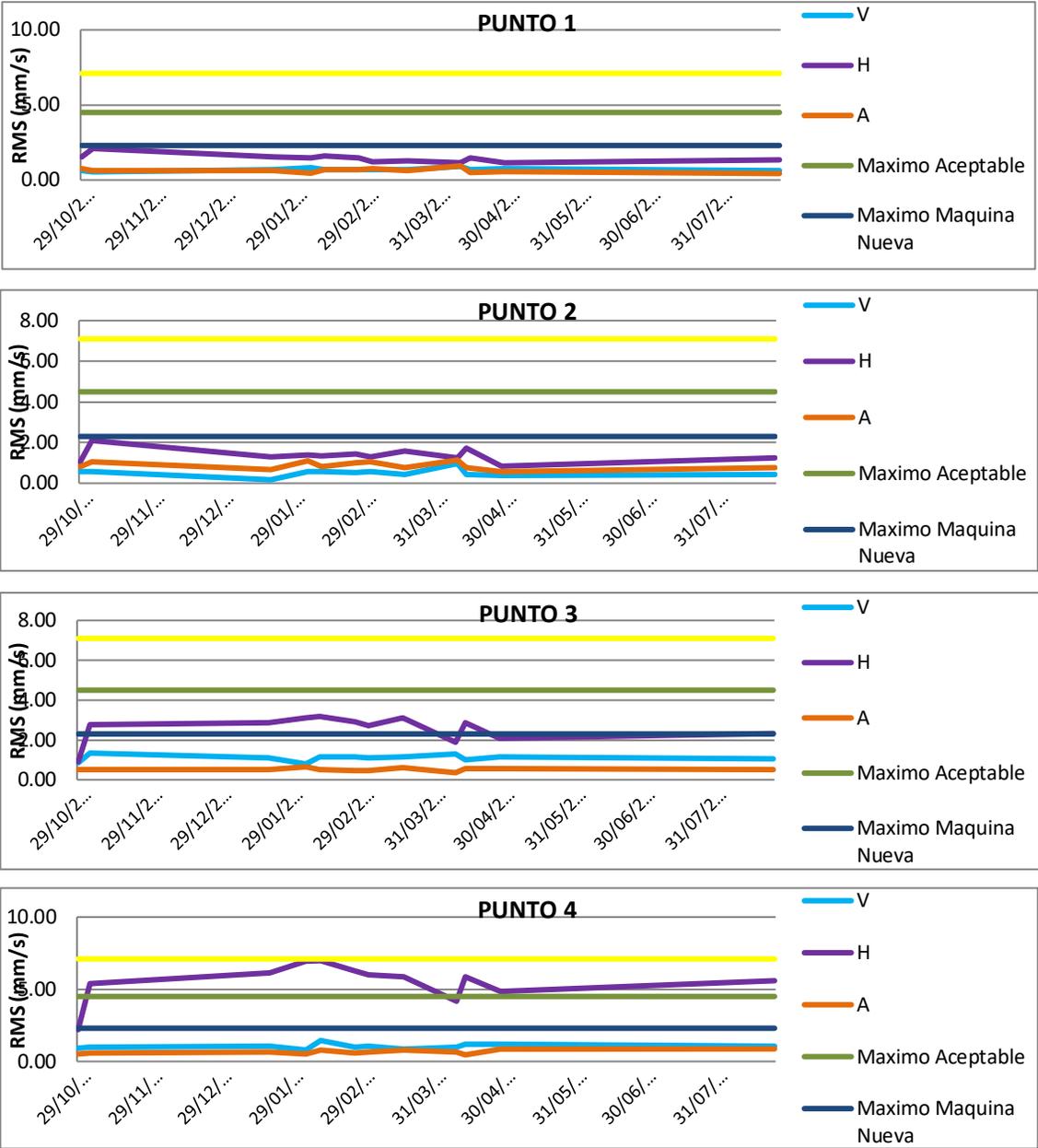
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 22. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de bomba de agua de alimentación 3 en los 4 puntos de análisis determinados**



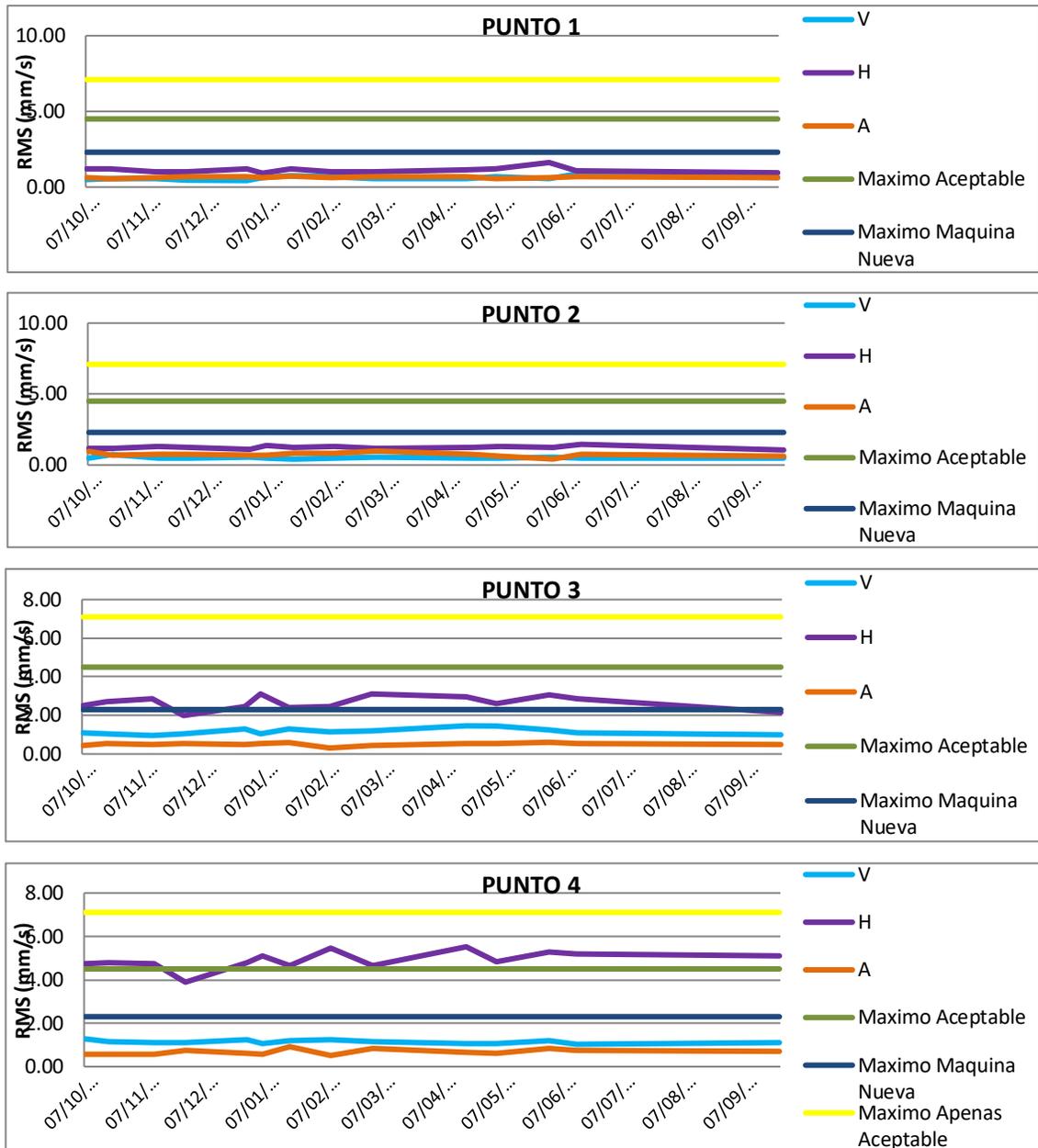
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de alimentación 3 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de alimentación 3 en los 4 puntos de análisis determinados**



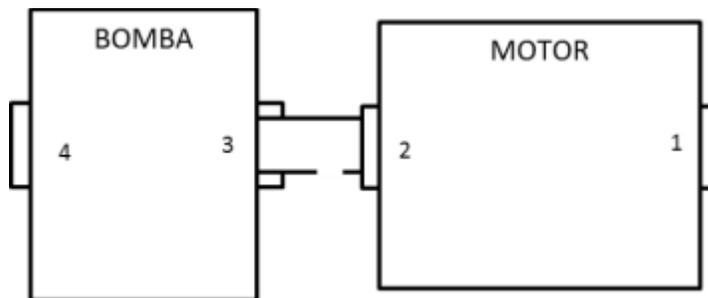
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1**



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 26. **Diagrama de equipo**



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 447.42kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

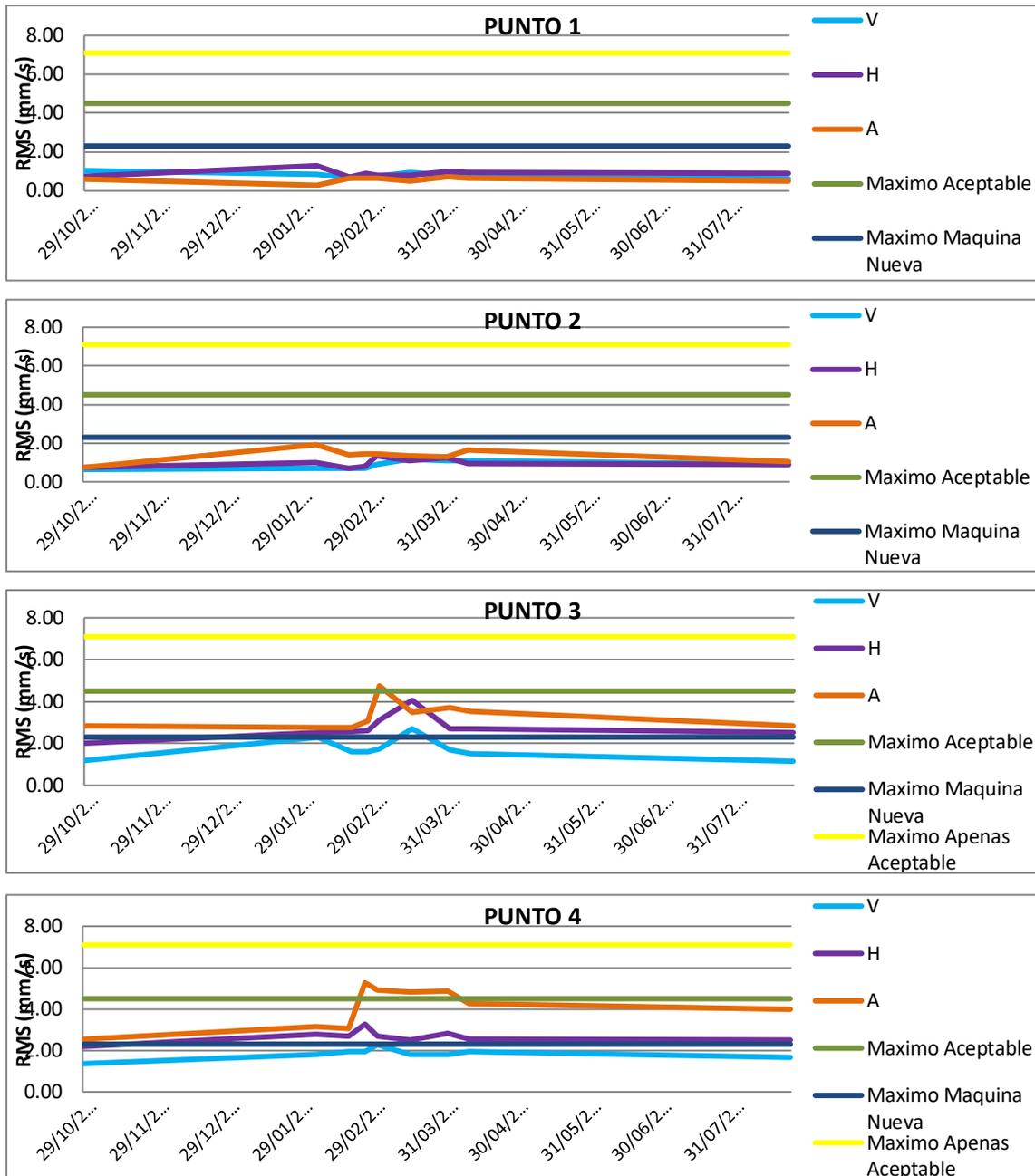
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo, se determina que los valores entre 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

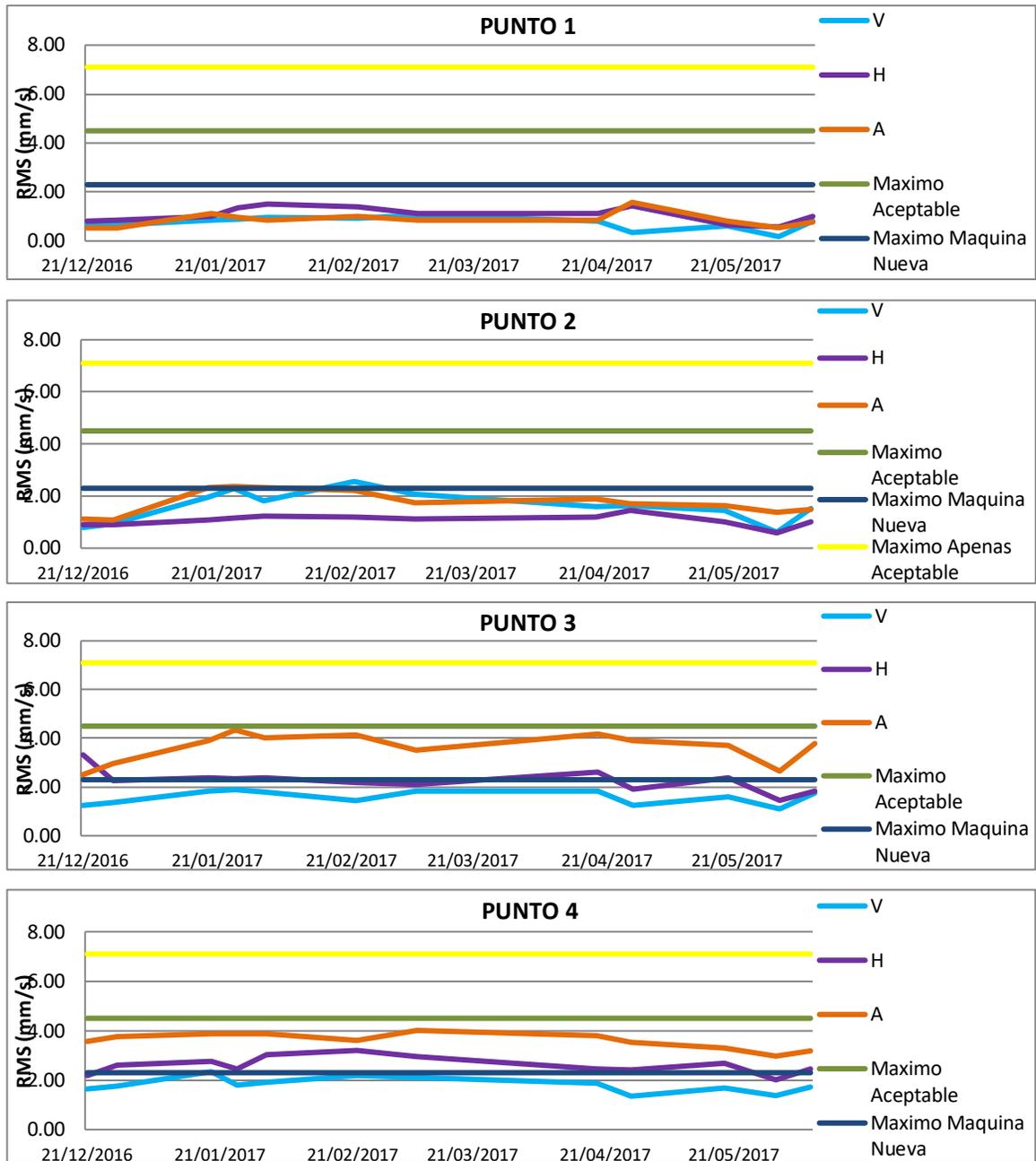
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 27. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1 en los 4 puntos determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 1 en los 4 puntos determinados**



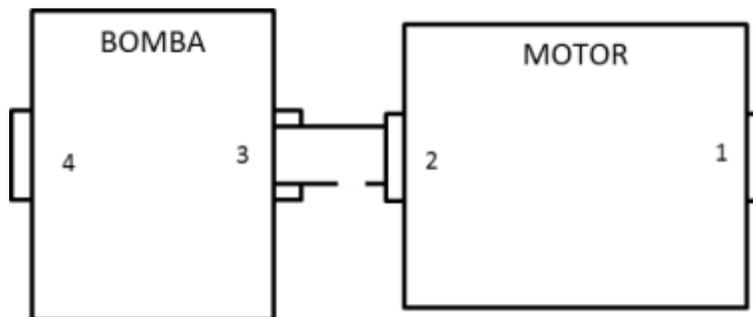
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2**



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 30. **Diagrama de equipo**



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 447.42kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

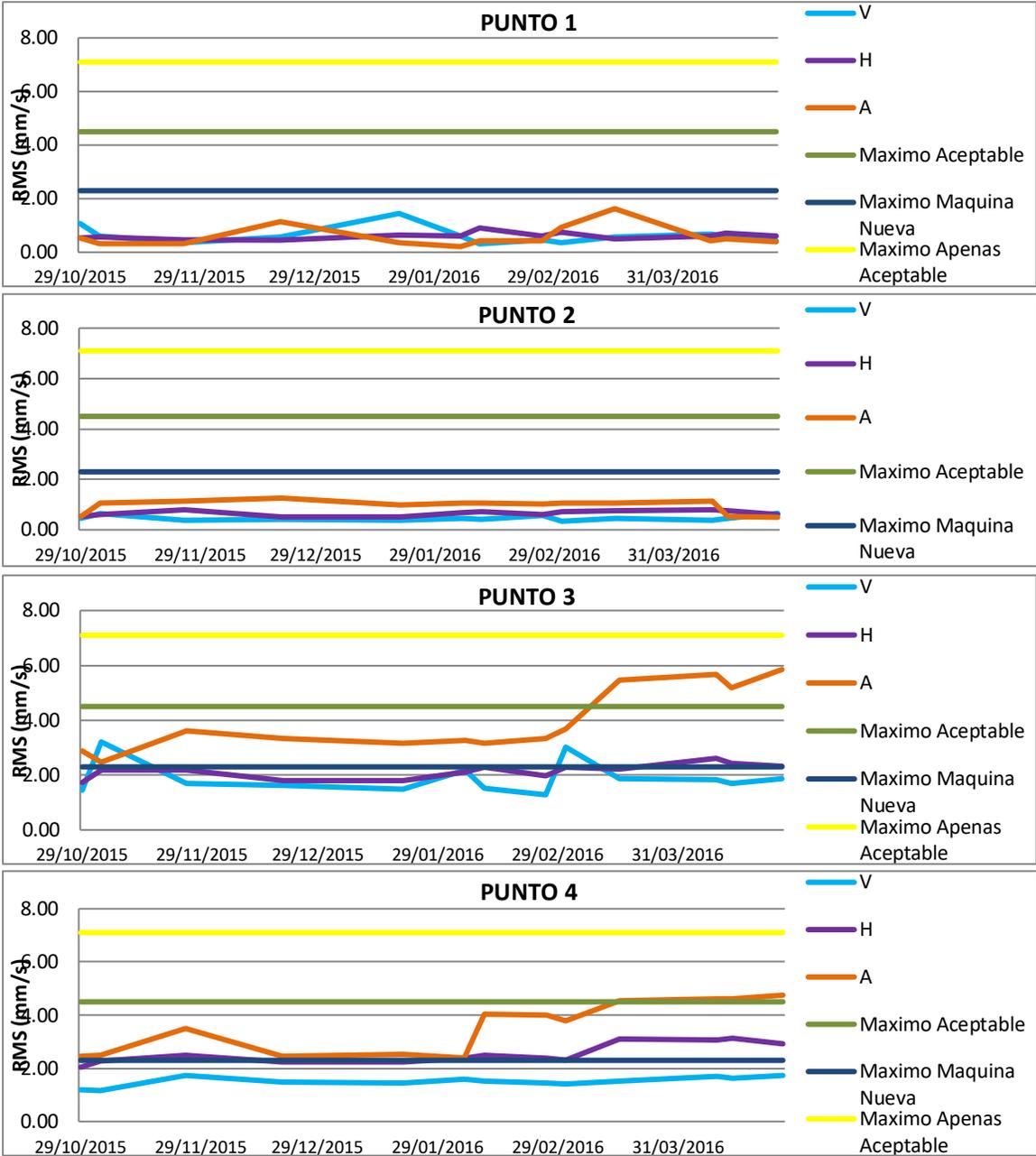
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

