

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
VIBRACIONES EN UN EQUIPO ROTATIVO DE BUENCAFÉ LIOFILIZADO DE
COLOMBIA (ESTUDIO DE CASO)**

**DIEGO MAURICIO GUTIÉRREZ GIRALDO
EDWIN SERNA HENAO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA
PEREIRA
2014**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
VIBRACIONES EN UN EQUIPO ROTATIVO DE BUENCAFÉ LIOFILIZADO DE
COLOMBIA (ESTUDIO DE CASO)**

**DIEGO MAURICIO GUTIÉRREZ GIRALDO
EDWIN SERNA HENAO**

Trabajo para optar al título de ingenieros en Mecatrónica

Director
Ing. Saúl Erazo

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA
PEREIRA
2014**

Nota de aceptación:

Firma del presidente o jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira 29 de mayo de 2014

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. ETAPA DE PLANEAMIENTO	15
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	15
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2.1 Formulación del problema	17
1.2.2 Sistematización del Problema.	17
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	18
1.4 OBJETIVOS.....	19
1.4.1 General.....	19
1.4.2 Específicos.....	19
2. MARCO DE REFERENCIA.....	20
2.1 MARCO TEÒRICO-CONCEPTUAL	20
2.2 Mantenimiento	20
2.3 Tipos de Mantenimiento	20
2.3.1 Mantenimiento Correctivo.....	20
2.3.2 Mantenimiento Preventivo.	21
2.3.3 Mantenimiento Predictivo.	21
2.4 Sistemas de Gestión.....	23
2.4.1 TPM.....	23
2.5 Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones	25
2.6 VIBRACIONES MECÁNICAS	25
2.6.1 Consecuencias de las Vibraciones.....	27
2.6.2 Tipos de vibraciones mecánicas.....	28
2.6.2.1 Vibración por desbalance.	29
2.6.2.2 Vibración por falta de alineamiento.	29
2.6.2.3 Vibración por Excentricidad.	30

2.6.2.4 Vibración a causa de rodamientos y Chumaceras defectuosas.	30
2.6.2.5 Elementos Rodantes Defectuosos.	32
Falla de Rodamientos – Otras causas.....	32
2.6.2.6 Vibración por lubricación inadecuada.....	33
2.6.2.7 Vibración por Aflojamiento Mecánico.	33
2.6.2.8 Vibración por Bandas de Accionamiento.	33
2.6.2.9 Vibración por Problemas de Engranaje.	34
2.7 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN.....	35
2.7.1 Parámetros de medición y análisis de vibración.....	35
2.7.2 Tipos de sensores o transductores empleados en la medición de vibraciones.	36
2.7.3 Unidades para la medición de vibraciones.	40
2.8 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN LOCAL EN LÍNEA.....	43
2.8.1 Ventajas del análisis de vibraciones.....	44
2.9 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	45
2.10 SISTEMAS SCADA	46
2.10.1 Fundamentación teórica de los Sistemas SCADA.....	46
2.10.2 Requisitos básicos para adquirir un sistema SCADA.	47
2.10.3 Funciones Principales del Sistema.	48
2.10.4 Elementos del Sistema SCADA.....	49
2.11 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	50
2.12 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN PORTÁTIL O DE NIVEL GLOBAL	51
2.12.1 Equipos empleados para la medición de la vibración portátil.	52
2.13 ANALISIS DE VIBRACIÓN	53
2.13.1 Tipos de Normas.	53
2.13.2 Tipos de maquinaria.	53
2.14 NORMAS EMPLEADAS PARA LA MEDICIÓN DE LA CRITICIDAD DE LA VIBRACIÓN	54
2.14.1 Carta de Rathbone.	54
2.14.2 Norma ISO 2372 de 1974.....	56

2.14.3 Norma ISO 10816 de 1995.....	57
2.14.4 Normas para certificación en análisis de vibraciones mecánicas.	60
2.15 COMO PUEDE USARSE LA VIBRACIÓN PARA EVALUAR CONDICIONES EN UNA MÁQUINA	61
2.15.1 Parámetros de la vibración.....	62
2.15.2 Diagnóstico de vibraciones según su espectro de vibración.	67
2.15.3 Como analizar un espectro de vibración.	68
2.16 FALLAS MÁS COMUNES PARA EQUIPOS ROTATORIOS.....	69
3. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA PLANTA.....	76
3.1 Recibo materia prima.....	77
3.2 Tostación	78
3.3 Extracción.....	78
3.4 Clarificación	78
3.5 Concentración.....	79
3.6 Congelación.....	79
3.7 Liofilización	80
3.8 Empaque granel y frascos	80
4. MARCO METODOLÓGICO	80
4.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO.....	80
4.2 ANÁLISIS DEL PROCESO	83
4.3 SELECCIÓN DEL EQUIPO	84
4.3.1 Descripción del Equipo.....	84
4.3.2 Partes y Dimensiones del equipo	85
5. RESULTADOS	86
5.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE LECTURA, TOMA DE DATOS EN TIEMPO REAL E IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR.....	86
5.1.1 Características del sensor.	87
<i>Datos de placa del sensor</i>	87
5.1.2 Montaje típico sensor de vibración	88