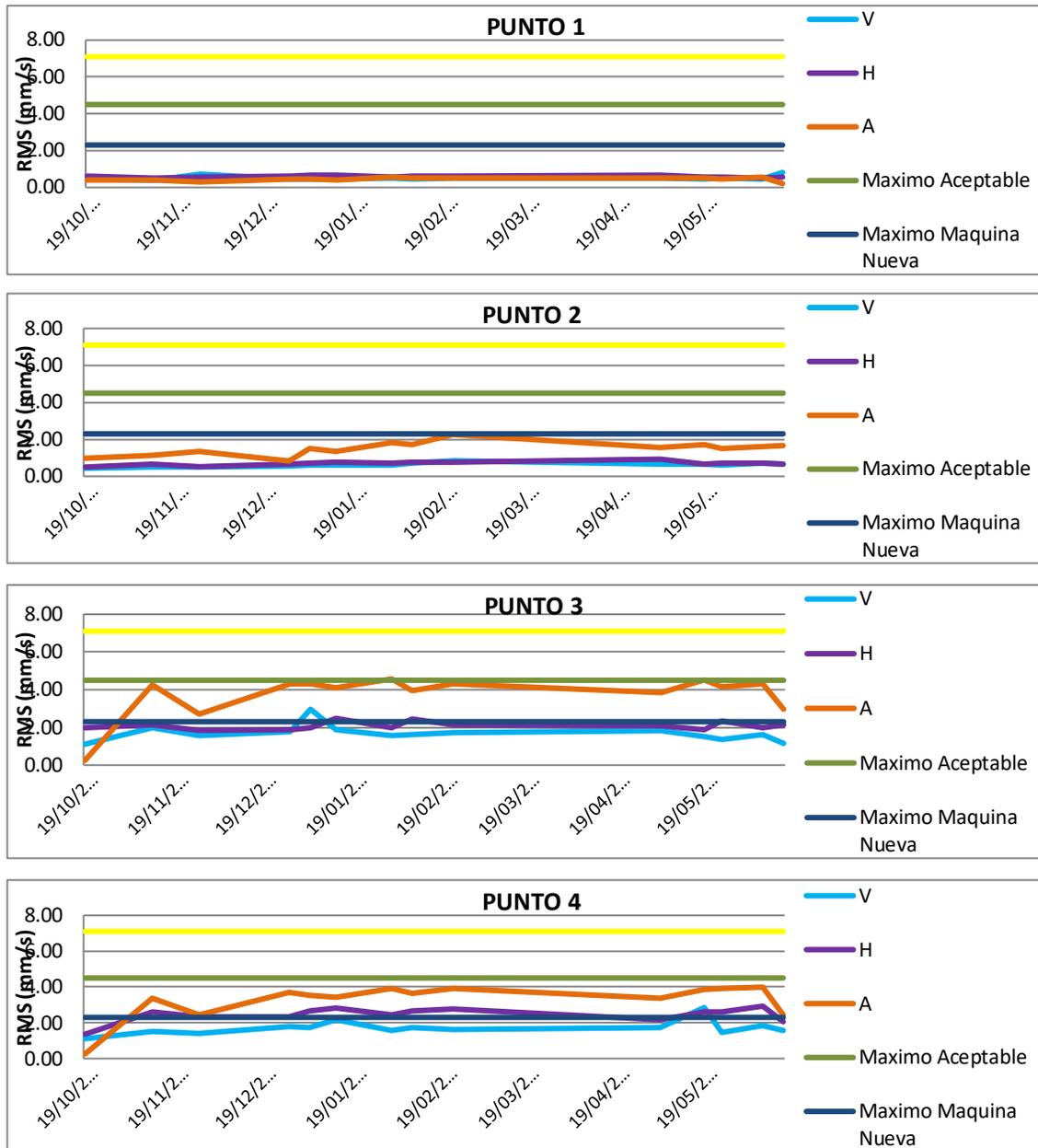
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 31. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos determinados**



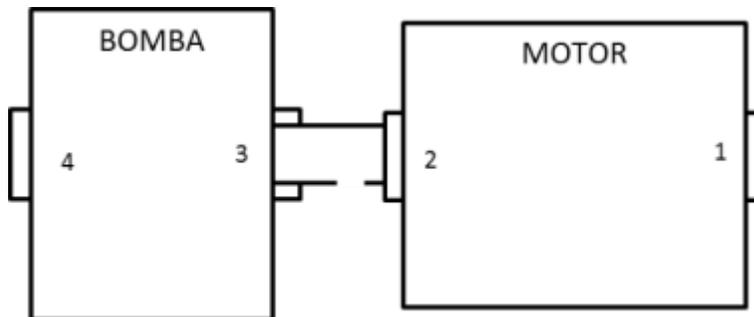
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3**



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 34. **Diagrama de equipo**



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 447.42kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

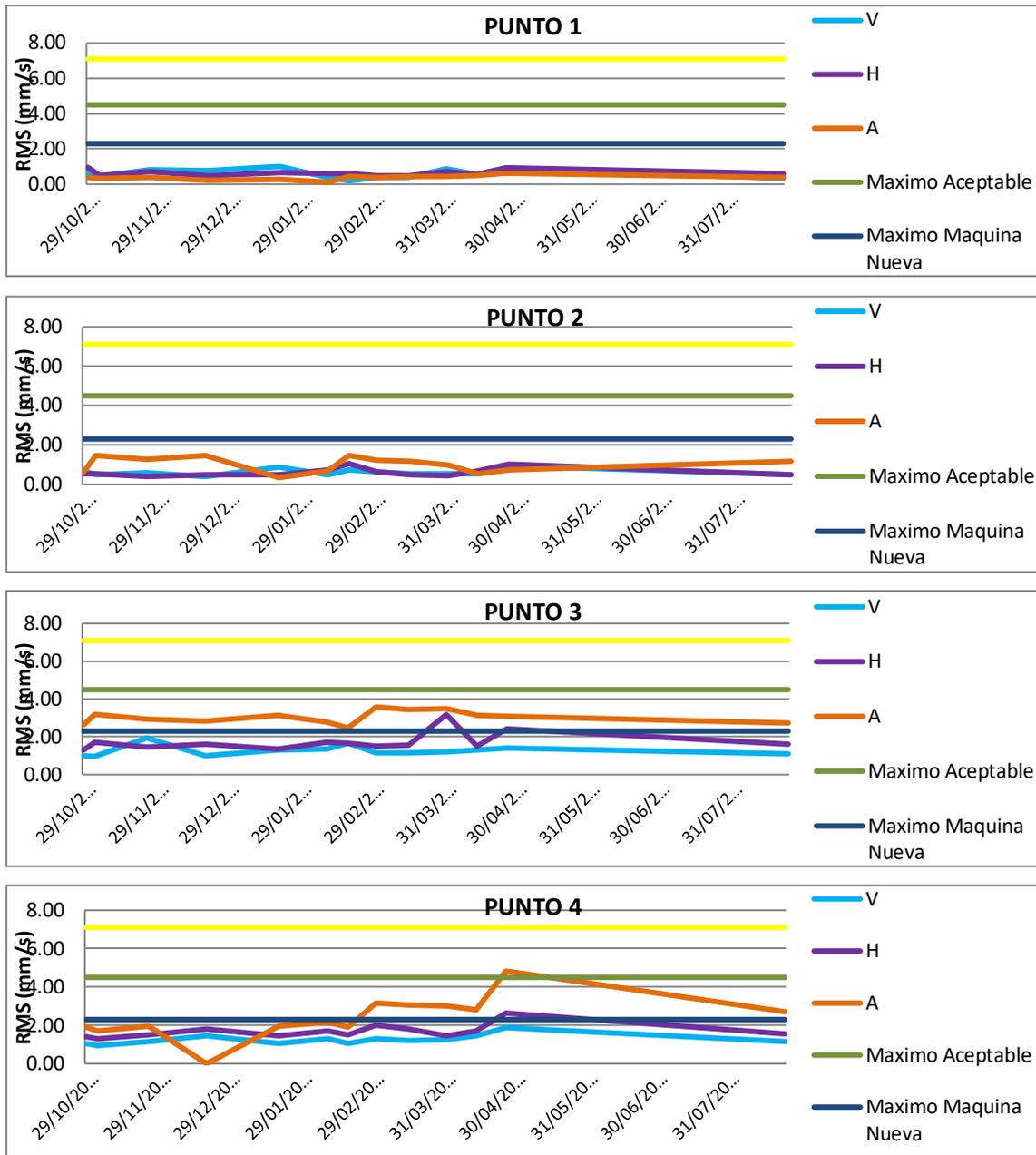
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

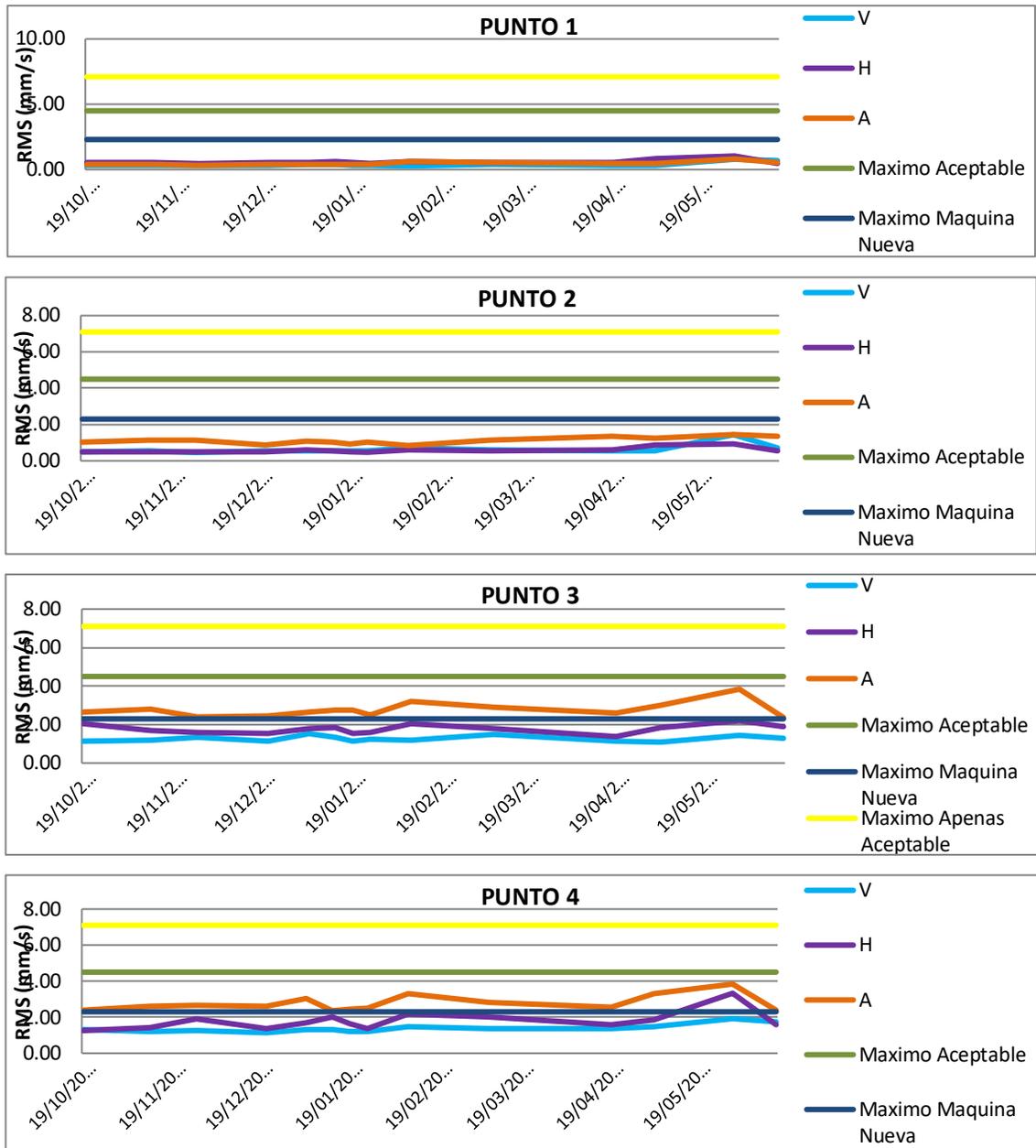
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 35. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3 en los 4 puntos determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de bomba de agua de recirculación de torre de enfriamiento 3 en los 4 puntos determinados**



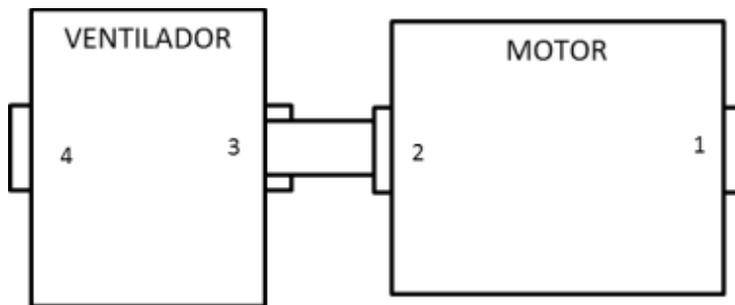
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Ventilador de tiro inducido 1



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 38. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 325kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

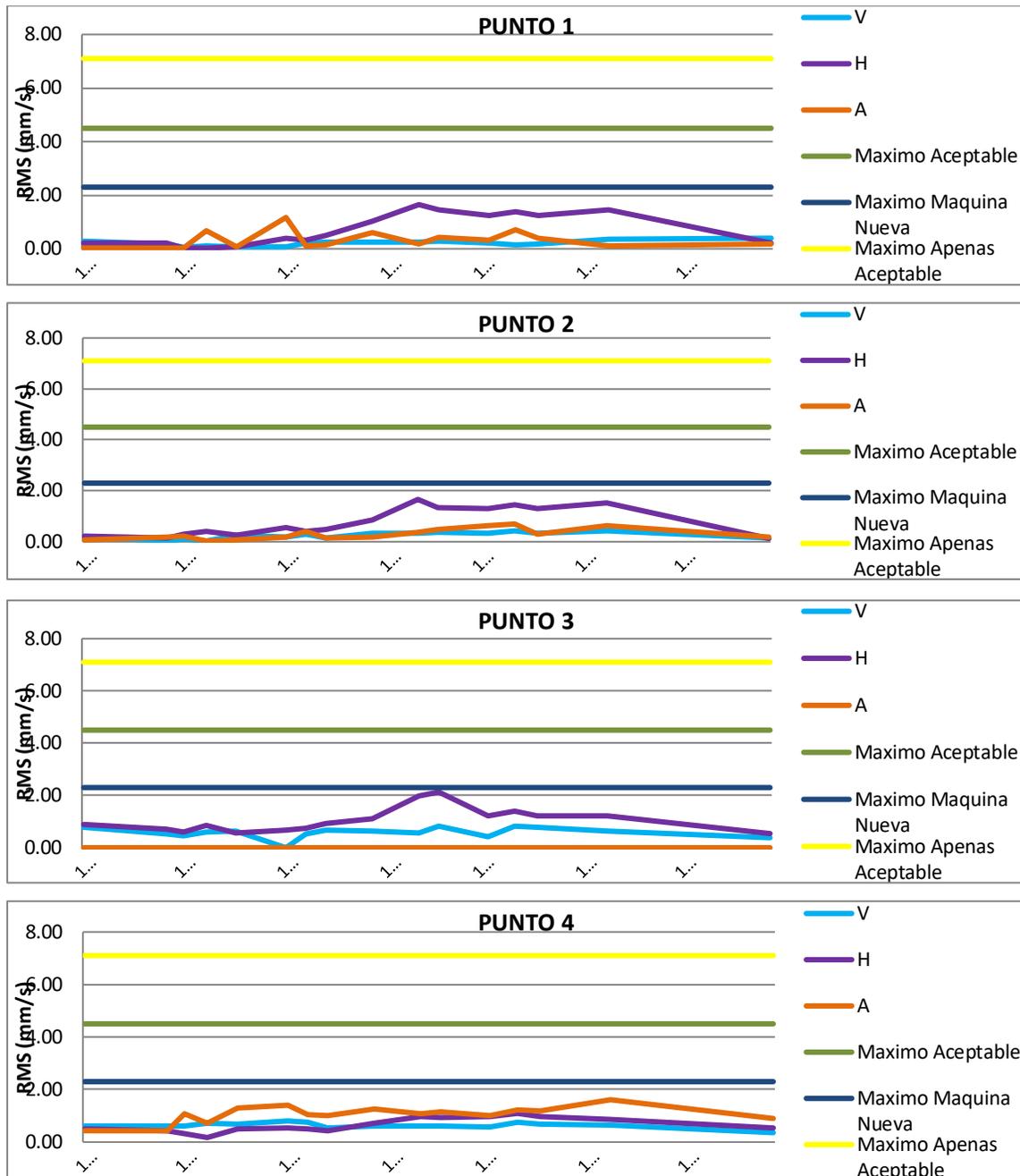
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

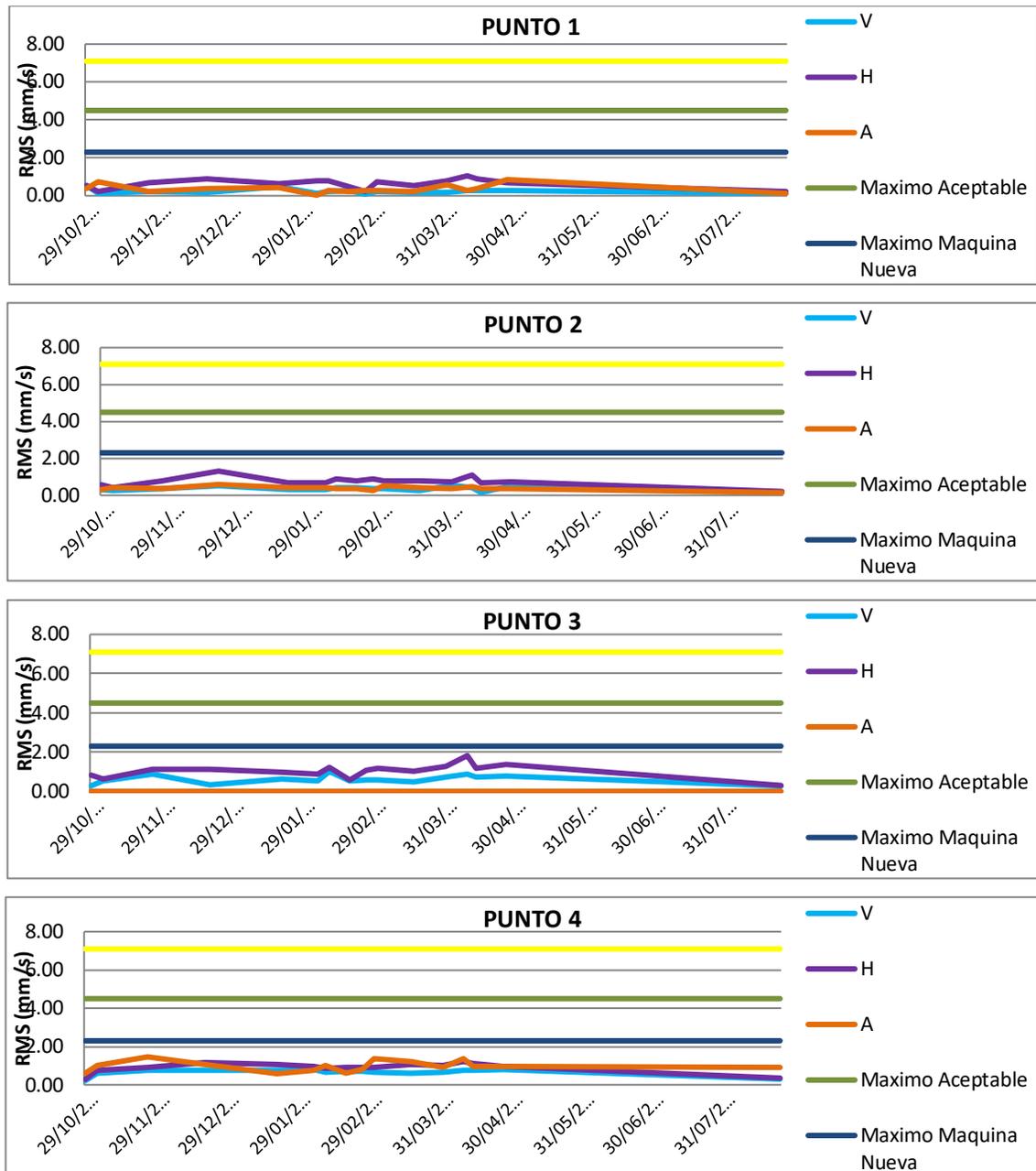
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 39. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro inducido 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



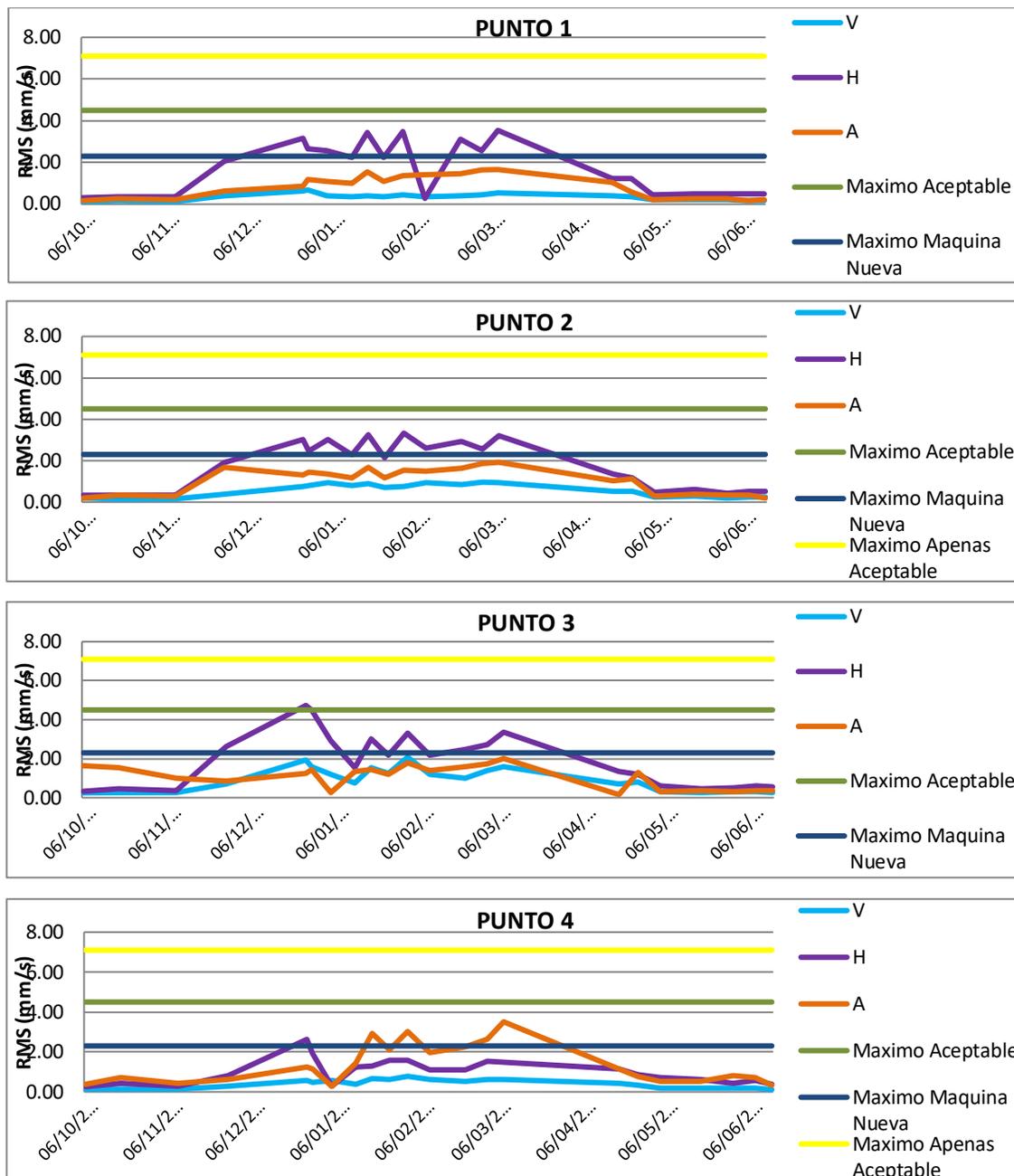
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro inducido 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro inducido 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



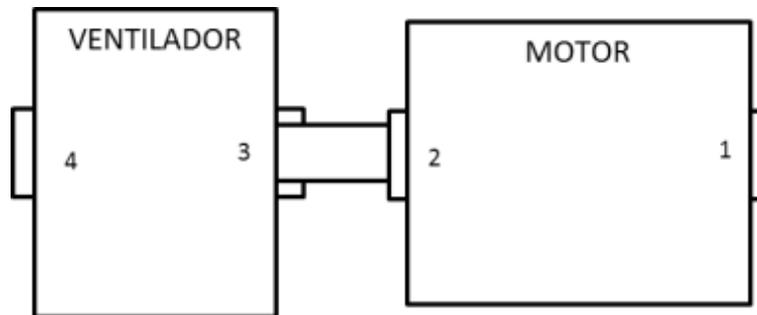
Fuente; elaboración propia.