5.1.3 Circuito electrónico para montaje al plc del transmisor de vibración.	88
5.1.4 Esquema Eléctrico.....	93
5.2 PRUEBAS Y MANTENIMIENTO A EQUIPO PILOTO, PREVIO A LA	
IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR	95
5.2.1 Mantenimiento General de la clarificadora.	96
5.2.2 Montaje mecánico.	98
5.3 PANEL DE VISUALIZACION EMPLEANDO EL SOFTWARE IN TOUCH	102
5.3.1 Modificación de la programación ladder en el PLC.	115
5.4 ANALISIS Y ESTUDIO DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	125
5.4.1 Visualización de gráficos en el software de supervisión en planta.	127
5.4.2 Niveles de vibración en la clarificadora.	133
RECOMENDACIONES	138
BIBLIOGRAFÍA.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta buencafe	15
Figura 2. excitaciones mecanicas	27
Figura 3. Vibraciones en rodamientos.....	28
Figura 4. Suciedad en clarificadora.....	29
Figura 5. Sensor de movimiento o desplazamiento	37
Figura 6. Sensor de velocidad	38
Figura 7. Sensor de aceleración	40
Figura 8. Frecuencia y amplitud en funcion del tiempo	41
Figura 9. Unidades de medicion de las vibraciones	42
Figura 10. Interrelación de unidades de medición de vibraciones	42
Figura 11. Interpretación de unidades de medición de vibraciones.....	43
Figura 12. Esquema de adquisición de datos	45
Figura 13. Prototipo de sistema SCADA	47
Figura 14. Diagrama de una adquisición de datos	50
Figura 15. Esquema de comunicación en una planta industrial	51
Figura 16. Medidor de vibraciones portable FLUKE 805.....	52
Figura 17. Carta de <i>Rathbone</i>	56
Figura 18. Tabla de severidad de vibración según norma ISO 2372.....	57
Figura 19. Tabla de severidad de vibración según norma ISO 10816.....	60
Figura 20. Parámetros que definen la vibración.....	64
Figura 21. FFT de ondas vibratorias	66
Figura 22. FFT a partir de señales sinusoidales	67
Figura 23. Componentes de un espectro de vibración.....	68
Figura 24. Espectro de vibración por desbalance	70
Figura 25. Desalineación Paralela	71
Figura 26. Desalineación Angular	71
Figura 27. Tipos de holgura mecánica	72
Figura 28. Etapas de daño de un rodamiento	75

Figura 29. Café soluble liofilizado (<i>freeze dried</i>)	77
Figura 30. Proceso de liofilización	77
Figura 31. Clarificadora o Centrífuga	78
Figura 32. Efecto de la fuerza centrífuga	79
Figura 33. Costos Mantenimiento Clarificadoras Desde 2010	82
Figura 34. La Clarificación dentro del proceso productivo	83
Figura 35. Vista Alzado del equipo.....	85
Figura 36. Vista en Planta del equipo	85
Figura 37. Vista Lateral Izquierdo del equipo.....	86
Figura 38. Supervisión en Planta.....	87
Figura 39. Sensor Metrix ST5484E.....	87
Figura 40. Montaje típico sensor de vibración.....	88
Figura 41. Montaje Electrónico	89
Figura 42. Alimentación Fusibles entradas 24 VDC - UPS	90
Figura 43. Tarjeta salidas análogas PLC.....	91
Figura 44. Conexión transmisor de vibración.....	92
Figura 45. Ensamble conjunto sensor vibración clarificadora 1	93
Figura 46. Línea conexión eléctrica vibración clarificadora 1	94
Figura 47. Orden de mantenimiento general.....	97
Figura 48. Soporte eje del tambor Clarificadora.....	98
Figura 49. Orientación punto de medición	99
Figura 50. Desensamble de Pieza a Mecanizar.....	100
Figura 51. Imágenes de Implementación.....	101
Figura 52. Menú de inicio SCADA	103
Figura 53. Selección del PLC.....	104
Figura 54. Grupo de Equipos	105
Figura 55. Ventana de trabajo.....	106
Figura 56. Valor de Vibración.....	107
Figura 57. Configuración variable análoga.....	108
Figura 58. Asignación nombre de variable.....	109

Figura 59. Configuración del <i>Tagname</i>	110
Figura 60. Selección de entrada y salida real	111
Figura 61. Grupo de Alarmas	112
Figura 62. Configuración de la gráfica del registro.....	113
Figura 63. Asignación <i>Acces Names</i>	114
Figura 64. Configuración de Bandera	115
Figura 65. Ingreso RSLogix 500 Spanish.....	116
Figura 66. Importar Programa	117
Figura 67. Programa Clarificadora 1	118
Figura 68. Insertar renglón en <i>Ladder</i>	119
Figura 69. . Insertar SCP “Escarlar con parámetros”	119
Figura 70. Parametrización del SCP.....	120
Figura 71. Disponibilidad de bandera	121
Figura 72. Archivo datos de bandera	121
Figura 73. Selección de Bandera.....	122
Figura 74. Datos insertados Escalado de la variable	123
Figura 75. Verificación del renglón insertado	124
Figura 76. Resultado final Escalamiento de la señal	124
Figura 77. Esquema manejo Extracto Diluido	125
Figura 78. Medida de la velocidad de vibración en la pantalla	127
Figura 79. Botón para gráficos de registros históricos	128
Figura 80. Partes pantalla de gráficos.....	129
Figura 81. Selección del lápiz de gráfico.....	130
Figura 82. Selección de la variable	131
Figura 83. Lápiz para dibujar variable.....	132
Figura 84. Gráficos de Registros Históricos.....	133
Figura 85 Niveles de vibración.....	134
Figura 86. Estado de la Clarificadora según la norma ISO 2372	135
Figura 87. Estado de la Clarificadora según la norma ISO 10816	136
Figura 88. Estado de la Clarificadora según <i>Rathbone</i>	137

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Datos técnicos del equipo.....	84
Tabla 2: Datos técnicos del cable apantallado 2 x 18 AWG	95

RESUMEN

El proyecto se basa en el aprovechamiento de un sensor-transmisor de vibración, el cual, se instala en un equipo rotativo utilizado en el proceso de elaboración de café soluble, específicamente en la etapa de clarificación. Este sensor mide la cantidad de vibración generada en la máquina “clarificadora” y mediante una señal análoga (4 mA a 20 mA), (sensor tipo acelerómetro) la transmite al *PLC* de control. El sistema permite la captura y toma de datos en tiempo real, la variable es medida en velocidad de vibración [mm/s].

La información generada en el controlador es registrada y graficada en un *PC* de supervisión de proceso *SCADA*. Los datos almacenados son analizados mediante las normas *ISO 2372*, *ISO 10816* y la carta de *Rathbone*, las cuales ayudan a conocer el estado y funcionamiento del equipo que permiten recomendar un mantenimiento basado en condición.

La implementación de este proyecto entrega como resultado una amplia documentación en el estudio de las vibraciones mecánicas, el diseño y construcción mecánico, eléctrico y electrónico de un sistema de monitoreo de vibraciones y la introducción al mantenimiento predictivo.

INTRODUCCIÓN

En la época actual, debido a las consideraciones demandadas por el mercado mundial, la gestión del mantenimiento se encuentra en un estado de transición en la que la excelencia es considerada parte del producto, puesto que influye de forma determinante en los costos, tiempos de producción y calidad de los productos, sin dejar de lado los factores ambientales.

El departamento de ingeniería como responsable del mantenimiento, de la disponibilidad de los equipos y de la preservación de la vida útil de los mismos, entra a formar parte de la estructura de apoyo de la compañía, ya que es un centro de costo a efectos de los intereses de la organización, el cual deberá perfeccionar el negocio a través de la mejora de las condiciones de productividad.

El desarrollo de nuevas tecnologías ha dado vuelta a la industria mundial, pues en los últimos años la rama de la mecánica se ha visto influenciada por la electrónica, la automatización y las telecomunicaciones, formando una combinación que fortalece el mantenimiento industrial. Surgiendo métodos de pronóstico de puntos de futuras fallas de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse de una forma planificada, basada en un plan, justo antes de que falle, disminuyendo así el tiempo muerto de producción y aumentando las horas de los demás elementos que la componen.

La medición y análisis de vibraciones es una de las muchas técnicas empleadas en la actualidad como diagnóstico de fallas y evaluación de la integridad de máquinas y estructuras, con un factor destacado, y es la evaluación de los equipos rotatorios en línea, a diferencia de otros métodos que requieren el paro del equipo y por ende del proceso, para determinar su diagnóstico.

El objetivo general del proyecto es desarrollar un sistema de medición y monitoreo de vibraciones a un equipo rotativo de la fábrica Buencafé Liofilizado de Colombia, a través de una señal eléctrica leída y manipulada por un sistema de adquisición de datos. El interés principal está en la identificación de los picos máximos de vibración que presenten las máquinas, permitiendo diagnosticar así, la posible o posibles causas de fallas presentadas en los equipos, corregirlas de manera oportuna y en un tiempo establecido.

Los objetivos específicos son: Diseñar un sistema que permita la lectura y la toma de datos en tiempo real que indique el funcionamiento de los

elementos de un equipo rotativo de altas revoluciones, tomando un módulo de un PLC existente en el área de producción.