Figura 42. Ventilador de tiro inducido 2



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 43. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 325kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

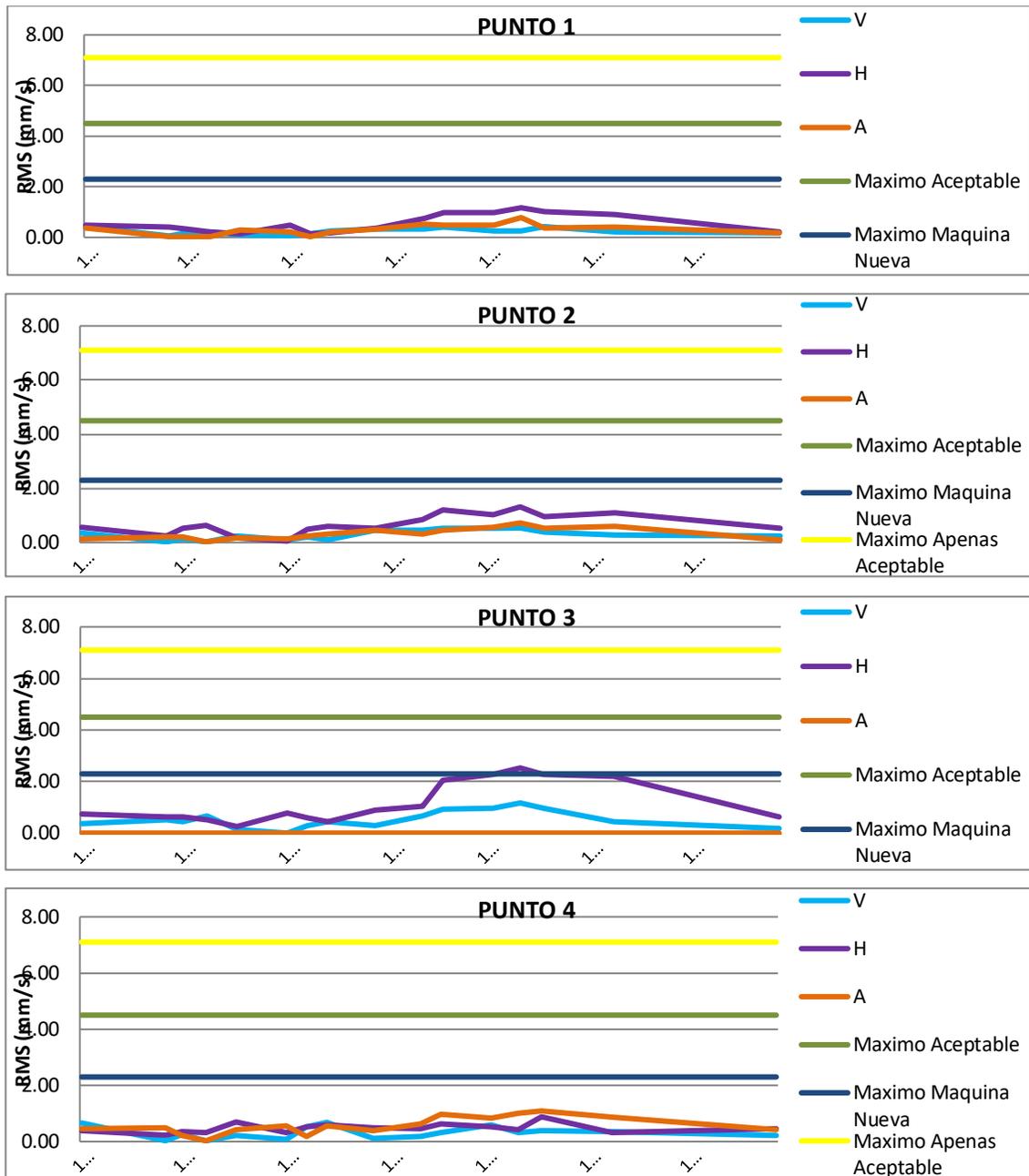
- Zona A (bueno): de 0.00 a 2.30 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 2.31 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 4.51 a 7.10 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 7.11 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 4.50 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 4.51 a 7.10 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

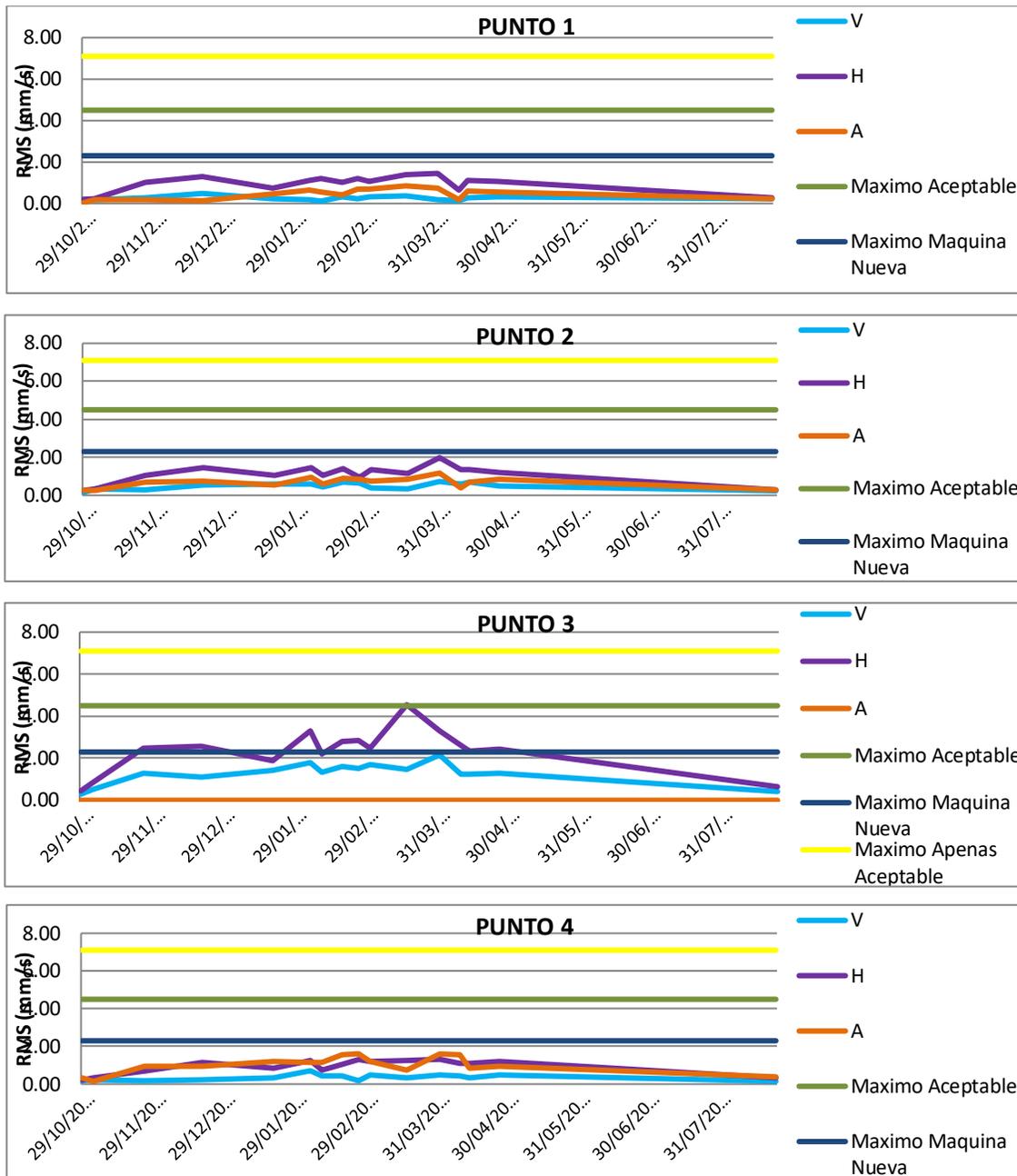
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 44. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro inducido 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



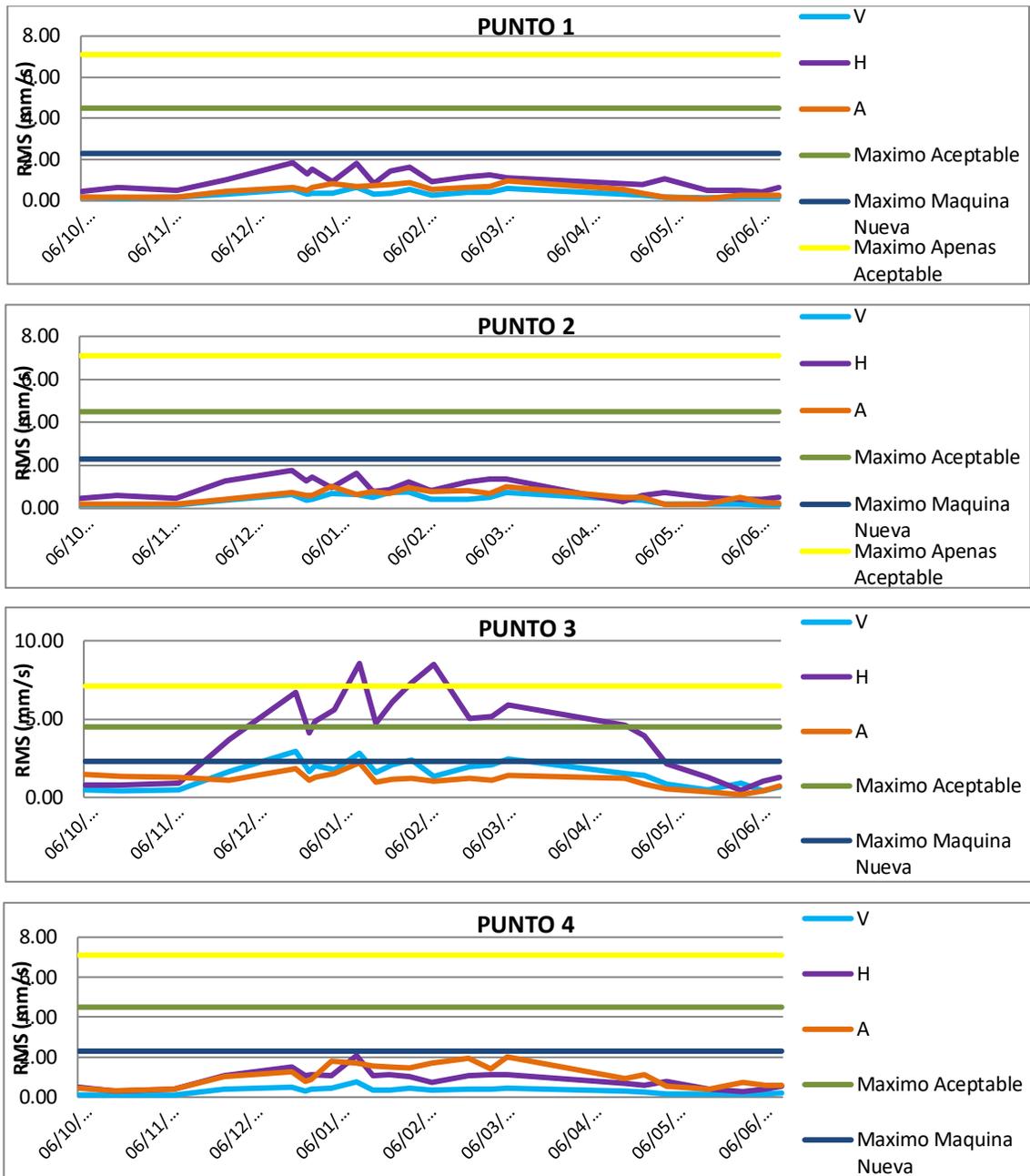
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro inducido 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



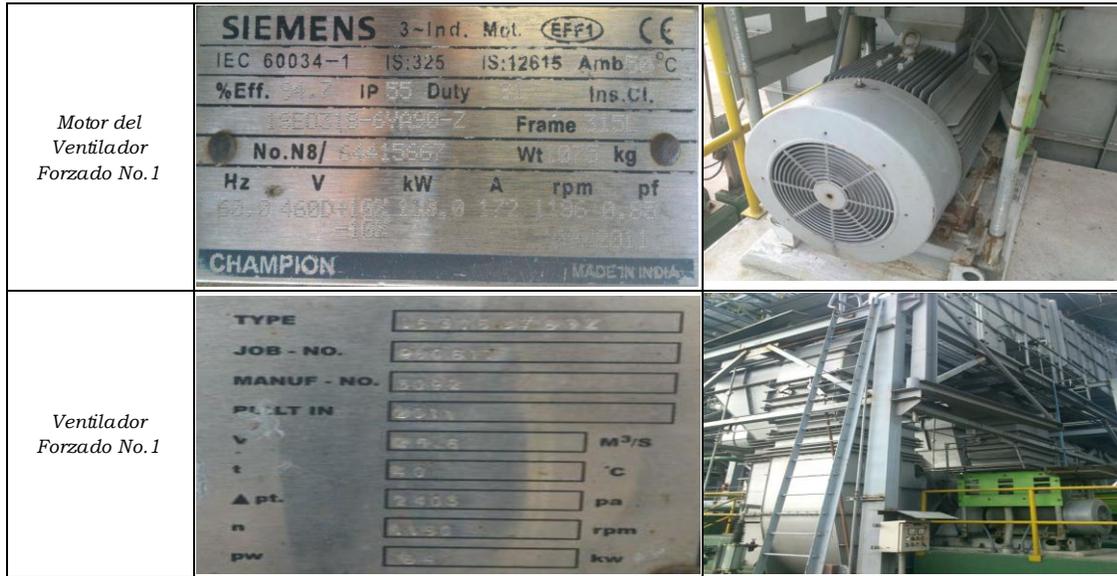
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 ventilador de tiro inducido 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



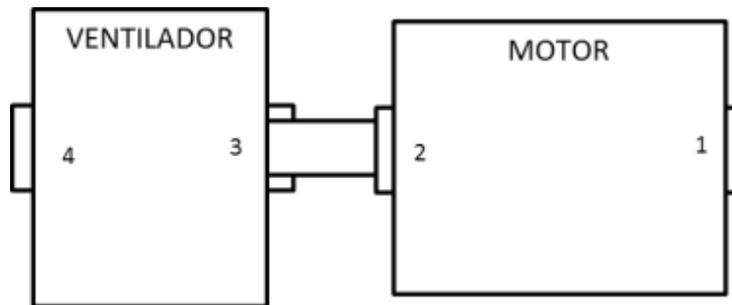
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Ventilador de tiro forzado primario 1



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 48. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 110kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

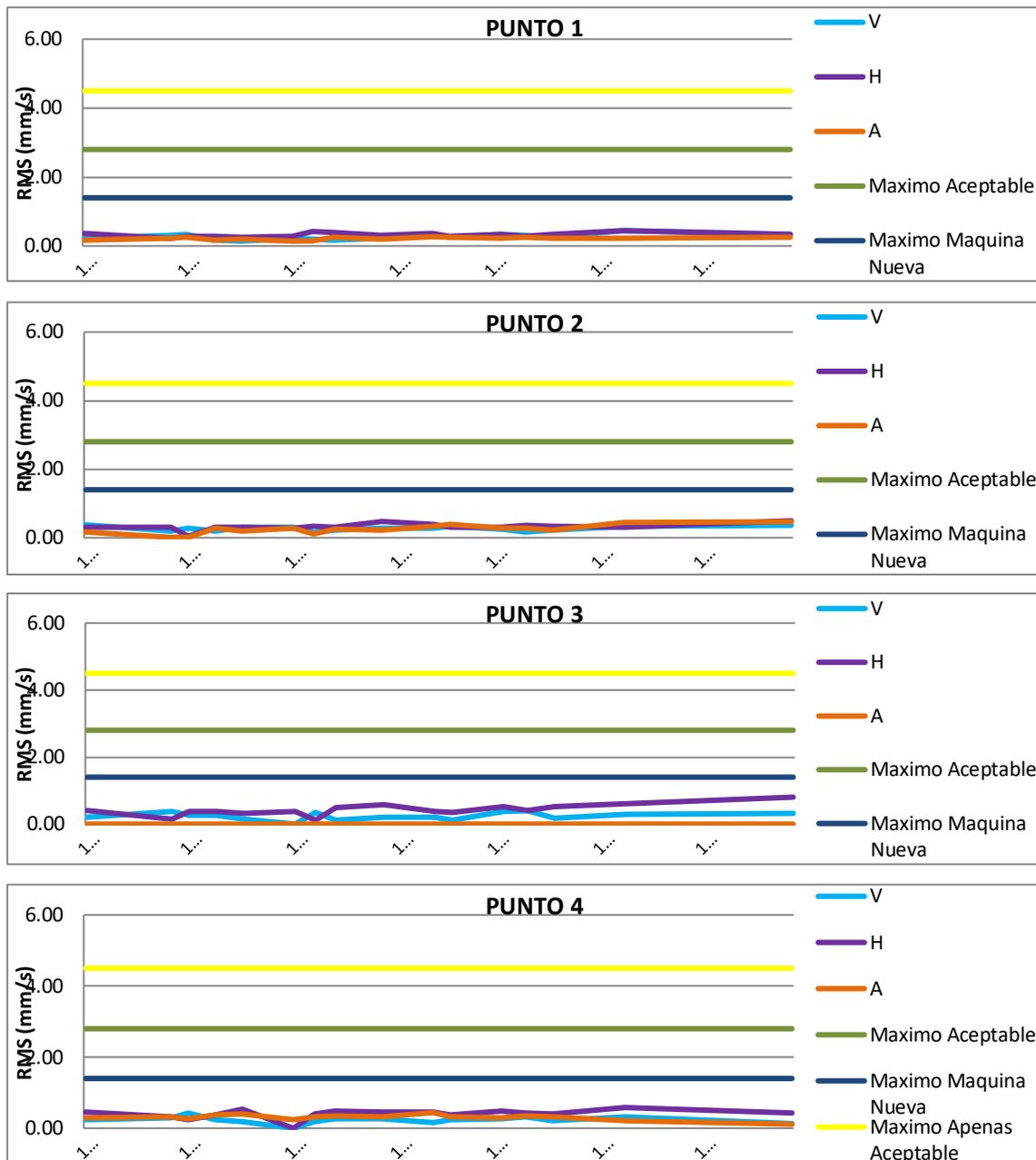
- Zona A (bueno): de 0.00 a 1.40 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 1.41 a 2.80 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 2.81 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 4.51 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 2.80 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 2.81 a 4.50 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

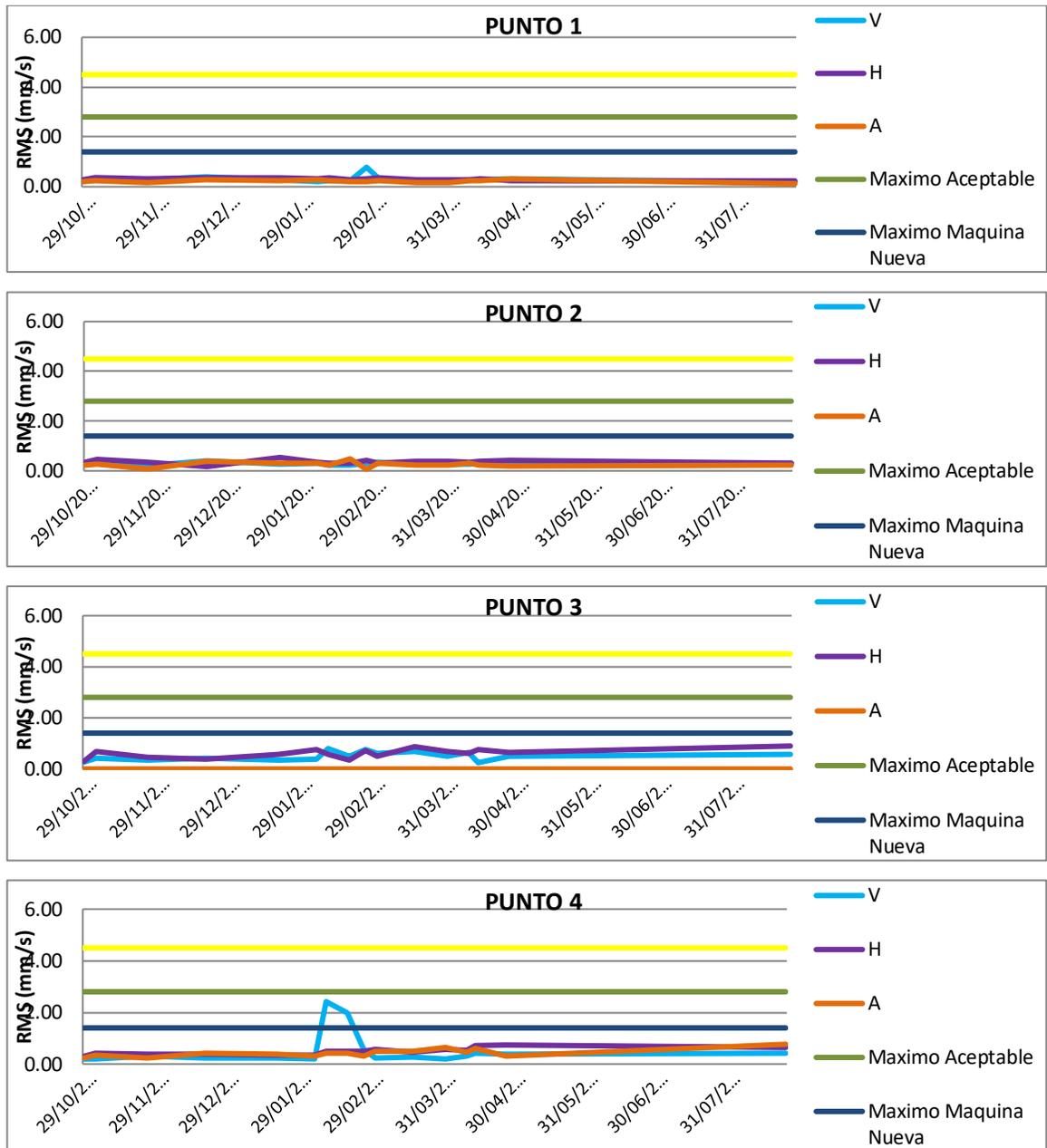
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 49. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado primario 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



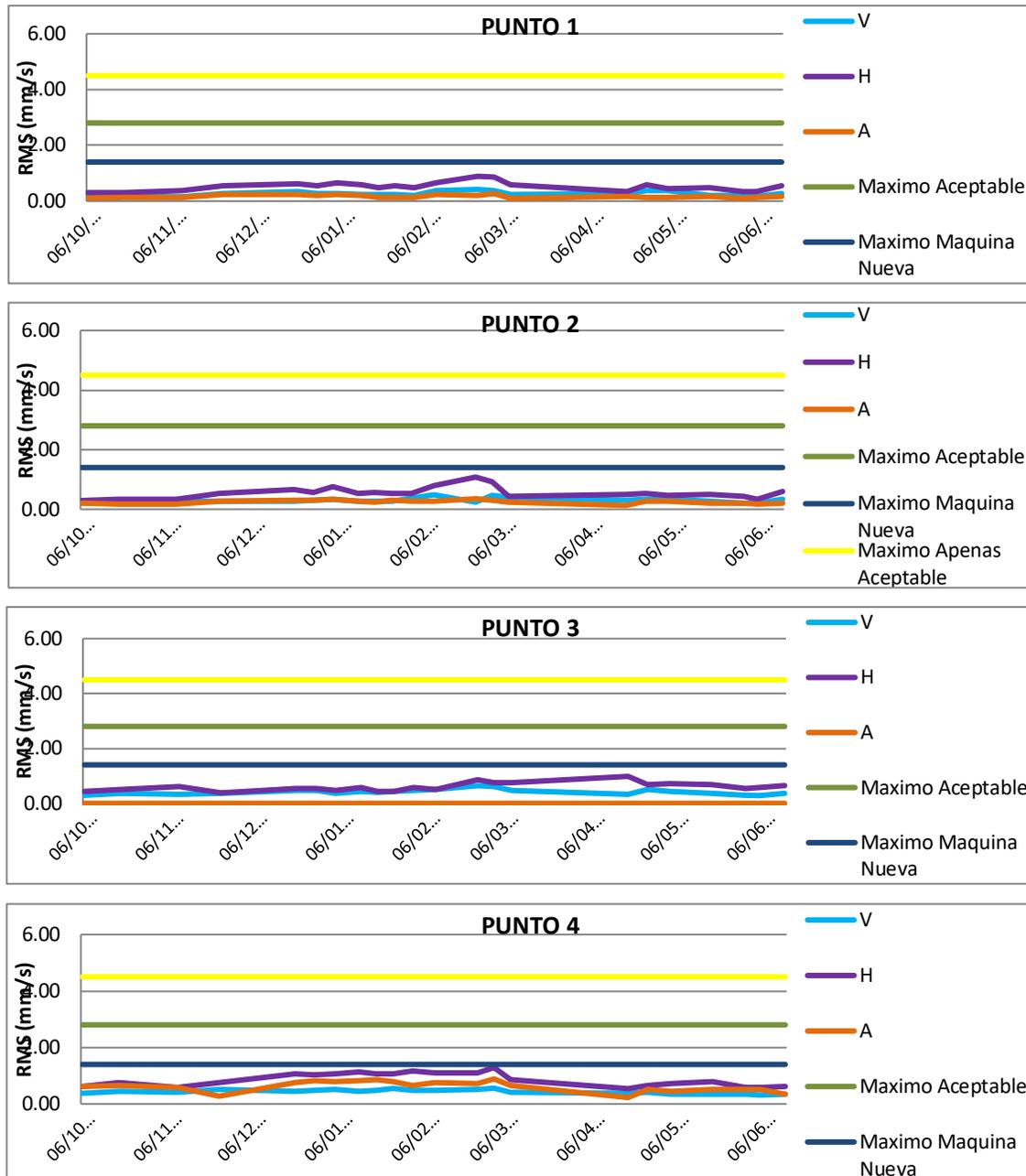
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro forzado primario 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado primario 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



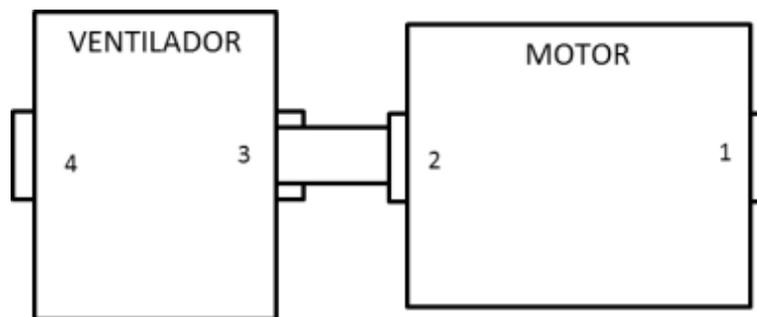
Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Ventilador de tiro forzado primario 2



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 53. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 110kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

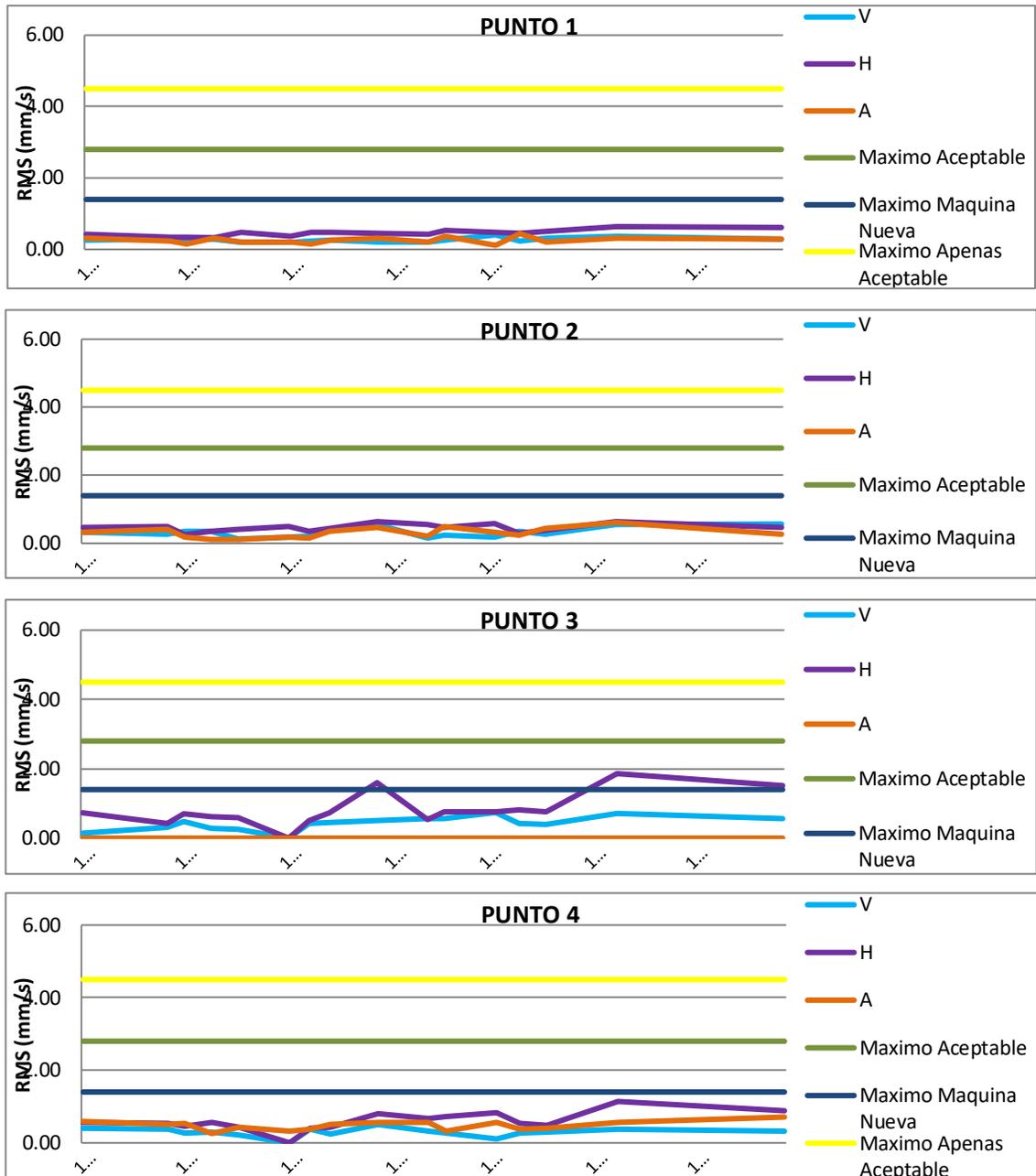
- Zona A (bueno): de 0.00 a 1.40 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 1.41 a 2.80 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 2.81 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 4.51 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 2.80 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 2.81 a 4.50 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

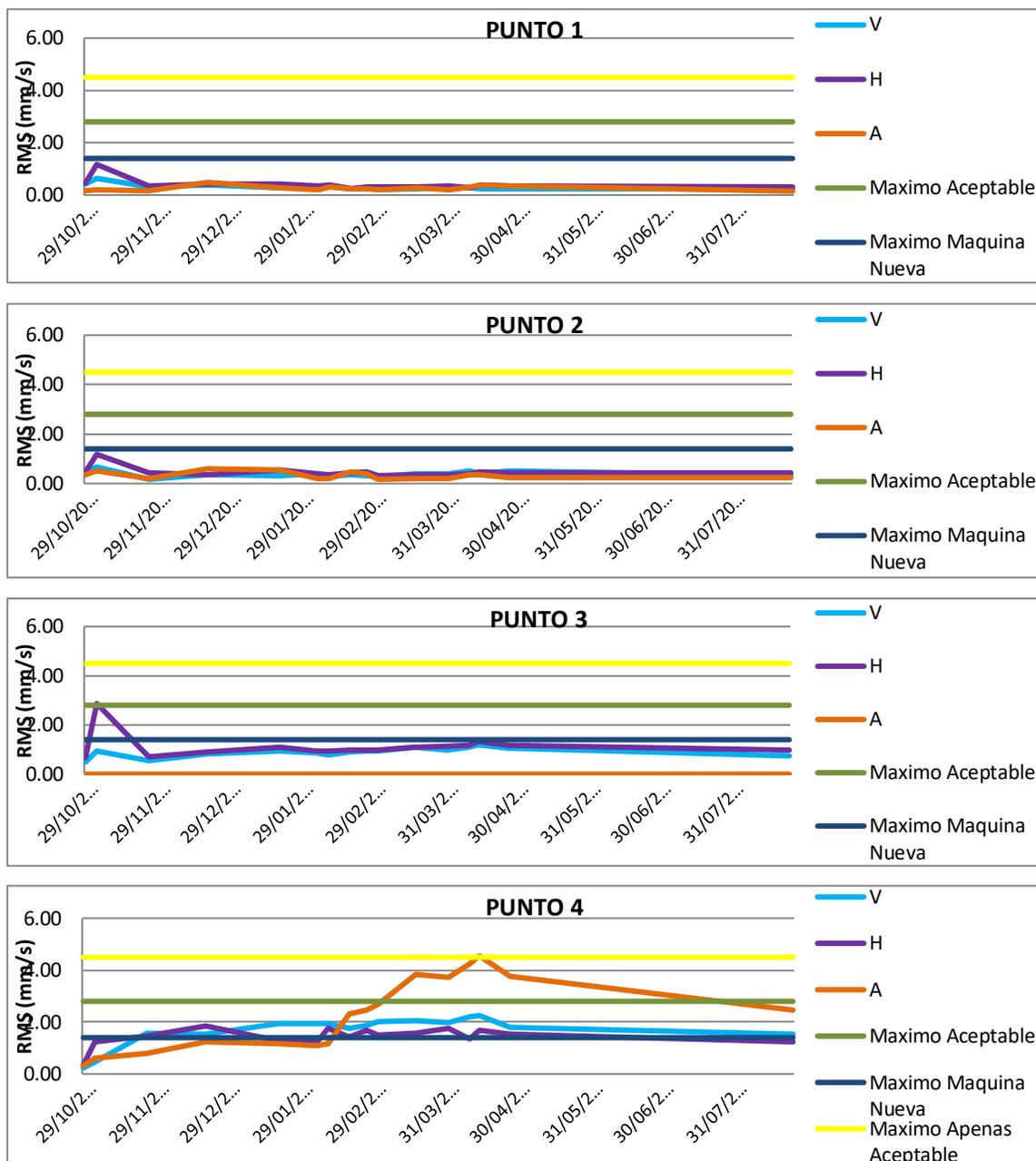
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 54. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado primario 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



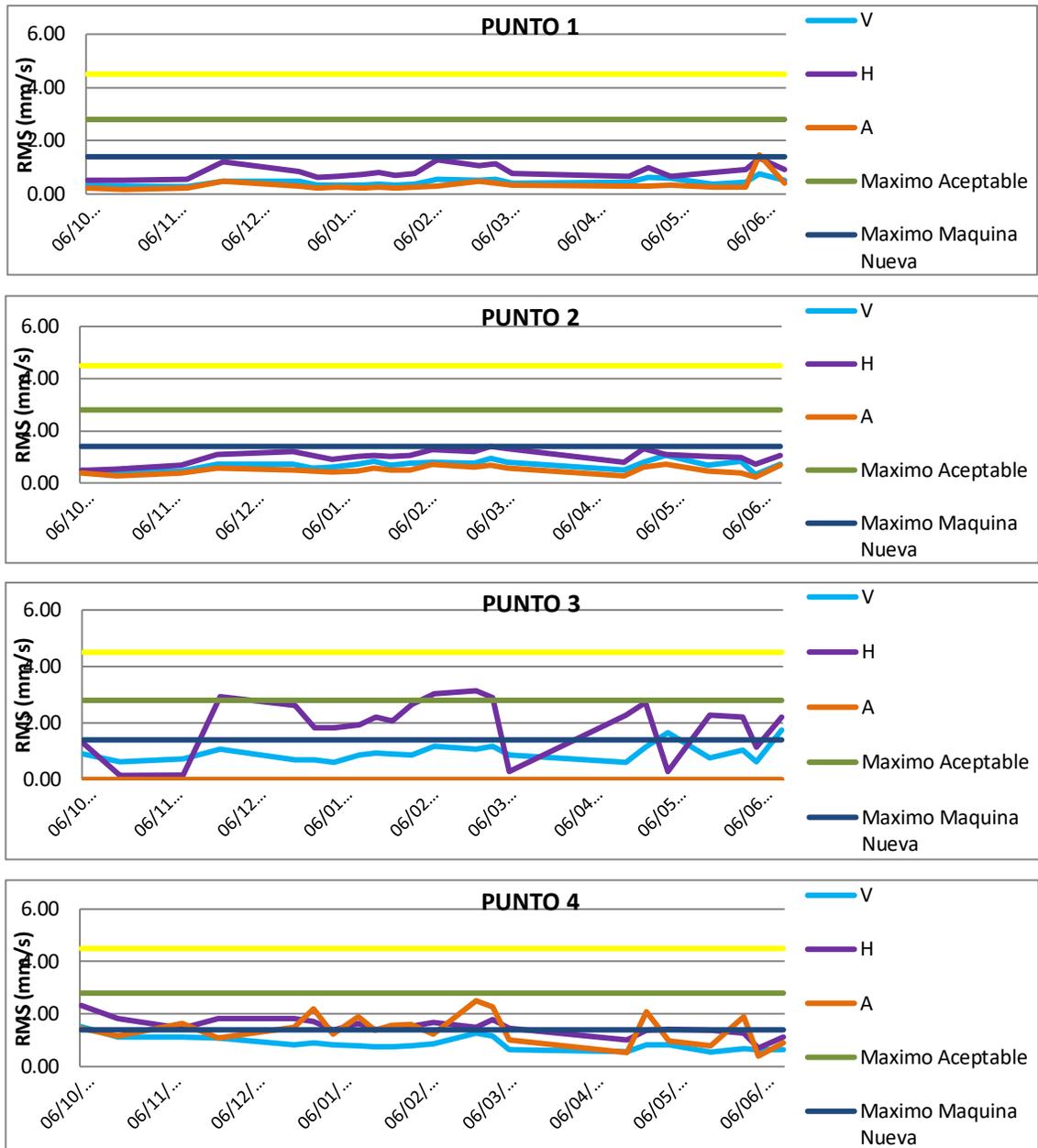
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro forzado primario 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado primario 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



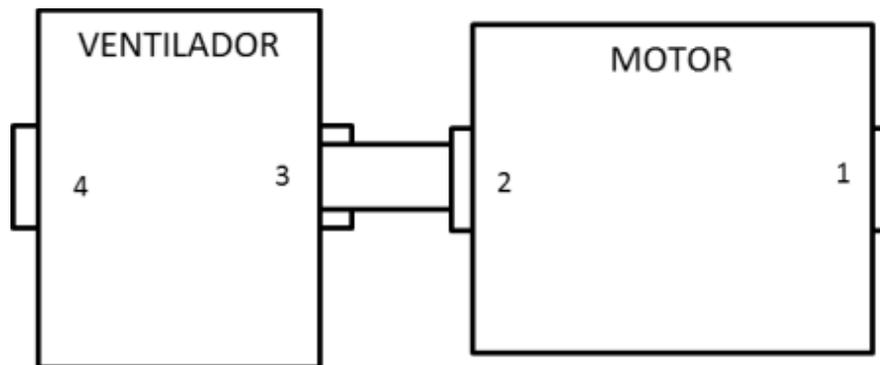
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Ventilador de tiro forzado secundario 1



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 58. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 180kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