Realizar pruebas y toma de datos en equipos similares que incluya un mantenimiento general en el equipo piloto el cual será utilizado para implementar el sistema y que comenzará su trabajo con condiciones óptimas que permitan referenciar el punto de partida a la hora de iniciar el monitoreo.

Presentar en un panel de visualización, utilizando el software *In Touch*, las gráficas de las señales obtenidas y su historial, en donde quedan registrados aquellos eventos de funcionamiento del equipo, permitiendo al grupo técnico evaluar su funcionamiento a través del tiempo.

Realizar el análisis y el estudio de los datos obtenidos durante las mediciones efectuadas al equipo, comparando así el antes y el después, estableciendo así un precedente que facilite la tomar las decisiones ante la intervención del equipo.

La operación correcta y el mantenimiento oportuno constituyen vías decisivas para preservar el buen estado de los equipos, la vibración en una máquina depende en gran parte de sus parámetros de operación, velocidad de giro, presión de trabajo, tiempos de proceso, fundamentales al momento de dar un diagnóstico.

1. ETAPA DE PLANEAMIENTO

Este proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones en un equipo rotativo de buencafé liofilizado de Colombia (estudio de caso).

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

El café liofilizado de Colombia se produce en las instalaciones de la Federación Nacional de Cafeteros, localizadas en el municipio de Chinchiná, corazón del eje cafetero colombiano. Esta fábrica es una de las más grandes y modernas del mundo y es la única planta de liofilización existente en Colombia.(ver figura 1)

Figura 1. Planta buencafe



Fuente www.buendia.com.

Premio Colombiano a la Calidad, otorgado en la categoría de Empresa Manufacturera Grande. Es un reconocimiento del Gobierno Nacional a las empresas que se han distinguido por la excelencia en su gestión empresarial,

orientada a la calidad, la productividad y la competitividad. Es la primer Empresa de alimentos a nivel nacional en obtener dicho reconocimiento.

Buencafé nace del orgullo, empuje y las ganas del pueblo cafetero, en manos de don Arturo Gómez Jaramillo, Gerente General de la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), quien en 1973 tiene una iniciativa sin precedentes: liofilizar café colombiano, el mejor café del mundo. Se comienza entonces la construcción de la planta de café liofilizado de Colombia en Chinchiná, el corazón del eje cafetero.

Con una producción inicial de 1.800 toneladas, la fábrica de café liofilizado de Colombia empieza a exportar el producto a países como Japón, Estados Unidos, el Reino Unido y Alemania, de quienes aprende la exigente cultura de la calidad que hoy en día se convirtió en la regla de todos sus procesos.

Hoy, la fábrica de Café Liofilizado de Colombia se llama Buencafé Liofilizado de Colombia, un nombre más acorde con su filosofía y sus objetivos ya que busca que todos los que intervienen en sus procesos, desde los cafeteros hasta sus clientes en el exterior, reciban siempre lo mejor de lo mejor. Esta manera de pensar le ha dado un excelente posicionamiento, que le ha permitido ampliar su capacidad de producción a 11.500 toneladas al año de café liofilizado 100% colombiano. El café liofilizado es empacado en diferentes presentaciones como frascos (cuadrado, redondo, grano, estriado y bala), laminados (*Sachet, Pillow Bags, Stick, Doy Pack, Selfstading*), cajas con bolsas de 25 Kg, *Big Bag* (250, 300 y 500 kg), y empaque de extracto en bidones de 18 kg.

Hoy el orgullo ha dado frutos, permitiendo a la FNC asegurar que Buencafé cuenta con una de las plantas de café liofilizado más grandes y tecnificadas del mundo, llevando el mejor café a más de 60 países (Cfr. Café Buendía).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La falta de sistemas predictivos y dispositivos que permitan la disminución del tiempo medio entre fallas, que busque cero averías en los equipos rotativos de la empresa Buencafé Liofilizado de Colombia, se convierten en factores decisivos a la hora de medir, analizar y tomar acciones pertinentes frente a diferentes problemas operativos y de funcionamiento que presentan las máquinas, especialmente en la medición de vibraciones, que es parte vital en el buen funcionamiento de una máquina o equipo.

A manera de ejemplo se muestra a continuación una situación singular que describe la temática del problema:

"- siendo las 03:00 am el equipo "x" se detiene intempestivamente, se

repone eléctricamente y queda en línea a las 03:30.

- Nuevamente el equipo "x" se detiene a las 04:50 am al parecer por alto amperaje según el técnico "y" que atiende el evento, se repone nuevamente y queda en línea a las 5:30 am."