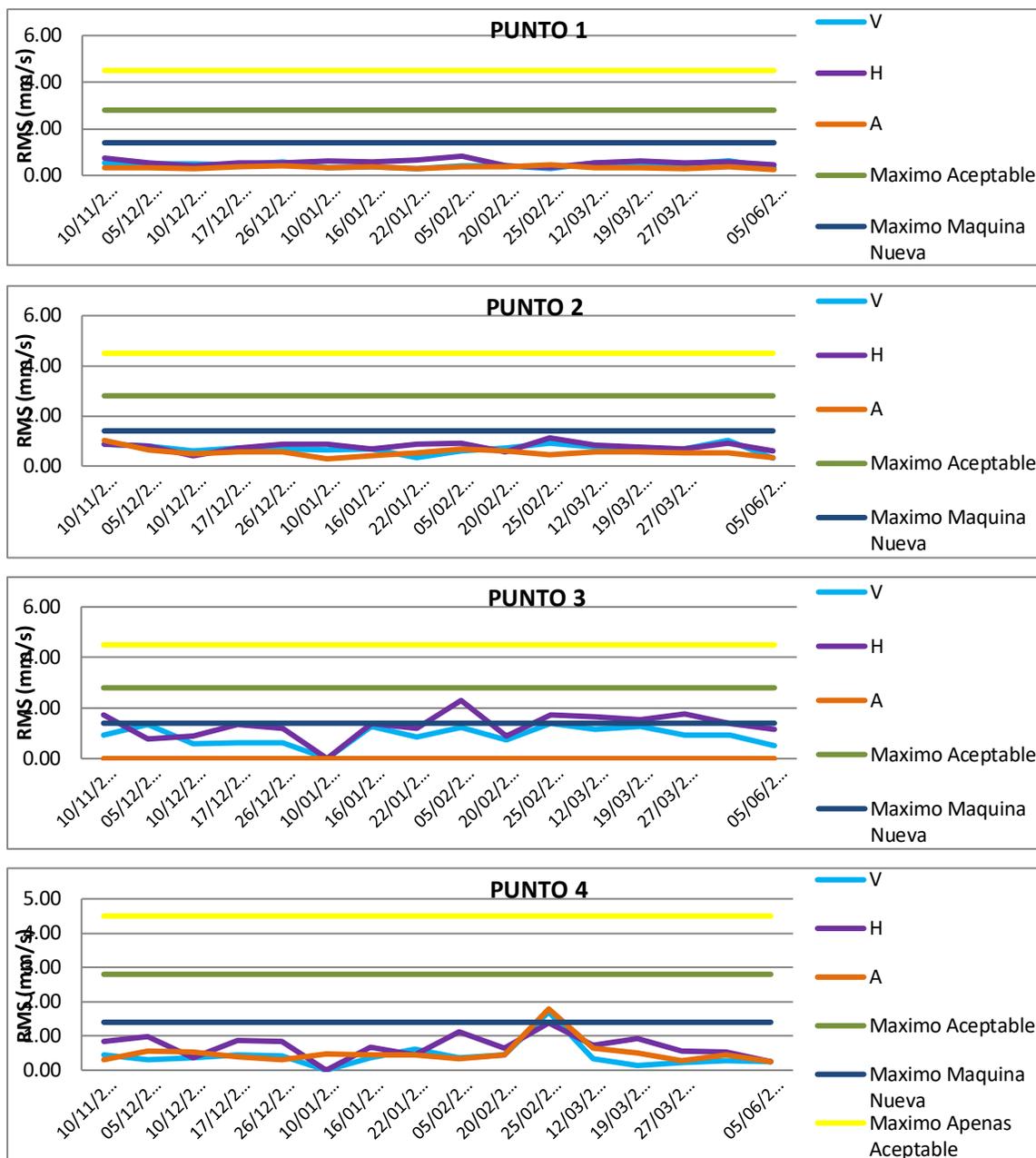
- Zona A (bueno): de 0.00 a 1.40 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 1.41 a 2.80 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 2.81 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 4.51 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 2.80 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 2.81 a 4.50 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

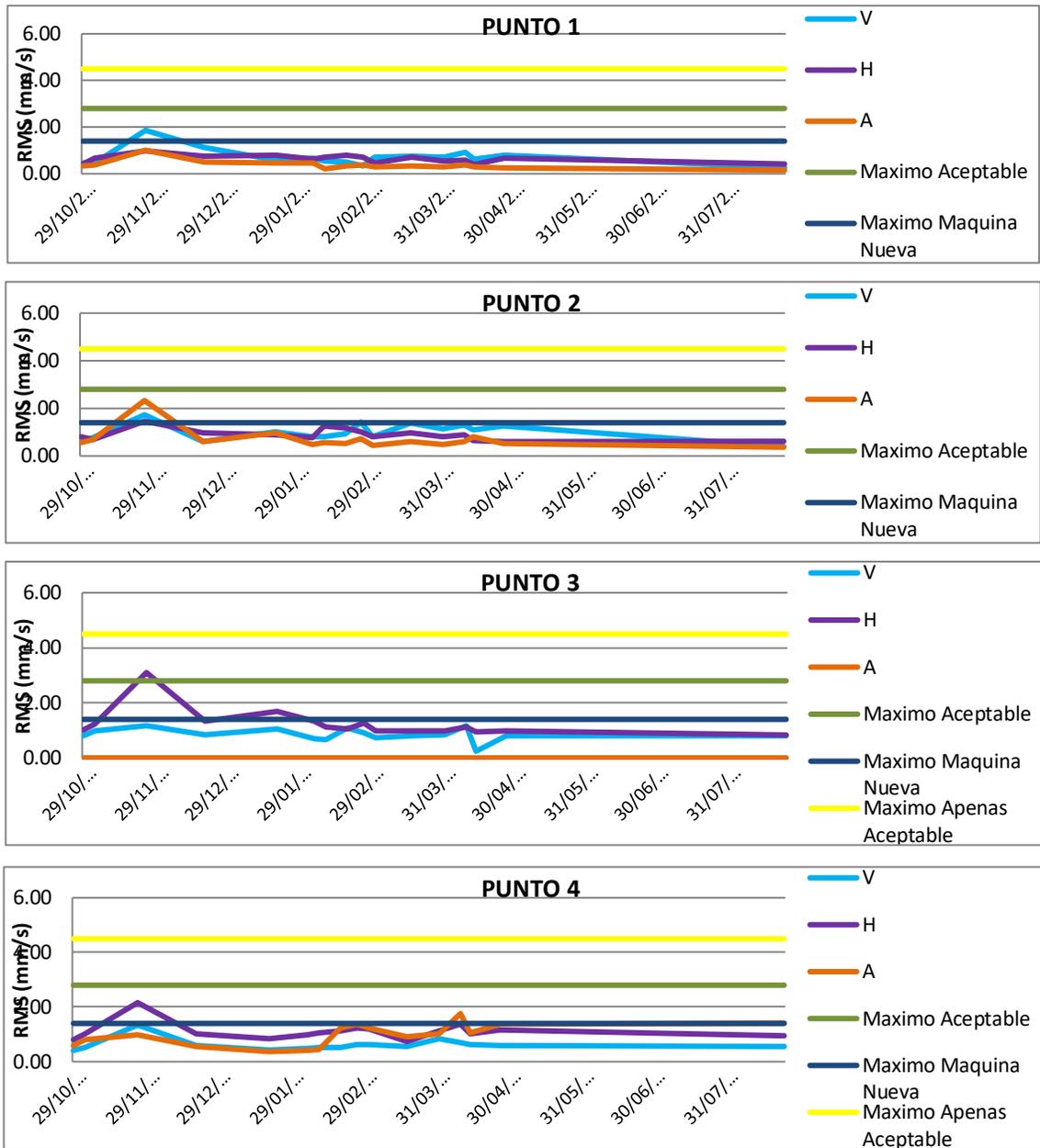
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 59. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado secundario 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



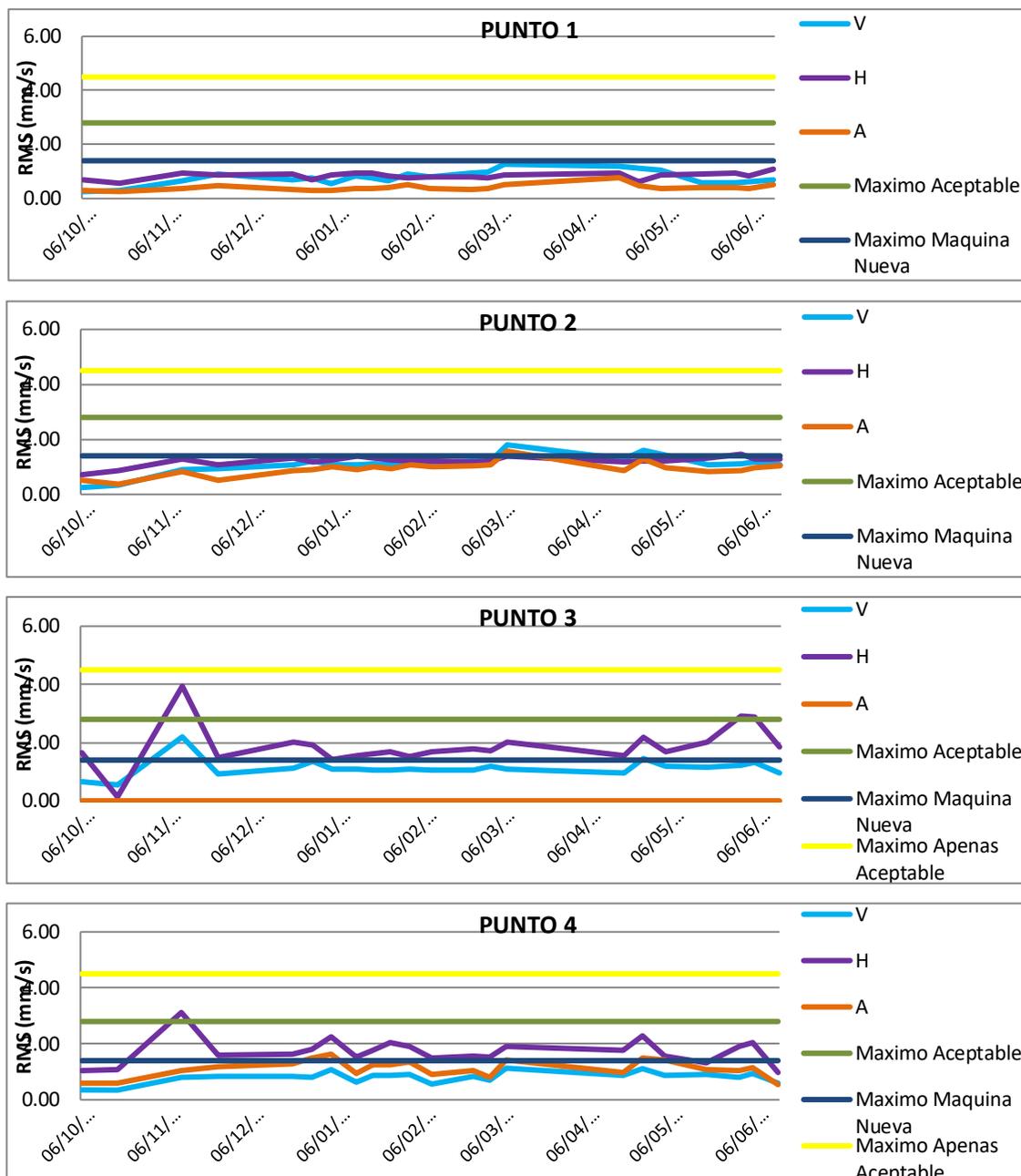
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 fr ventilador de tiro forzado secundario 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado secundario 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



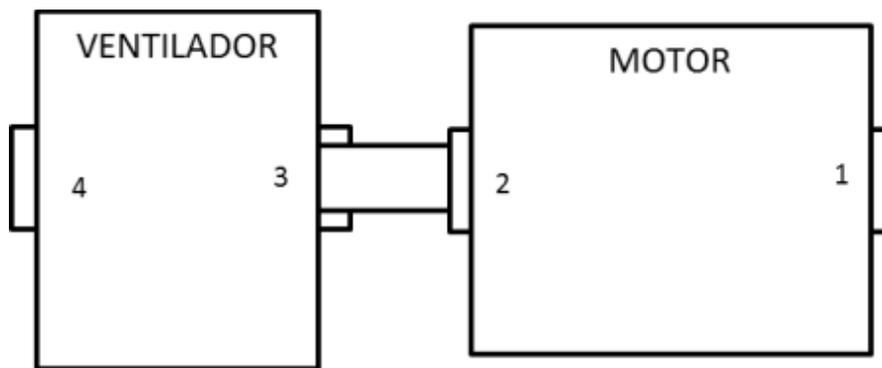
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Ventilador de tiro forzado secundario 2



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 63. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 180kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

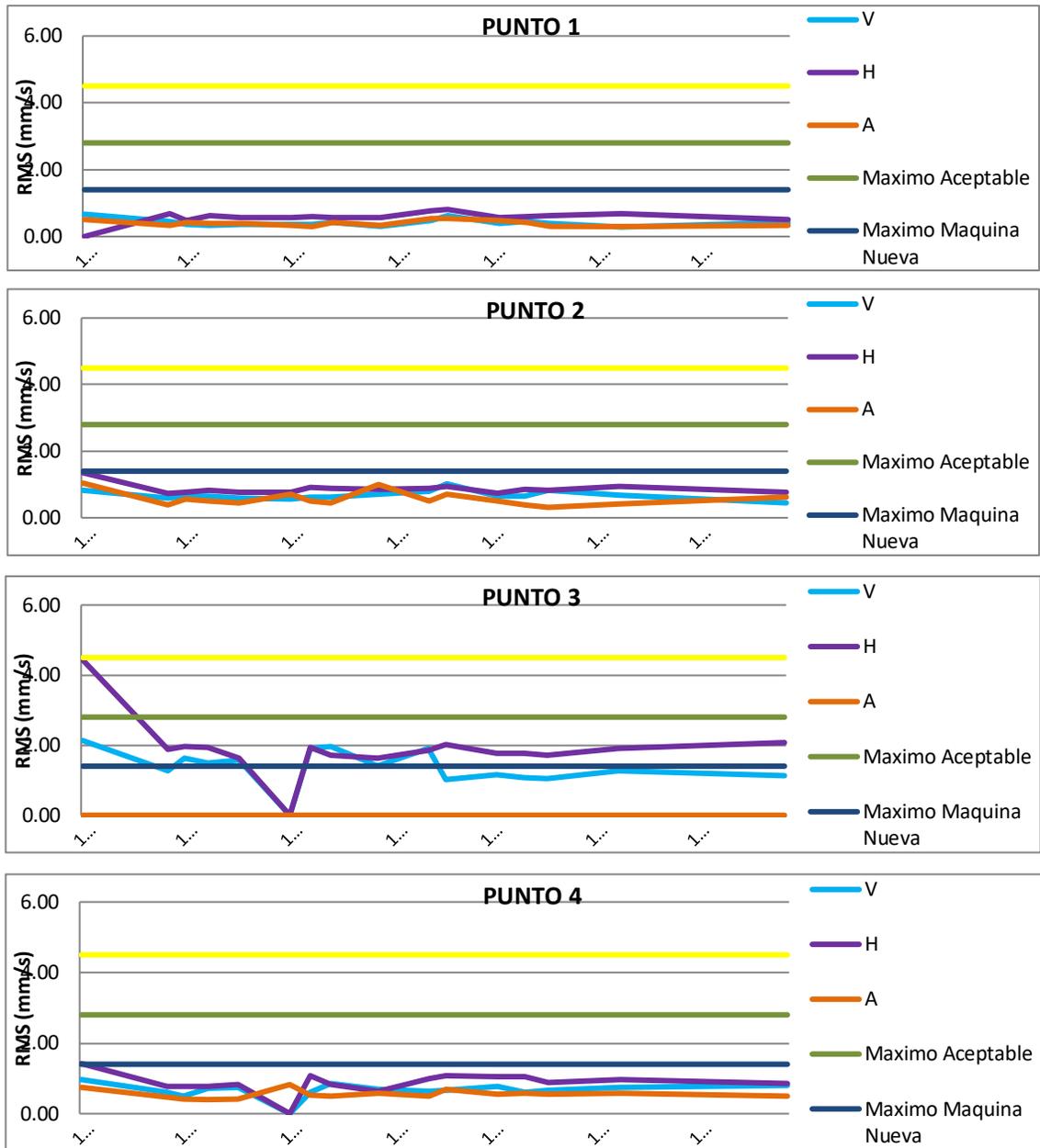
- Zona A (bueno): de 0.00 a 1.40 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 1.41 a 2.80 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 2.81 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 4.51 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 2.80 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 2.81 a 4.50 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

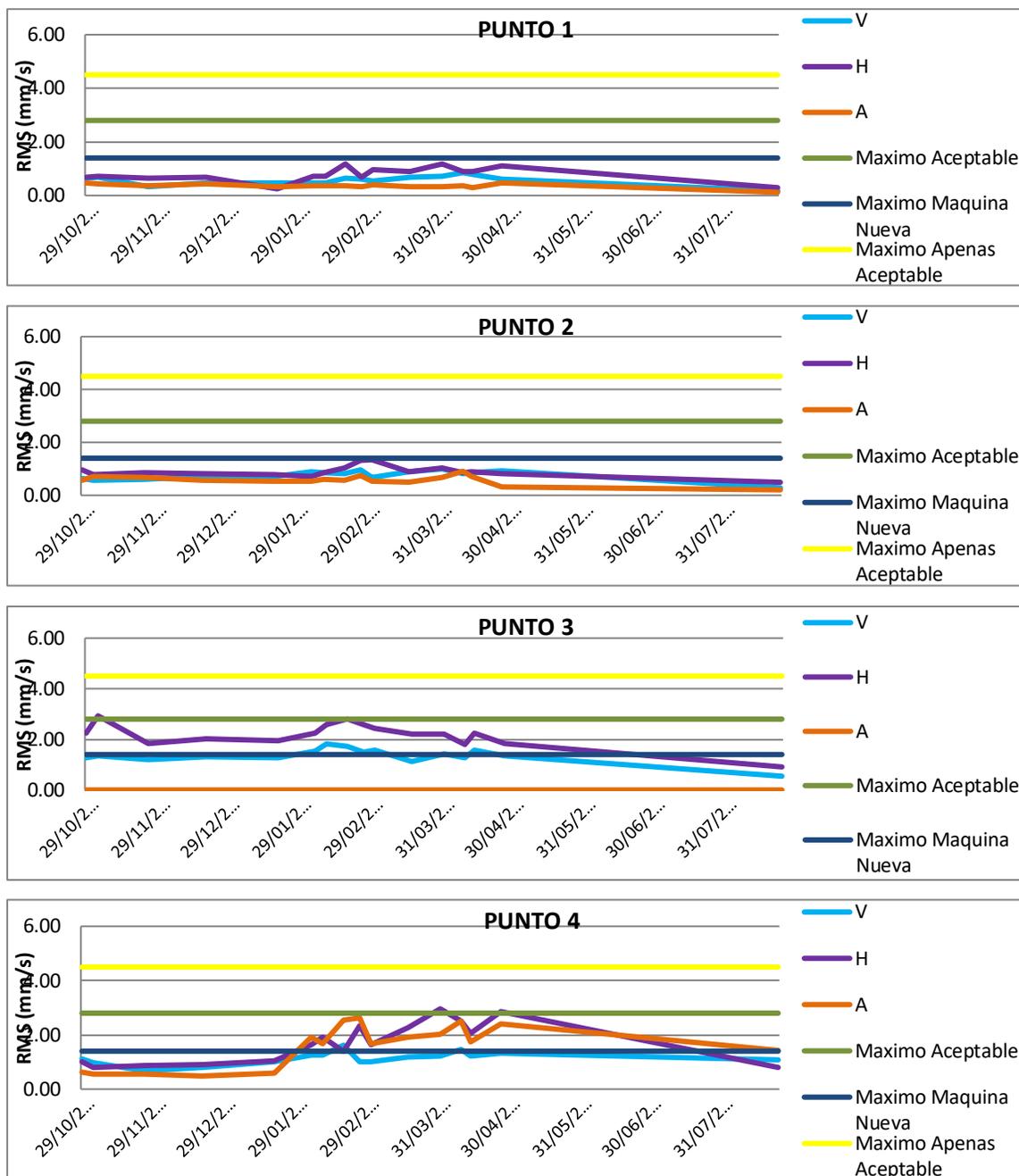
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 64. **Análisis de condiciones en periodo 2014-2015 de ventilador de tiro forzado secundario 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



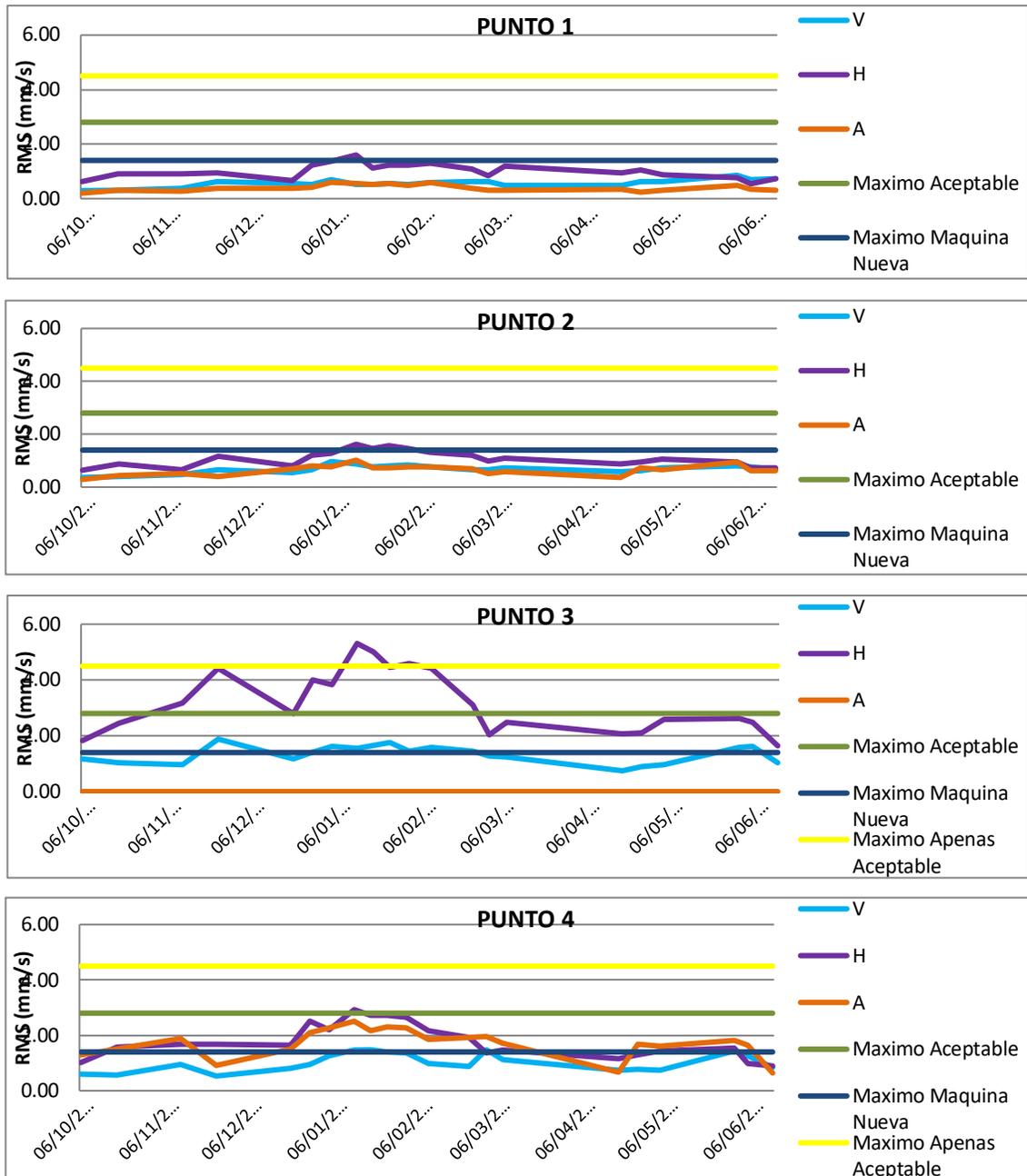
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de tiro forzado secundario 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



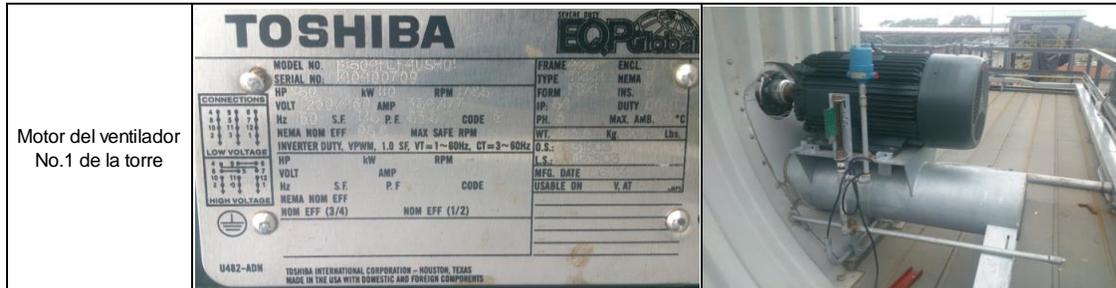
Fuente: elaboración propia.

Figura 66. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de tiro forzado secundario 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



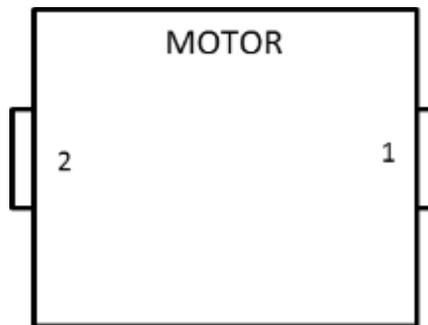
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Ventilador de torre de enfriamiento 1



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 68. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 110kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

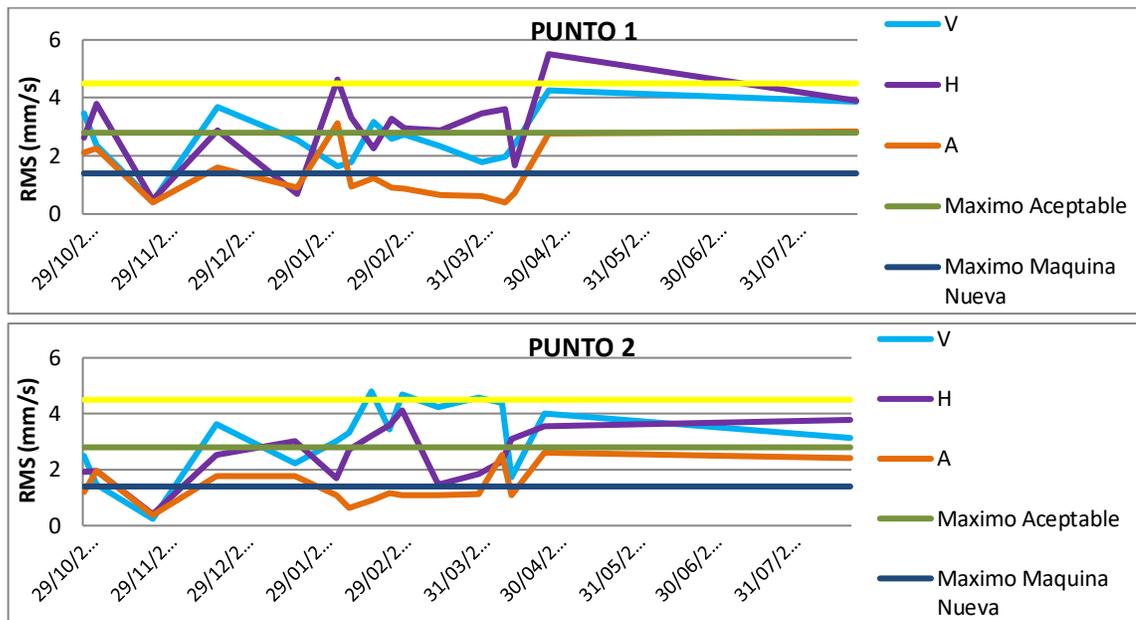
- Zona A (bueno): de 0.00 a 1.40 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 1.41 a 2.80 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 2.81 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 4.51 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 2.80 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 2.81 a 4.50 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

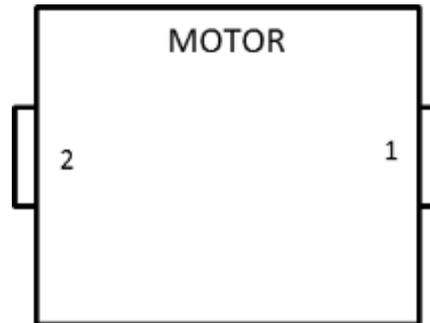
Figura 69. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de torre de enfriamiento 1 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.



Figura 72. **Diagrama de Equipo**



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 110kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

- Zona A (bueno): de 0.00 a 1.40 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 1.41 a 2.80 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 2.81 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 4.51 en adelante rms (mm/s)

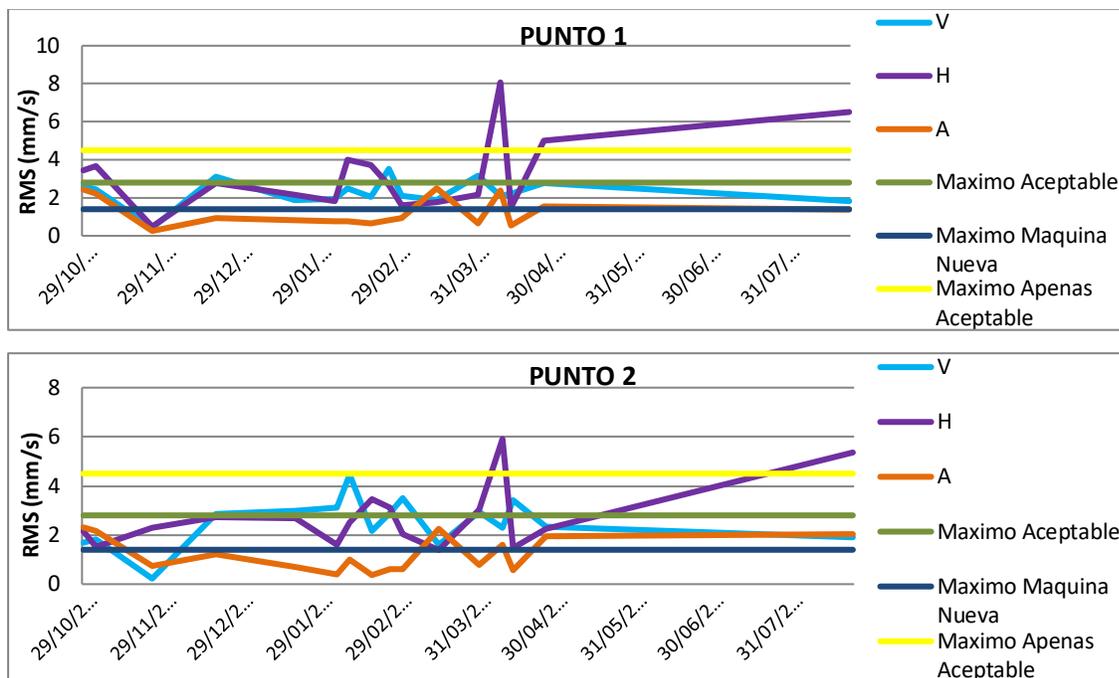
Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 2.80 rms (mm/s).

Así mismo, se determina que los valores entre 2.81 a 4.50 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno

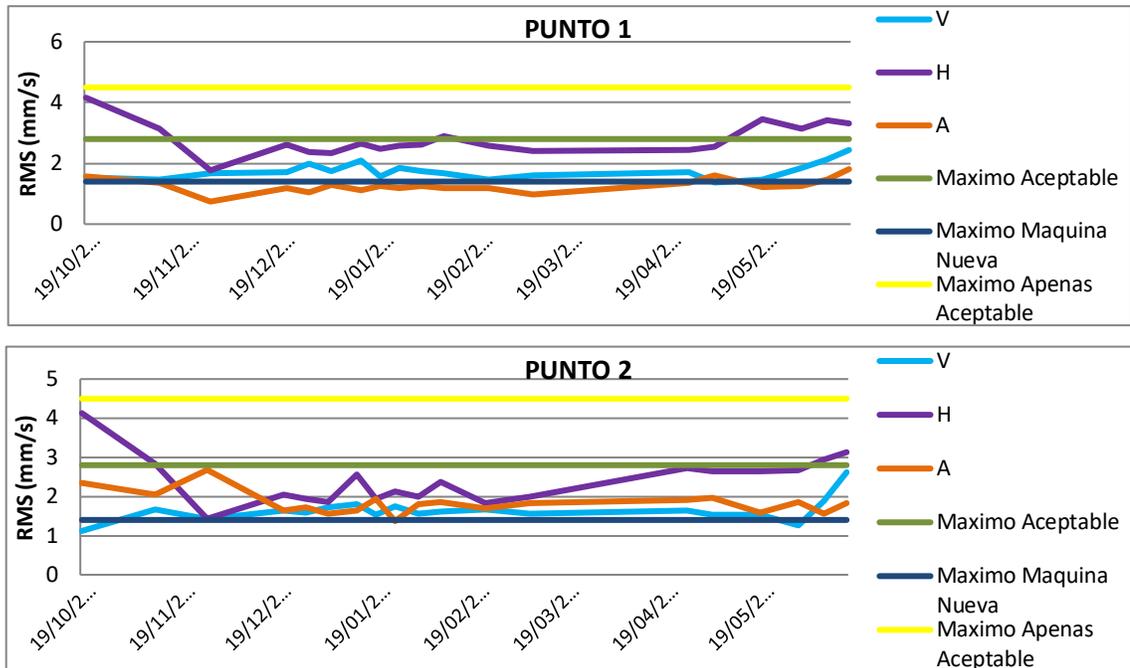
sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 73. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador de torre de enfriamiento 2 en los 4 puntos de análisis determinados**



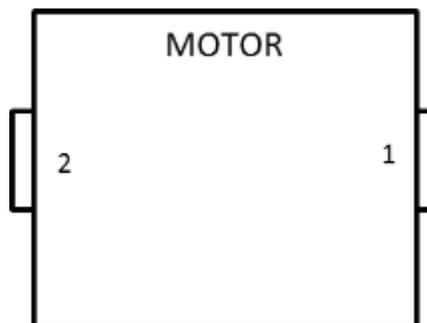
Fuente: elaboración propia.

Figura 75. Ventilador neumático de aire de alimentación de carbón



Fuente: [Fotografía de Sergio Jonathan Aguilar Carranza. 2015-2016]. (San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez). Colección particular. Guatemala.

Figura 76. Diagrama de equipo



Fuente: elaboración propia.

Equipo de 30kW con acople rígido, según ISO 10816-3 se definen los siguientes límites:

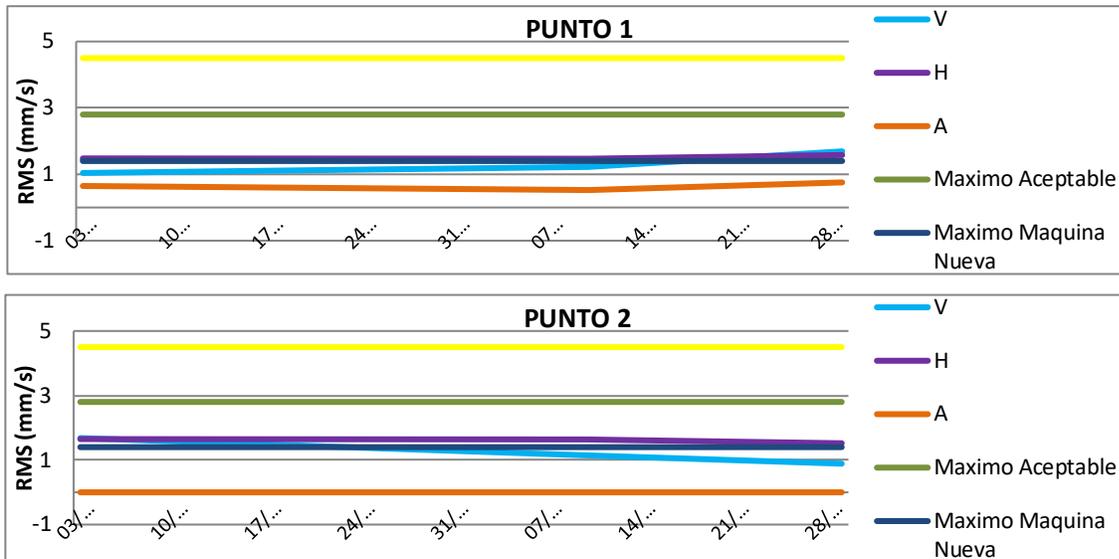
- Zona A (bueno): de 0.00 a 1.40 rms (mm/s)
- Zona B (aceptable): de 1.41 a 2.80 rms (mm/s)
- Zona C (apenas aceptable): de 2.81 a 4.50 rms (mm/s)
- Zona D (no aceptable): de 4.51 en adelante rms (mm/s)

Se determina que los niveles de vibración óptimos para este equipo son los que se encuentran entre 0.00 a 2.80 rms (mm/s).

Así mismo se determina que los valores entre 2.81 a 4.50 rms (mm/s) son considerados de operación riesgosa y es en donde se debe programar el mantenimiento correctivo según el tipo de falla que se haya detectado.

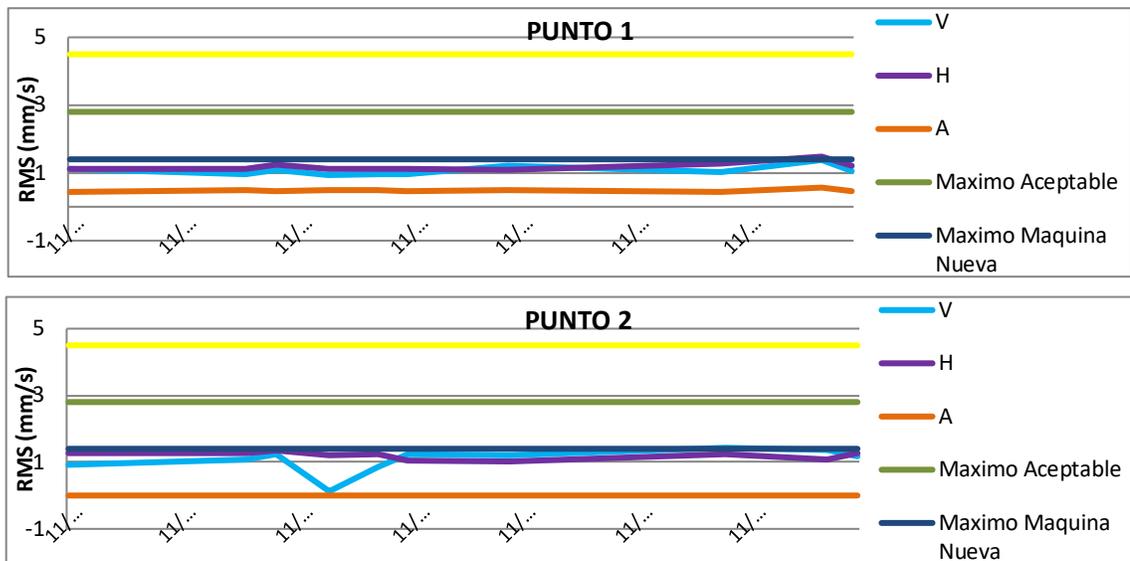
Esto es el resultado del análisis de cada uno de los cuatro puntos principales de análisis determinados donde se cuenta con elementos rodantes y en cada uno sobre las tres posiciones de medición vertical, horizontal y axial, para determinar la vibración normal o bien vibración anormal del equipo rotativo.

Figura 77. **Análisis de condiciones en periodo 2015-2016 de ventilador neumático de aire de alimentación de carbón en los 4 puntos determinados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 78. **Análisis de condiciones en periodo 2016-2017 de ventilador neumático de aire de alimentación de carbón en los 4 puntos determinados**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Análisis

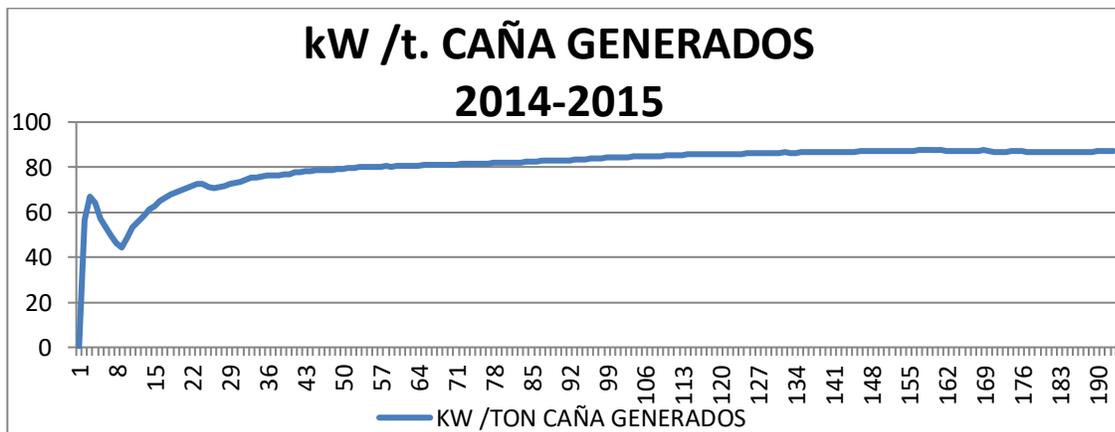
Determinar cómo afectan los paros no programados de los equipos críticos en la productividad de generación de energía.

- Productividad kW / t. caña

La productividad durante el periodo de cogeneración de energía se midió con base en la cantidad de kW generados divididos por la cantidad total de caña que se muele durante el periodo completo, con esto se logró determinar que la productividad al final de los periodos tuvo un ascenso representativo gracias al

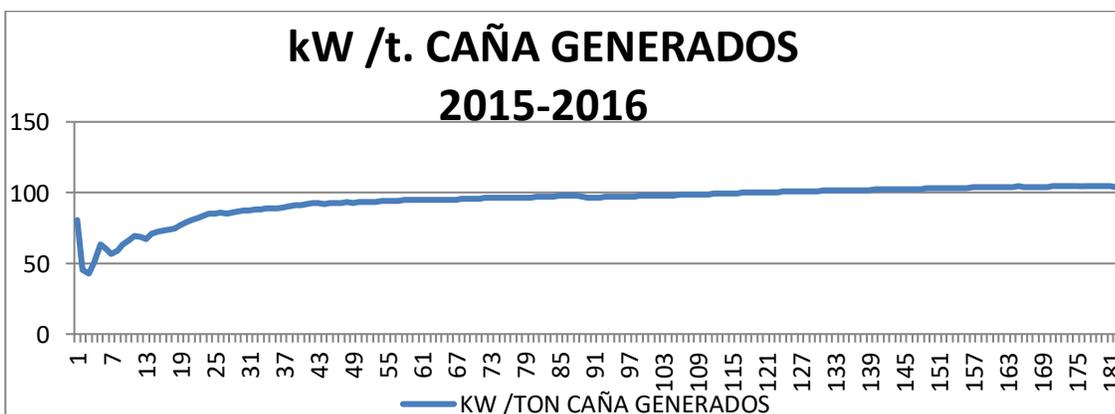
control y manejo adecuado del análisis de condiciones en los equipos rotativos y del adecuado manejo de los paros programados en los mismos.