Estas líneas textuales anteriores son descripciones de los fenómenos que la persona encargada del equipo observa y escribe en una tabla dinámica en *Excel*. Estos reportes que tal vez informan el evento pero no analizan la causa del mismo, se convierten en una herramienta poco útil, ya que no proporcionan la cantidad de información suficiente para solucionar el evento, sólo se puede recurrir a estos reportes debido a que es la única opción como herramienta para dejar historial de los problemas ocurridos.

Se puede observar que si esta información la retoma un técnico para analizar la falla es insuficiente y seguramente no aportará material necesario para la solución de la misma. Por lo menos se necesita un medio que brinde información tal como: hora de ocurrencia del evento, etapa del proceso en la que la máquina se encontraba, amperajes, velocidades de operación, ***picos de vibración***, entre otras.

El sistema *SCADA In Touch* actualmente utilizado en la empresa Buencafé Liofilizado de Colombia, es un medio que tiene infinidad de herramientas que necesita ser complementada con una alimentación adecuada, como entrada de sensores que informen el estado de los equipos, gráficas que muestren el historial de una variable, pantallazos con la información necesaria y amigable para la interacción hombre-máquina, comunicación a cualquier parte de la pirámide de automatización, entre otros, y que actualmente se está desaprovechando todo el potencial que este *software* maneja.

Es aquí donde el sistema de vibraciones toma su lugar, donde un sensor de vibración envía información al sistema SCADA y este se encarga de manejar y tener disponible la información de forma oportuna para el usuario (*operador-técnico*) ante cualquier eventualidad que pueda ocurrir en un equipo rotativo.

1.2.1 Formulación del problema

No existe en la fábrica Buencafé liofilizado de Colombia un sistema de monitoreo de vibraciones que mejore las condiciones y ayudas operativas, que alerte en el momento adecuado y que proporcione información en tiempo oportuno tanto para técnicos como para operadores, con el fin de facilitar el manejo y análisis de situaciones que alteren el normal funcionamiento de la máquina y la continuidad del proceso.

1.2.2 Sistematización del Problema.

- ¿Será posible la implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones que permita conocer el estado instantáneo de un equipo rotativo?
- ¿Será posible la implementación de un sistema que realice las mediciones en línea sin necesidad de parar el equipo?
- ¿Se puede graficar una señal histórica de vibración en un monitor?
- ¿Se pueden analizar los datos de tal forma que se logre una trazabilidad de fallos a través del tiempo?
- ¿Puede un técnico de la compañía dictaminar el estado del equipo basándose en los resultados arrojados por el sistema de análisis de vibración?
- ¿Se llegaría a un estado oportuno de análisis de la información para tomar las acciones correctivas necesarias, reducir el tiempo medio entre fallas y aumentar la confiabilidad de los equipos?
- ¿Se pueden tomar acciones predictivas y preventivas que logren minimizar las averías y aumentar la vida útil de los equipos rotativos?
- Estas son algunas de las preguntas que surgen alrededor del problema y que seguramente se pueden resolver.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los altos costos de mantenimiento, los análisis incompletos de averías ocurridas y la falta de estadística son algunos de los factores de los cuales adolece la industria colombiana. Si se observa y compara detenidamente el desarrollo tecnológico industrial de países europeos, norteamericanos y asiáticos se puede notar la enorme brecha en cuanto a la aplicación de sistemas, métodos avanzados, modelos de administración total, entre otros, que van en pro del mejoramiento continuo de los procesos industriales.

Son demasiados los problemas que ocasionan paros, velocidades reducidas, desajustes, deterioro forzado y pérdida de producción de un equipo; encontrar la causa raíz se convierte en toda una odisea a la hora de analizar los pormenores del evento y ni que hablar de los costos elevados de mantenimiento. Todos estos acontecimientos resultan mucho más difíciles de evaluar si no se tienen los instrumentos adecuados de monitoreo y consulta; los historiales de operación del equipo deben ser almacenados de una forma adecuada ya que cumplen una función muy importante dentro el proceso y es mostrar de forma gráfica y comprensible la trayectoria de todas las variables de control que posee la

máquina.

Las Centrífugas Clarificadoras (tres del mismo tipo) de Buencafé Liofilizado de Colombia presentan en los últimos cinco (5) años una cantidad de eventos entre directos y aislados (no son propiamente en el equipo pero alteran su funcionamiento), que implican mantenimientos correctivos, preventivos y sanitizaciones que alcanzan un costo superior a los 250 millones de pesos en aproximadamente más de 120 intervenciones técnicas; sin mencionar el impacto en la parte de producción. Otro aspecto importante dentro de estas situaciones es la seguridad y el óptimo funcionamiento con los que se debe conservar los equipos, puesto que son máquinas que giran a más de 7000 RPM con un peso muerto de 500 Kg aproximadamente.