Figura 79. kW /t. caña generados 2014-2015



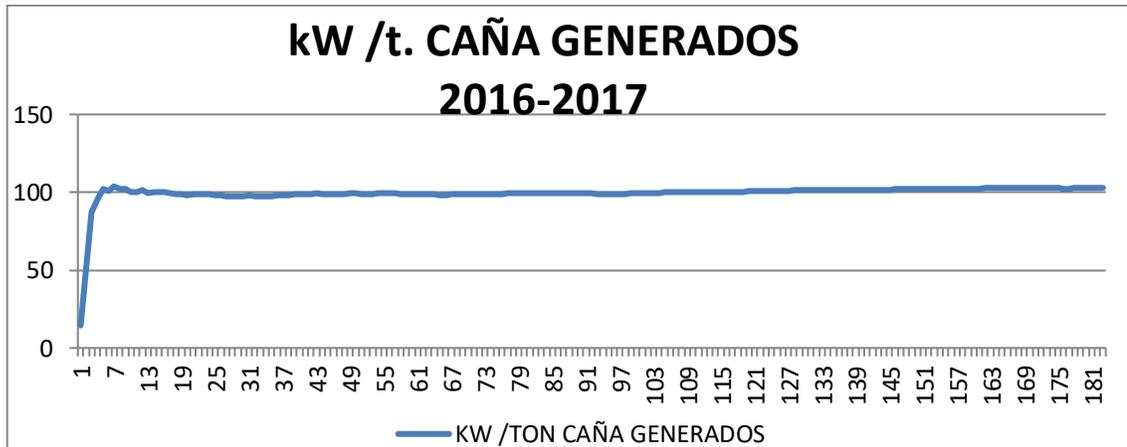
Fuente: elaboración propia.

Figura 80. kW /t. caña generados 2015-2016



Fuente: elaboración propia.

Figura 81. kW /t. caña generados 2016-2017



Fuente: elaboración propia.

Tabla II. Resumen de productividad cogeneración de energía

Eficiencia Zafra	kW Generados/t. Caña
2014-2015	87.32
2015-2016	103.98
2016-2017	102.58

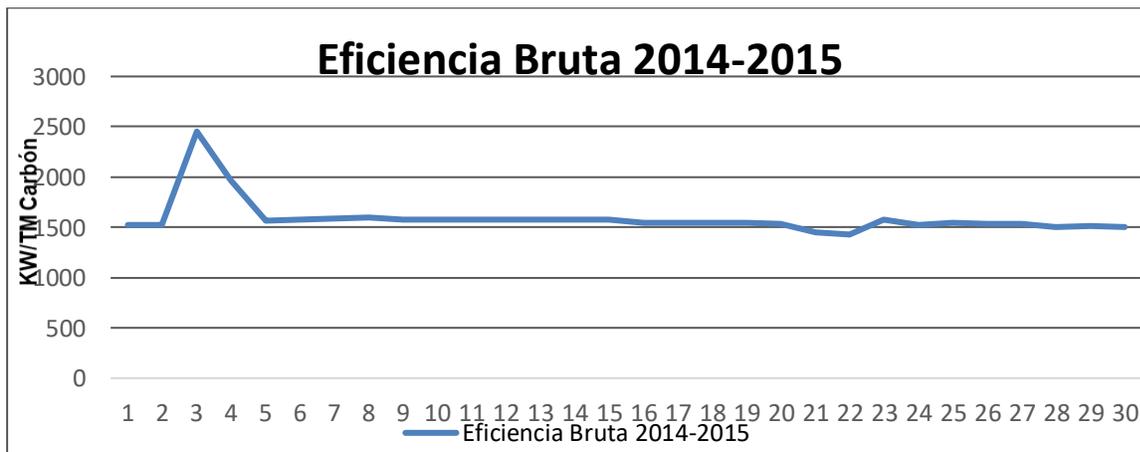
Fuente: elaboración propia.

Se determina que la productividad aumentó en un 19 % tomando como base el periodo 2014-2015 cuando no se contaba con el análisis de condiciones en equipos rotativos, esto debido a el control riguroso de las condiciones operacionales que se mantuvo durante los periodos siguientes, teniendo una productividad estable en los periodos 2015-2016 y 2016-2017.

- Productividad eficiencia bruta carbón

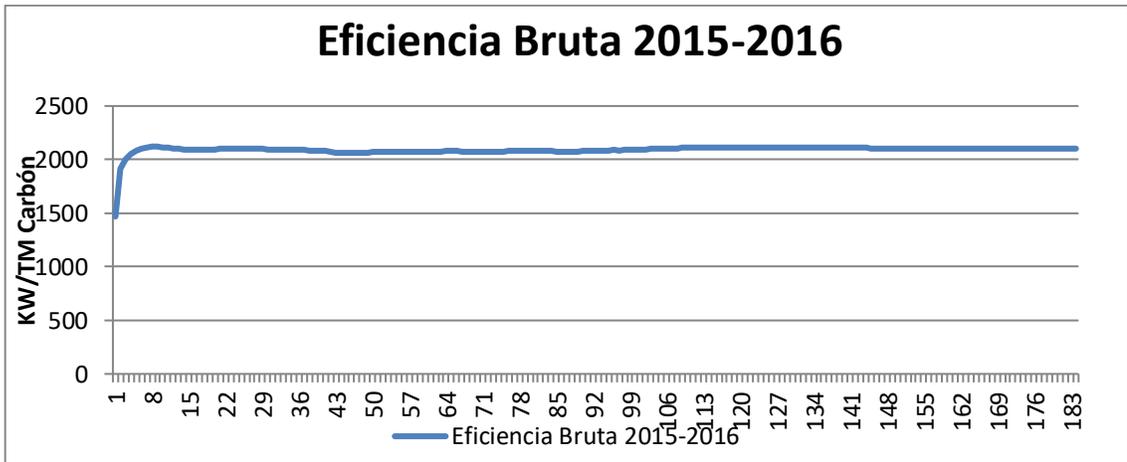
La productividad bruta para el periodo de generación con carbón midió con la cantidad de kW generados divididos por la cantidad carbón necesario para generarlos durante el periodo completo donde se tuvo la operación de la planta, llevando un estricto control del análisis de condiciones en los equipos rotativos.

Figura 82. **Eficiencia Bruta 2014-2015**



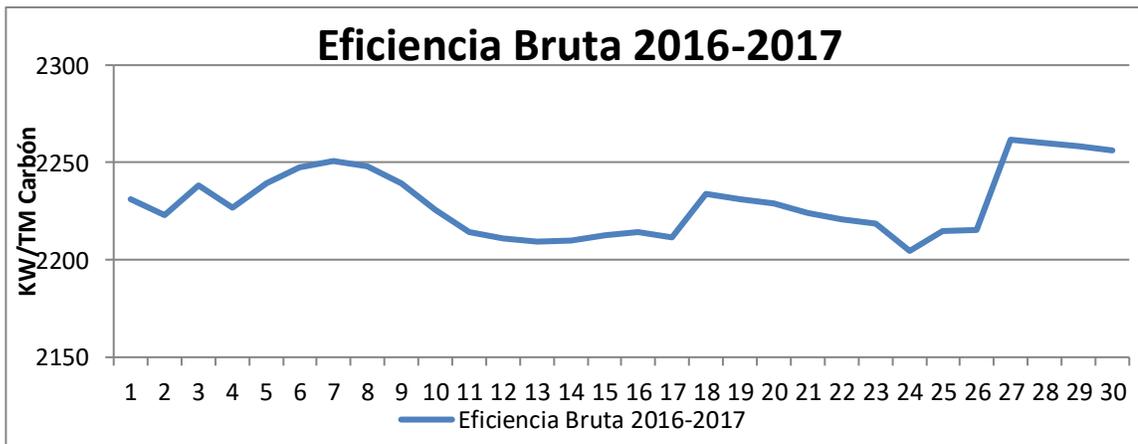
Fuente: elaboración propia.

Figura 83. Eficiencia bruta 2015-2016



Fuente: elaboración propia.

Figura 84. Eficiencia bruta 2016-2017



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Resumen de productividad bruta**

<b>Periodo</b>	<b>Eficiencia Bruta Carbón kW Generados/ t. Carbón</b>
2014-2015	1587.54
2015-2016	2106.20
2016-2017	2256.43

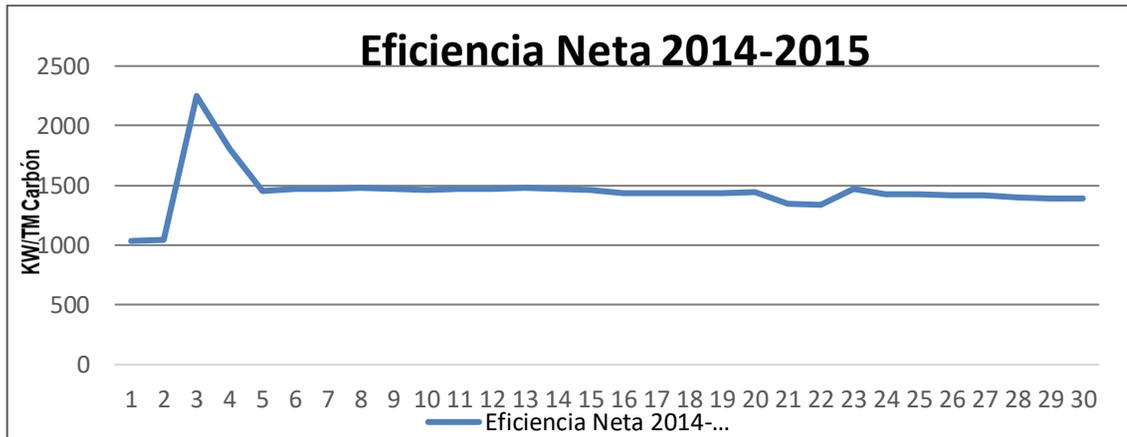
Fuente: elaboración propia.

La productividad bruta representa la energía que se generó con el total del combustible y es una medida de productividad más general, para este caso se determinó que en el periodo 2015-2016 se tuvo un incremento del 32.7 % tomando como base el 2014-2015 cuando no se contaba con el análisis de condiciones de los equipos rotativos, así mismo se puede determinar que para el periodo 2016-2017 la productividad se mantuvo con relación al periodo anterior.

- Productividad eficiencia neta carbón

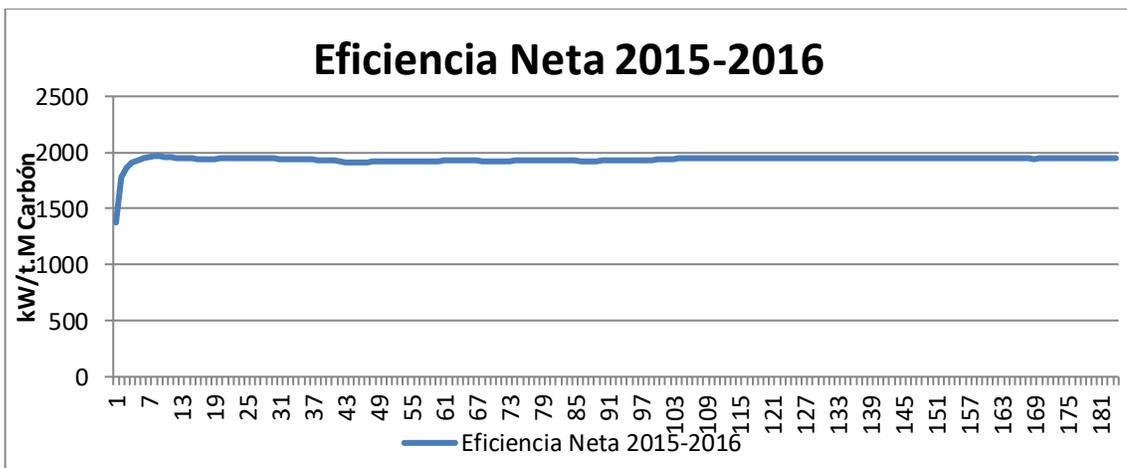
La productividad neta para el periodo de generación con carbón midió con la cantidad de kW aportados a la venta divididos por la cantidad carbón necesario para generarlos durante el periodo completo.

Figura 85. Eficiencia neta 2014-2015



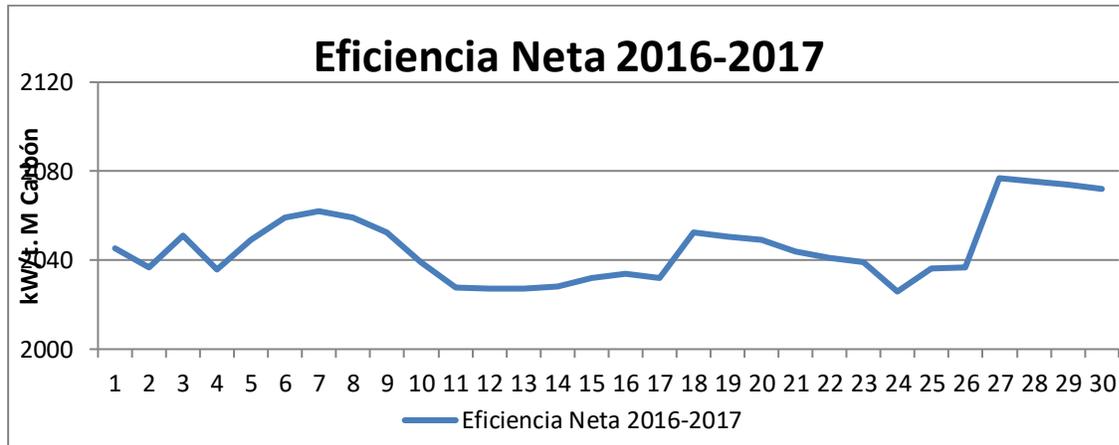
Fuente: elaboración propia.

Figura 86. Eficiencia neta 2015-2016



Fuente: elaboración propia.

Figura 87. **Eficiencia neta 2016-2017**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Resumen de productividad neta**

<b>Periodo</b>	<b>Eficiencia Neta Carbón kW Vendidos/ t. Carbón</b>
2014-2015	1450.50
2015-2016	1944.94
2016-2017	2072.11

Fuente: elaboración propia.

La productividad neta representa la energía que se vendió al sistema nacional interconectado teniendo punto de comparación la cantidad de combustible utilizado, esto para determinar una productividad más específica descontando la energía utilizada para la producción de la misma en la planta, se determinó que en el periodo 2015-2016 se tuvo un incremento del 34 % tomando como base el periodo 2014-2015 y mientras para el periodo 2016-2017 la productividad se mantuvo con relación al periodo anterior, dando resultados

positivos con relación a la implementación del análisis de condiciones en equipos rotativos, y con ello garantizando la productividad en la planta.

### **3.3. Propuesta del modelo**

Reducir los costos por tiempos perdidos debido a la baja productividad de generación de energía, por medio de la implementación de un sistema de análisis de condiciones en los equipos rotativos.

Para la implementación del análisis de condiciones en equipos rotativos fue necesario realizar diversos cambios en la manera de darle seguimiento y control del mantenimiento, se requirió la implementación del monitoreo de condiciones en equipos rotativos por medio del análisis de vibraciones de manera global y con ello se requirió la elaboración de formatos para realizar las inspecciones de campo. Con esto se buscó determinar las condiciones de operación de los equipos, así también se realizó la planificación de los distintos monitoreos que se determinaron necesarios tanto en del modo de su realización como de la periodicidad con la que se llevarían a cabo. Para ello se debió documentar por medio de un manual de mantenimiento donde se da prioridad al análisis de condiciones para garantizar la continuidad de la producción y con ello la productividad de energía en la primera sección descrita como mantenimiento predictivo.

- **Formatos**

Se trabajó en la creación de formatos para la adecuada recolección de datos en campo, así mismo se puede realizar un análisis de manera rápida de cómo se encuentran funcionando los equipos, estos se llenan de modo manual para luego realizar una tabulación y análisis de estos datos de modo más sencillo, donde se

analiza cada punto de medición y las tres posiciones para cada uno tal como se detalla en la fig. 8.

Figura 88. **Formatos para medición de motor y bomba**

**ANALISIS DE VIBRACIONES A BOMBAS**

---

**BOMBA**

4      3

**MOTOR**

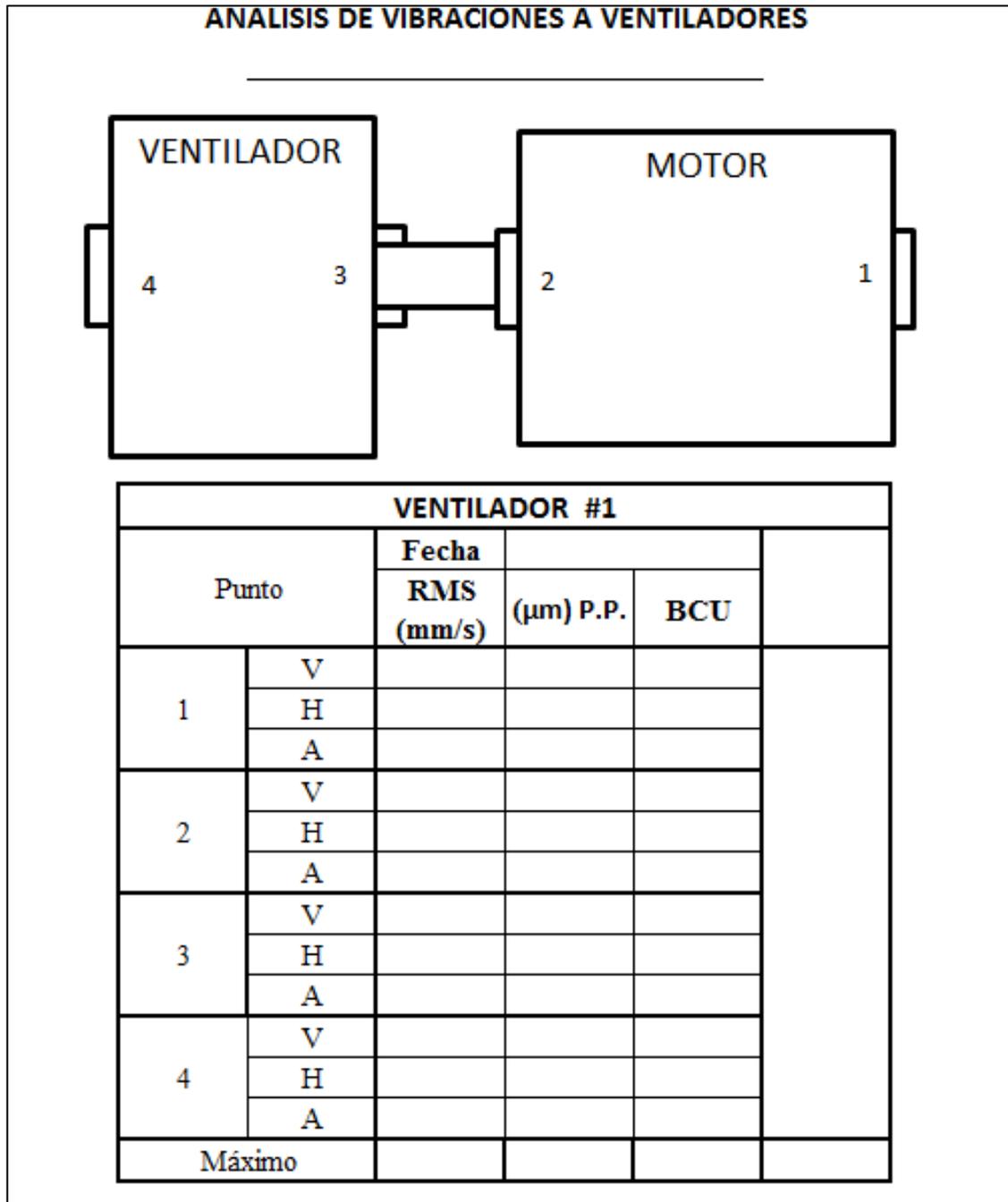
2      1

<b>BOMBA #1</b>				
Punto		Fecha		
		RMS (mm/s)	( $\mu$ m) P.P.	BCU
1	V			
	H			
	A			
2	V			
	H			
	A			
3	V			
	H			
	A			
4	V			
	H			
	A			
<b>Máximo</b>				

Fuente: elaboración propia.

Figura 89. Formatos para medición de motor y ventilador



Fuente: elaboración propia.

- Manual de mantenimiento

Se creó un plan de mantenimiento en donde se agregó el análisis de condiciones en equipos rotativos en la parte de mantenimiento predictivo mecánico como análisis de vibraciones, así también se tienen consideradas e implementadas las termografías y análisis de aceites en este tipo de mantenimiento, pero debido a que en la planta estos últimos análisis los realiza personal externo para la termografía se requiere personal de otra área interna de la planta mientras que el análisis de aceite se realiza por medio de las empresas que proveen los lubricantes. Esas empresas cuentan con el equipo de laboratorio específico para determinar las condiciones en las cuales opera el distinto tipo de aceite así como las condiciones en las que se debiera encontrar según el tiempo de operación de los equipos por lo que la parte completa del mantenimiento predictivo mecánico estaría cubierta para la planta generadora.

Para la realización del manual de mantenimiento, específicamente en la parte del análisis de vibraciones como la parte fundamental del análisis de condiciones en los equipos rotativos, se describe el análisis y la toma de datos de modo manual en los puntos de análisis en los diferentes equipos. Así mismo, se realiza un cronograma de análisis según la periodicidad y la criticidad de los equipos, para esta implementación se analizaron el total de los equipos críticos que se verifican con una periodicidad semanal a menos que estén fuera de funcionamiento por la capacidad de tener equipos simultáneos en algunos casos específicos como lo son las bombas de alimentación de agua y las bombas de recirculación de la torre de enfriamiento, para los demás equipos analizados a los equipos analizados en funcionamiento constante.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el proceso de generación de energía se detectó la necesidad de garantizar la productividad de esto con el objetivo de hacer que la generación de energía fuera continua y de manera estable.

Se decidió incluir entre las rutinas de mantenimiento el análisis de condiciones de operación de los equipos rotativos para la detección de fallas temprano,

Saldivia, Acevedo y Pérez (2013), desarrollaron un plan de estrategias de mantenimiento predictivo en una empresa eléctrica en donde se presenta el estudio de sus componentes principales, estadísticas de fallas y forma de falla de algunos componentes críticos, en su estudio determinan que en base al análisis de condiciones se puede tener un registro confiable del estado operativo de los equipos.

Durante el periodo de análisis se determinaron algunas fallas que pudieron ser críticas debido a que los equipos presentaban algunas mediciones altas de vibración y se trabajó en encontrar el problema mediante la planeación de mantenimiento preventivo.

Con relación a las condiciones iniciales de operación se detectó que durante las primeras mediciones de los equipos críticos analizados se tuvieron mediciones en la zona A (máquina nueva) de la tabla de valores límites para evaluar vibraciones según ISO 10816-3, por lo que se determina que al inicio de

la implementación se contaba con equipos en adecuadas condiciones de operación a largo plazo.

Durante el periodo de cogeneración de energía 2016 - 2017 se logró una productividad más estable es decir que la generación de energía fue muy constante a pesar de que en términos de kW/t. de caña se tuvo una pequeña reducción comparada con el año anterior, sin embargo, se dicha reducción es atribuible a condiciones externas al proceso como lo pudo ser la calidad del combustible es decir bagazo quemado, la suciedad que pueda traer el bagazo, etc. tal como se pudo observar con más detalle en la tabla XIII.

La generación de energía durante el periodo 2016-2017 experimentó un aumento en la eficiencia comparada con el periodo 2015-2016, a pesar de que durante el periodo 2016-2017 fue demasiado inestable, debido a que el AMM, solicitaba que se redujera la generación al mínimo posible denominado mínimo técnico. Esto hizo que los equipos no fueran tan eficientes como lo hubieran sido si trabajaran en las condiciones para las cuales fueron diseñados, esto se debió a las lluvias de este último periodo. Por esta razón, la generación por combustible carbón no fue necesaria a partir del 16 de junio del 2017.

Durante el periodo de generación de energía se representa a detalle el costo de carbón tomando en consideración que se generan 45,000kW en una hora, tomaremos el precio del carbón a US\$110/t. de Carbón, el tipo de cambio lo tomaremos a Q7.35/US\$.

Tabla V. **Cuadro de consumo de carbón diario**

Periodo	Generación Diaria kW	Eficiencia Bruta Carbón kw Generados/ t. Carbón	Consumo de carbón diario
2014-2015	1080000.00	1587.54	680.30
2015-2016	1080000.00	2106.20	512.77
2016-2017	1080000.00	2256.43	478.63

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Cuadro costo de carbón mensual**

Consumo de Carbón Diario T.M.	Costo Carbón (\$/T.M.)	Tipo de Cambio (Q.)	Costo de Carbón Diario (Q.)	Costo de Carbón Mensual (Q.)
680.30	110.00	7.35	550,020.79	16,500,623.61
512.77	110.00	7.35	414,575.33	12,437,259.89
478.63	110.00	7.35	386,974.57	11,609,237.03

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Comparación costo de carbón mensual por periodo**

PERIODOS	Costo de Carbón Diario (Q.)	Costo de Carbón Mensual (Q.)	Diferencia
2014-2015			
2015-2016	135,445.46	4,063,363.72	133 %
2014-2015			
2016-2017	163,046.22	4,891,386.57	142 %
2015-2016			
2016-2017	27,600.76	828,022.86	107 %

Fuente: elaboración propia.

Como se describe en las tablas, se tiene un ahorro significativo en los periodos del 2015-2016 y 2016-2017 comparados con el 2014-2015, tomando como punto de referencia las productividades de los periodos para calcular el

combustible utilizado diariamente y mensualmente, con lo que se puede determinar el costo del combustible utilizado a lo largo del mes en análisis, se tuvo un ahorro del periodo 2014-2015 al 2015-2016 de Q4,063,364 lo cual significa un 33 % de ahorro mientras que para el 2016-2017 comparado con el 2014-2015 Q4,891,387 que representa un 42 %. Esto evidencia la importancia de mantener la productividad en la planta de generación debido al impacto que se tiene en el combustible por el alto precio que tiene este, por ello la implementación del sistema de análisis de condiciones vino a fortalecer estos valores de productividad haciendo que se cuente con una garantía de la operación de los equipos y aumentando la capacidad de producir ahorros en temas como lo son los costos que conlleva la ineficiencia de un proceso improductivo.

Así también, durante el periodo 2016-2017 se obtuvo un ahorro de cerca de Q830,000.00 lo que representa un 7 % del periodo 2015-2016 en igualdad de condiciones, únicamente en combustible, esto sin tomar en cuenta los costos en los que se hubiese incurrido si no se hubiera cumplido en la generación.

#### **4.1. Análisis interno**

La fortaleza de la investigación radica en la importancia que se brinda en garantizar la productividad debido a que es determinante para la confiabilidad de la operación, con esto se obtiene un mejor manejo de los activos y equipos debido a la administración oportuna de los repuestos y accesorios que se adaptan a los mismos, otra fortaleza es la implementación del seguimiento por medio de bases de datos donde se genera una trazabilidad de las condiciones de operación de los equipos.

Por otra parte, las debilidades de la investigación radican en obtener repuestos de modo emergente, lo cual encarece la operación conforme a lo establecido en los presupuestos que se realizan generalmente anuales, pero cabe mencionar que si se diera un paro por una falla no detectada el costo se incrementaría y por ello es preferible correr con el costo del repuesto. Otra debilidad que se detecta es la gestión del talento humano adecuado para buscar el personal con las capacidades y aptitudes que se requieren para llevar a cabo la labor del monitoreo y el adecuado análisis, así también se puede mencionar como debilidad la cantidad de equipos a analizar de manera periódica lo que genera sobrecarga laboral en una persona en específico.

#### **4.2. Análisis externo**

Hay que mencionar que durante la evaluación inicial de los equipos no se detectaron posibles amenazas de fallas tempranas como pudieron haber sido las siguientes:

- Mal cálculo de los equipos desde el diseño
- Mala instalación
- Solturas del equipo con la base
- Desalineación entre motor y equipo conducido
- Desbalance en el caso de los ventiladores
- Fragilidad en la estructura

Sosa (2008), realizó un diseño y análisis de vibraciones aplicado a sistemas de generación eléctrica, en donde realizó un análisis y cálculos de algunos componentes mecánicos de equipos críticos de la planta usando como herramienta básica el análisis de vibraciones para realizar los mismos.

En el caso de esta implementación se pudo observar que existen muchas más amenazas al momento de la instalación de los equipos que cuando estos mismos ya se encuentran en operación continua.

La oportunidad más importante con la que se cuenta es con la posibilidad de buscar una mejora continua en el manejo del análisis de condiciones de equipos rotativos, ya que se tiene la oportunidad de implementar estos análisis en los demás procesos relacionados con la Cogeneración de Energía que dedican específicamente a la molienda de caña y fabricación de azúcar en la planta.

Ruiz y Acevedo (2012), en su estudio en su trabajo de graduación de especialización en gerencia de mantenimiento, en una planta petrolera obtuvo como resultado de la implementación de un mantenimiento predictivo que la disponibilidad aumentó del 95 % al 97 %, se redujeron las pérdidas en la producción dando como resultado una mayor disponibilidad de los sistemas y generando una mayor productividad del producto crudo.

Se puede observar en las tendencias de las gráficas de eficiencia durante el periodo de cogeneración de energía que cada año fueron tomando una tendencia más estable, lo que representa que se tuvieron menos paros por mantenimiento, haciendo que la eficiencia no decayera, hasta lograr en el último año que fuera estable a lo largo del periodo.

Ruiz y Acevedo., (2012) en su estudio en su trabajo también menciona una reducción de 10 % en los costos de mantenimiento a pesar de que la implementación tenía únicamente 1 año de haberse llevado a cabo.

En este caso es importante mencionar el ahorro de combustible para los periodos de generación con carbón ya que fueron representativos debido al costo alto del combustible, como se pudo observar del 2015-2016 y 2016-2017 comparados con el 2014-2015, tomando como punto de referencia las productividades de los periodos para calcular el combustible utilizado diaria y mensualmente, se tuvo un ahorro del periodo 2014-2015 al 2015-2016 de Q4,063,364 siendo un 33 % de ahorro mientras que para el 2016-2017 comparado con el 2014-2015 Q4,891,387 siendo un 42 % lo que hace notar la importancia de mantener la productividad en la planta de generación siendo esto un ahorro mayor al 10 % del que logró Ruiz.



## CONCLUSIONES

1. Se determinó que los equipos rotativos tienen condiciones iniciales de operación las cuales son definidas en gran parte por la instalación de los equipos, por ello es sumamente importante determinar desde un inicio si se encuentran trabajando bajo los rangos aceptables de operación para evitar las posibles fallas que pudieran provocar paros, afectando directamente la productividad del ciclo completo. Entre las fallas más comunes se tienen los desbalances en los equipos, desalineamientos entre motor y equipo rotativo entendiéndose ventilador o bomba para el caso de los equipos analizados, así como solturas en los elementos rodantes. Además, se deben tener debidamente definidos los límites de operación de los equipos para definir en qué momento realizar las correcciones de las fallas contando con los equipos y repuestos necesarios y así no afectar la productividad por la falta de algún equipo crítico debido a que si se tiene alguna fallas en el proceso, el ciclo no es lo suficientemente eficiente.
2. Se definió que en todo proceso se cuenta con equipos sin los cuales se complica cumplir con el 100 % de la producción esperada e incluso en algunos casos sin los cuales no se puede llegar ni a producir nada, afectando directamente la productividad ya que tendríamos una reducción de la misma, por la relación que tenemos de salidas/entradas, es por esta razón que se deben determinar cuáles son estos equipos y el grado de importancia que tiene al momento de fallar, para la planta generadora se detectaron 15 equipos denominados críticos, los cuales se monitorearon de manera independiente de manera periódica, obteniendo con esto una

serie de datos, determinando que se encontraban en su mayoría en una zona de operación aceptable.

3. Se observó que la productividad está directamente relacionada con los costos de operación debido a que si tenemos un proceso eficiente el costo por unidad producida en este caso energía eléctrica es menor a que si el proceso es ineficiente por alguna falla en los equipos críticos. También es importante mencionar que durante la implementación se detectó que durante los periodos de cogeneración de energía se tuvo una considerable mejora en la estabilidad de la productividad esto debido a que se realizaron menos trabajos de mantenimiento correctivo en el periodo 2016-2017, comparado con los periodos anteriores; con relación a la generación de energía se tuvo un incremento en la productividad, esto debido a el adecuado seguimiento de operación de los equipos, logrando que la operación fuera más eficiente logrando incrementar la productividad y con ello tener ahorros de hasta 42 % en términos de combustible al mes.
4. Se estableció que el sistema que mejor se adapta para garantizar la productividad de generación de energía es un adecuado análisis de condiciones a equipos rotativos en los cuales se debe llevar un control periódico de los parámetros bajo los cuales están trabajando los equipos además de tener debidamente definidos los límites de operación de los mismos. Este tipo de análisis se realizó en campo, directamente en contacto directo equipos rotativos con rodamiento y demás componentes que pudieran llegar a dañarse si existiera alguna falla que no fuera detectada a tiempo, con ello se puede mantener la una buena productividad teniendo los equipos trabajando con su máxima capacidad y teniendo una eficiencia mayor que sí estuviera alguno fuera de línea por reparaciones de emergencia.

## RECOMENDACIONES

1. Medir las condiciones de operación luego de instalar equipos nuevos, en los puntos en donde tengan elementos rodantes que puedan causar algún paro no programado a la planta, con esto se logra que el equipo y las estructuras sobre las cuales están soportados se encuentran en condiciones adecuadas de operación y, si se detecta alguna falla, se podrá actuar de manera inmediata para mitigarlas.
2. Definir en las diferentes industrias cuáles son los equipos que se consideran críticos, siendo estos los que merman la capacidad de producción de la planta de modo inmediato. También se deben analizar periódicamente para garantizar que trabajen en condiciones aceptables debido a la importancia que tienen en el proceso y que afectan directamente la producción y con ello la productividad de la planta.
3. Realizar, para una futura implementación de análisis de condiciones, la cuantificación de repuestos utilizados durante los mantenimientos cuando se detecten fallas y se programen adecuadamente los mantenimientos comparados con los costos de un paro no programado, tomando en consideración los costos del mantenimiento, así como los costos de degradación con el AMM y costos de compra de energía durante el tiempo que se encuentre fuera de línea la planta.
4. Realizar este tipo de análisis en las plantas generadoras debido a que estas incurren en gastos fuertes si no se cumple con la programación del AMM debido a que las fallas pueden llegar a presentarse de manera

imprevista, causando que el tiempo de respuesta vaya determinado por la disponibilidad de algún repuesto o bien del tiempo que se lleve el conseguirlo, así mismo en la planta donde se llevó a cabo la implementación se sugiere continuar con la determinación de fallas para aumentar la productividad.

5. Requerir que, como parte de la mejora continua, se lleven los análisis de datos de los periodos desde la implementación hasta que se defina como una actividad de seguimiento normal en la industria. En este caso la implementación se realizó en los periodos comprendidos en los años 2015, 2016 y 2017 teniendo resultados positivos y quedando como una actividad de seguimiento ya establecida que está siendo aplicada desde ese momento, por lo que no se utilizaron los valores de los periodos 2018, 2019 y 2020 para los análisis.

## REFERENCIAS

1. Aguilar K. (2012). *¿Cómo se genera la energía eléctrica en Guatemala?* Guatemala: Instituto de Ciencias y Tecnología para el Desarrollo InCyTDE. Recuperado de <http://www.incytde.org/incytde/content/c-mo-se-genera-la-energ-el-ctrice-en-guatemala>.
2. Arimón, G. (Marzo de 1997). *Productividad total de factores revisión metodológica y una aplicación al sector manufacturero uruguayo*. Oficina de la CEPAL en Montevideo (Estudios e Investigaciones) 28778, Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
3. Carro y González, (s.f.) *Productividad y Competitividad*. Administración de las Operaciones. (16) p. 3.
4. Domínguez S. Sánchez E. Sánchez G. (2009). *Guía Para Elaborar Una Tesis*. (1st Ed.). México, D.F. México. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. De C.V.
5. Emerson Process Management. (s.f.). *Estrategias de Mantenimiento y Prácticas de trabajo para Reducir los Costos en Operaciones y Mantenimiento* 101. Recuperado de [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/BusSch-op-maint\\_101es.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/BusSch-op-maint_101es.pdf).

6. Emerson Process Management. (Mayo de 2019). *Servicios De Mantenimiento Predictivo y Apoyo Operativo A BP*. Recuperado de <https://www.emerson.com/es-mx/news/automation/1905-bp-clair-bridge>.
7. Endesa Educa. (s.f.). *Centrales de Biomasa*. Recuperado de <http://www.endesaeduca.com/Endesa-educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv..-las-centrales-de-biomasa>.
8. Endesa Educa. (s.f.). *Centrales eléctricas*. Recuperado de [http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/vii.-las-centrales-electricas](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/vii.-las-centrales-electricas).
9. Energiza. (s.f.). *Plantas de Cogeneración*. Recuperado de <http://www.plantasdecogeneracion.com>.
10. Gaffert, G.A. (1981). *Centrales de Vapor*. Barcelona: Reverté, S.A.
11. Golato, M.A. (Diciembre de 2005). Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico. *Industrial y Agrícola de Tucumán*. Recuperado de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1851-30182005000100003](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182005000100003).
12. Grupo SKF. (2017). *Daño de Rodamientos y Análisis de Fallas*. Recuperado de [https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d196807d76f8-Bearing-failures---14219\\_2-ES-AR\\_tcm\\_201-297619.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d196807d76f8-Bearing-failures---14219_2-ES-AR_tcm_201-297619.pdf).

13. Hernández R. (2014). *Metodología De La Investigación*. (6th Ed.). México, D.F. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
14. Martínez C. (2001). *Análisis vibracional en Equipos Rotativos y Mantenimiento Predictivo*.
15. Muñoz C. (2011). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*. (2nd ed.). México, D.F. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
16. Norma ISO 10816-3. *Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, potencia o altura de eje*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.rodamientos.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>.
17. Prieto, I. (2000). *Sistemas de Escorias y Cenizas*. Centrales Térmicas. (18) p. 1.
18. Ruiz Acevedo, A. M. (2012). *Modelo para la Implementación de Mantenimiento en las Facilidades De Producción De Petróleo*. (Tesis de especialización) Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
19. Saldivia F. Acevedo E. Pérez R. (2013). Estrategias de Mantenimiento Predictivo Aplicables a Transformadores de Potencia de una Empresa Eléctrica. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (11th ed.). Recuperado de <http://www.laccei.org/LACCEI2013Cancun/RefereedPapers/RP266pdf>.

20. Sosa, R. E. (2008). *Diseño Mecánico y Análisis de Vibraciones Aplicado a Sistemas de Generación Eléctrica de Alta Velocidad de Giroo*. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
  
21. Tenaris. (s.f.). *Centrales Eléctricas a Carbón*. Recuperado de <http://www.tenaris.com/esES/Products/PowerGeneration/CoalFire/dPowePlants.aspx>.

## APÉNDICE

### Apéndice 1.      **Diseño de un sistema de análisis de condiciones en equipos rotativos para garantizar la productividad de generación de energía**

Título	Preguntas Orientadoras	Objetivo	Conclusiones	Recomendaciones
DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE CONDICIONES EN EQUIPOS ROTATIVOS PARA GARANTIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	¿Qué sistema analítico en equipos rotativos se puede utilizar para garantizar la productividad de generación de energía?	Diseñar un sistema de analítico de condiciones en equipos críticos para garantizar la productividad de generación de energía	El sistema que mejor se adapta para garantizar la productividad de generación de energía es un adecuado análisis de condiciones a equipos rotativos en los cuales se debe llevar un control periódico de los parámetros bajo los cuales están trabajando los equipos además de tener debidamente definidos los límites de operación de los mismos, este tipo de análisis se realizó en campo, directamente en contacto directo equipos rotativos con rodamiento y demás componentes que pudieran llegar a dañarse si existiera alguna falla que no fuera detectada a tiempo.	1. Se recomienda que este tipo de análisis se realice en las plantas generadoras debido a que estas incurren en gastos fuertes si no se cumple con la programación del AMM debido a que las fallas pueden llegar a presentarse de manera imprevista, causando que el tiempo de respuesta vaya determinado por la disponibilidad de algún repuesto o bien del tiempo que se lleve el conseguirlo.
	¿Cuáles son las condiciones iniciales de operación y las posibles fallas que en los equipos rotativos críticos que causarían paros afectando la productividad de energía?	1. Determinar las condiciones iniciales de operación de las máquinas rotativas y las posibles fallas que se podrían darse en las mismas que afectarían la productividad de energía.	1. Los equipos rotativos tienen condiciones de puesta en marcha las cuales son definidas en gran parte por la instalación de los equipos, por ello es sumamente importante determinar desde un inicio si se encuentran trabajando bajo los rangos aceptables de operación para evitar las posibles fallas que pudieran provocar paros afectando directamente la productividad del ciclo completo debido a que si se tiene alguna falla en el proceso, el ciclo no es lo suficientemente eficiente es decir se puede necesitar más combustible para generar la misma cantidad de energía.	1. Es importante que siempre que se instalen equipos nuevos se midan las condiciones de operación luego de su instalación en los puntos en donde tengan elementos rodantes que puedan causar algún paro no programado a la planta, con esto lograrán garantizar que tanto el equipo como las estructuras sobre las cuales están soportados se encuentran en condiciones adecuadas de operación mientras que si se detecta alguna falla se podrá actuar de manera inmediata para mitigarlas.

Continuación de apéndice 1.

<p>¿Cuáles son los equipos críticos de operación y como afectan los paros en los mismos la productividad de energía?</p>	<p>1. Identificar los equipos críticos e identificar como afectan los paros en los mismos la productividad de energía.</p>	<p>En todo proceso se cuenta con equipos sin los cuales se complica cumplir con el 100 % de la producción esperada e incluso en algunos casos sin los cuales no se puede llegar ni a producir nada, afectando directamente la productividad ya que tendríamos una reducción de la misma, por la relación que tenemos de salidas/entradas, es por esta razón que se deben determinar cuáles son estos equipos y el grado de importancia que tiene al momento de fallar, para la planta generadora se detectaron 15 equipos denominados críticos, los cuales se monitorearon de manera independiente de manera periódica, obteniendo con esto una serie de datos que al momento de graficarlos se puede tener la tendencia, determinando que se encontraban en su mayoría en una zona de operación aceptable.</p>	<p>1. Los equipos que se consideran críticos se deben analizar de manera periódica para garantizar que trabajen en condiciones aceptables debido a la importancia que tienen en el proceso y que afectan directamente la producción y con ello la productividad de la planta.</p>
<p>¿Cómo se pueden disminuir los costos por paros por producción generando baja productividad en la generadora?</p>	<p>1. Reducir los costos por tiempos perdidos debido a la falta de productividad.</p>	<p>La productividad está directamente relacionada con los costos de operación debido a que si tenemos un proceso más eficiente el costo por unidad producida en este caso energía eléctrica debieran ser menores a que si el proceso es ineficiente por alguna falla en los equipo crítico denominados, también es importante mencionar que durante la implementación se detectó que durante los periodos de zafra se tuvo una considerable mejora en la estabilidad de la productividad esto debido a que se realizaron menos trabajos de mantenimiento correctivo en el periodo 2016-2017, comparado con los periodos anteriores; en relación a la generación con carbón se tuvo un incremento en la productividad, esto debido a el adecuado seguimiento de operación de los equipos, logrando que la operación fuera más eficiente logrando incrementar la productividad.</p>	<p>Se recomienda para una futura implementación de análisis de condiciones realizar cuantificación de repuestos utilizados durante los mantenimientos realizados cuando se detecten fallas y se programen adecuadamente los mantenimientos comparados con los costos de un paro no programado, tomando en consideración los costos del mantenimiento, así como los costos de degradación con el AMM y costos de compra de energía durante el tiempo que se encuentre fuera de línea la planta.</p>

Fuente: elaboración propia.