Si se dispusiera de un sistema de monitoreo de vibraciones que permita analizar el estado de la máquina, seguramente se reducirían en un gran porcentaje los paros intempestivos, el deterioro forzado, las velocidades de producción reducidas, los coproductos (reprocesos) por calidad y el costo de mantenimiento, ya que se lograría predecir con un margen de error admisible el momento en que la máquina puede llegar a fallar.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General.

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo de vibraciones en un equipo rotativo de la fábrica Buencafé Liofilizado de Colombia.

1.4.2 Específicos.

- Diseñar un sistema que permita la lectura y la toma de datos en tiempo real que indique el funcionamiento de los elementos de un equipo rotativo de altas revoluciones, tomando un módulo de un PLC existente en el área de producción.
- Realizar pruebas y toma de datos en equipos similares que incluya un mantenimiento general en el equipo piloto el cual será utilizado para implementar el sistema y que comenzará su trabajo con condiciones óptimas que permitan referenciar el punto de partida a la hora de iniciar el monitoreo.
- Presentar en un panel de visualización (monitor existente en un cuarto de operación) utilizando el software In Touch, las gráficas y su historial, en donde quedan registrados aquellos eventos de funcionamiento; frecuencias naturales, frecuencias de sobrecarga, entre otros.

- Realizar el análisis y el estudio de los datos obtenidos durante las mediciones efectuadas al equipo, comparando así el antes y el después, para establecer un programa de mantenimiento basado en la interpretación de los valores entregados por los instrumentos de medición.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

Actualmente, en el ámbito industrial, la introducción de las Tecnologías Predictivas ha permitido incrementar la productividad sin necesidad de aumentar el personal dedicado a la actividad del mantenimiento. Para ello, la industria exige una mayor preparación de los técnicos encargados de llevar a buen término la aplicación de estas tecnologías, por lo cual se hace evidente la necesidad de asumir la responsabilidad de la capacitación del conocimiento de estos, fundamentalmente en lo relacionado con el diagnóstico del estado técnico de la maquinaria industrial, base estratégica de las Tecnologías Predictivas.

2.2 MANTENIMIENTO

Se define como la disciplina cuya finalidad consiste en mantener las máquinas y el equipo en un adecuado estado de operación, labor que incluye servicio, pruebas, inspección, ajustes, reemplazo, reinstalación, calibración, reparación y reconstrucción. Principalmente se basa en el desarrollo de conceptos, criterios y técnicas requeridas para la mantenibilidad, proporcionando una guía de políticas o criterios para toma de decisiones en la administración y aplicación de programas de Mantenimiento.

2.3 TIPOS DE MANTENIMIENTO

2.3.1 Mantenimiento Correctivo.

Es el que se realiza sobre una máquina que ha dejado de funcionar, por falla de sus componentes, para restablecerla al servicio.

Este mantenimiento trae consigo una serie de desventajas, entre las cuales podríamos mencionar las siguientes:

- Pérdidas en producción ocasionadas por paros imprevistos.
- Altos costos de mantenimiento.

- No se cuenta con la disponibilidad del personal de Mantenimiento.
- Largos periodos de paros.
- Existencias altas de refacciones en almacén.

El proceso de mantenimiento correctivo se inicia con el fracaso y la falta de un diagnóstico para determinar los motivos de aparición del fracaso. Los costos que implican la parada de tiempo de reparación de la máquina han hecho que esta práctica sea poco rentable.

2.3.2 Mantenimiento Preventivo.

Es el que se efectúa retirando la máquina del servicio, en cumplimiento de un programa preestablecido, con el propósito de realizar los desarmes necesarios para efectuar las inspecciones y cambios en sus componentes que garanticen su normal funcionamiento durante un determinado periodo, el cual representa el margen de confiabilidad de la máquina, fijado sobre ciertos fundamentos técnicos. Podría pensarse que es el mantenimiento ideal, ya que nos permite tener un alto índice de disponibilidad de la maquinaria, pero en realidad se cuenta con ciertas desventajas tales como:

- Paro innecesario para realizar revisiones.
- Alto consumo de refacciones.
- Nivel de existencias de refacciones elevado.

En la actualidad, en Buencafé Liofilizado de Colombia se realizan este tipo de prácticas, las cuales son conocidas como tarjetas Fuguai Rojas, con las cuales se pretende llevar a cero las averías en la planta de producción.

2.3.3 Mantenimiento Predictivo.

Este tipo de mantenimiento contribuye en un principio a detectar el comienzo de una futura avería, a la vez que permite disponer de las herramientas necesarias para analizar la causa del problema que se está desarrollando, lográndose determinar finalmente, el momento oportuno para, de forma dirigida, corregir eficaz y eficientemente el problema detectado.

El mantenimiento predictivo contempla tres etapas, que son:

- a. Detección: su funcionamiento es basado en el seguimiento de la evolución de uno o varios parámetros seleccionados adecuadamente, de acuerdo a su sensibilidad ante los cambios en la condición de la máquina analizada.
- b. Identificación: una vez que el problema ha sido detectado, es momento de proceder a la determinación de la causa raíz de este, es decir, identificar

qué elemento o elementos de la máquina es o son los causantes del incremento en los niveles de vibraciones, con respecto a las referencias que reflejan una condición mecánica normal.

- c. Corrección: conocer la causa del problema y, por consiguiente, la ubicación de éste, lo cual permite organizar y ejecutar de modo eficiente y eficaz los trabajos de eliminación del problema y de su propia causa. Es sumamente importante el hecho de que la identificación de los problemas que puedan encontrarse, incluso en su etapa de desarrollo prematuro, permite planificar los trabajos de mantenimiento en el momento oportuno, logrando que las pérdidas por concepto de mantenimiento sean mínimas.

Para que todo esto sea una realidad, existe un complemento indispensable para la implementación del mantenimiento PREDICTIVO, que es la INSTRUMENTACION.

Con este tipo de mantenimiento, prácticamente todas las desventajas de los otros dos métodos se convierten en ventajas, pero existe también el problema de poder resultar muy costoso si no se aplica de forma adecuada y racional. Una de las principales objeciones para la implementación del mantenimiento PREDICTIVO, es la inversión que se tiene que realizar para la adquisición del equipo que se debe utilizar, así como de la capacitación del personal, estos y todos aquellos factores, que en determinado momento pueden ser objeciones, deben analizarse detenidamente para determinar su influencia en algo tan importante como es LA REDUCCION DE COSTOS. Para hacer más objetivas las diferencias básicas entre las tres técnicas de mantenimiento, serán extraídas de un cuadro comparativo, con sus características (Cfr. Agraz Industrial, 2013).

La implementación de un plan de mantenimiento preventivo es justificada por una gran cantidad de ventajas que se obtienen como resultado de seguir un sistema de este tipo. A continuación se mencionan algunas ventajas:

- Menor tiempo perdido como resultado de los paros de maquinaria por descomposturas.
- Mejor conservación y duración de las cosas, por no haber necesidad de romper equipo antes de tiempo.
- Menor costo por concepto de horas extraordinarias de trabajo y una utilización más económica de los trabajadores de mantenimiento.
- Menor costo por concepto de reparaciones, cuando una parte falla en servicio, por lo general otras piezas se echan a perder, aumentando más el costo de servicio.
- Mejores condiciones de seguridad.

2.4 SISTEMAS DE GESTIÓN

En la actualidad encontramos gran variedad de programas y métodos con los cuales se podría realizar una implantación de un sistema de gestión de mantenimiento aplicado a la industria, todos con un mismo denominador:

- Preservar el activo fijo productivo, alargando su vida útil, económica, reduciendo su depreciación física y prolongando el momento de su renovación.
- Evitar las paradas imprevistas, no programadas, de la producción y servicio.
- Eliminar los daños consecuenciales de las averías de las máquinas, en la máquina en sí y en su sistema, en el proceso de transformación, y en el personal que la opera.
- Eliminar los altos costos de las reparaciones ocasionadas por las averías.
- Tener los registros de inventarios, especialmente en repuestos, suministros y materiales generales, y la incidencia de la inmovilización de capital, haciendo la función logística más eficiente.
- Reducir los costos de servicios de terceros, haciendo un uso eficiente de l escaso y valioso recurso humano propio.
- Reducir los costos de energía por pérdidas en los sistemas o mal uso de las máquinas mediante Auditorias de Mantenimiento.
- Mantener la disponibilidad de los sistemas y sus máquinas en apoyo al proceso productivo.
- Lograr la eficacia, eficiencia y productividad de los servicios de mantenimiento.

Para que el concepto de gestión de mantenimiento se cumpla, las Oficinas de Ingeniería de Mantenimiento deben intervenir en los procesos de compra de equipo, almacenamiento, reciclaje y en los procesos para determinar la baja de equipos y elementos que ya han cumplido sus ciclos de vida.

2.4.1 TPM.

La globalización y la evolución tecnológica en el mundo traen consigo la necesidad de cambios y mejoras en los diferentes modelos de gestión que emplean las

organizaciones. Es el mundo oriental quien presenta uno de los modelos preferidos por compañías multinacionales y grandes organizaciones como lo es TPM. La empresa Nippodenso Co. perteneciente al grupo Toyota junto al Instituto Japonés de Ingenieros de Planta (JIPE) desarrollan TPM de planta, y luego una serie de complementos y necesidades hacen que TPM adquiera nuevos módulos y, con ello, el aumento de sus pilares de fundamentación.

De esta manera, TPM opera desde la base de los pilares con un enfoque de gestión de sentido común, donde la participación es total desde los altos ejecutivos hasta los operadores de primera línea, así como todos sus departamentos, desde producción hasta desarrollo, ventas y administración. Tiene como objetivos la maximización de la eficiencia de su sistema de producción, la ampliación del ciclo de vida de todo equipo y elaboración de un sistema basado en el área de producción, para prevenir todas las pérdidas: “cero accidentes, cero averías, cero defectos, cero desperdicios” con la participación de grupos de trabajo que desarrollan una serie de actividades para lograr dichos objetivos.

Empresas demuestran que con la implementación de TPM los indicadores de gestión son cada vez mejores debido a que:

Productividad (P):	Incrementos significativos hasta del 35% Reducción del tiempo perdido hasta del 65%
Calidad (Q):	Reducción de defectos en un 90% Reducción de reclamos en un 75%
Costos (C):	Reducción de costos de producción 30% Reducción de costos de mantenimiento 60%
Entregas (D):	Incremento hasta del 35% Reducción de inventarios 50%
Seguridad (S):	Cero accidentes Cero enfermedades profesionales
Motivación (M):	Incremento de sugerencias de 5 a 10 veces más Participación total

2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El mantenimiento predictivo bajo monitoreo de condiciones en este caso, análisis de la vibración, de la mano con un modelo de gestión podría cumplir con los objetivos propuestos por este; de esta forma las técnicas predictivas nos permitirían:

- Programar la parada del equipo para reparaciones en un momento oportuno.
- Planificar los trabajos de mantenimiento con los requerimientos que esta actividad conlleva como lo son, personal, herramientas, repuestos y lo más importante: tiempos de la parada.
- Reducir al mínimo los daños de consideración a la máquina como resultado de los esfuerzos tras una falla (avería).
- Bajar los tiempos de reparaciones de la máquina incrementando así su tiempo de producción.
- Ahorrar considerablemente en los costos de mantenimiento debido a la reducción del tiempo de parada y el conocimiento de los repuestos, herramientas y personal a utilizarse en la reparación.

De igual forma se mencionan las desventajas que conlleva la aplicación de esta técnica predictiva, las cuales son asumidas por la empresa.

- Este tipo de técnica requiere de un mínimo de personal calificado, los cuales serán los encargados de adquirir, analizar, procesar y tomar las decisiones; por lo que se podría requerir de una inversión inicial considerable para la formación del personal.
- La necesidad de adquisición de los equipos que toman y procesan las medidas vibracionales en la maquinaria los cuales tienen un costo elevado.

2.6 VIBRACIONES MECÁNICAS

Se denominan vibraciones a los movimientos oscilatorios que tienen las partículas de un cuerpo elástico alrededor de su posición natural de equilibrio (variación periódica de la magnitud). Cada partícula que vibra transmite su energía cinética a las partículas próximas, produciendo fuerzas elásticas que originan el movimiento oscilatorio (variación de la frecuencia). El cuerpo humano puede

detectar vibraciones con velocidades eficaces de 10~ m/s. (umbral de percepción) hasta 1 m/s (umbral de dolor).

- Vibración Mecánica: es la oscilación mecánica de un cuerpo y/o sistema.
- Oscilación: es el movimiento de vaivén de un parámetro físico alrededor de una frecuencia.

En la definición de vibración mecánica se habla de cuerpo y/o sistema ya que si un cuerpo no tiene la capacidad de vibrar se puede unir a otro y formar un sistema vibratorio; por ejemplo, en un sistema masa-resorte la masa posee características energéticas cinéticas y el resorte características restauradoras.

Es necesario aclarar que para que un sistema vibre es necesario que posea por lo menos un elemento inercial (energía cinética) y un restaurador (enérgico potencial). Aunque en algunos casos los elementos restauradores se generalizan como elementos elásticos, existen sistemas en las que no existe un elemento elástico y sin embargo pueden vibrar, por ejemplo el péndulo que se manifiesta como elemento restaurador.

Ahora bien, cuando un cuerpo vibra resulta importante definir la causa de la vibración, es decir, si el cuerpo vibra por su condición natural debido a una perturbación instantánea y ajeno a toda excitación permanente, o bien si se debe a que existen fuerzas perturbadoras que hacen vibrar el sistema.

De aquí la importancia de considerar los tipos de perturbaciones que hacen vibrar a un sistema. Estas perturbaciones conocidas como excitaciones pueden clasificarse como:

- a) Instantánea y b) Permanente.

Una perturbación del tipo instantánea es aquella que aparece como una perturbación y desaparece inmediatamente, ejemplos de ello:

- El golpeteo de una placa
- El rasgueo de las cuerdas de una guitarra
- El impulso y deformación inicial de un sistema masa-resorte
- El impulso generado por un impacto

Una excitación de este tipo además puede aparecer a manera de impulso o a manera de desplazamiento inicial; por ejemplo, una persona en un columpio puede iniciar el movimiento si es impulsado desde su posición de equilibrio o bien si es desplazado desde su posición de equilibrio.

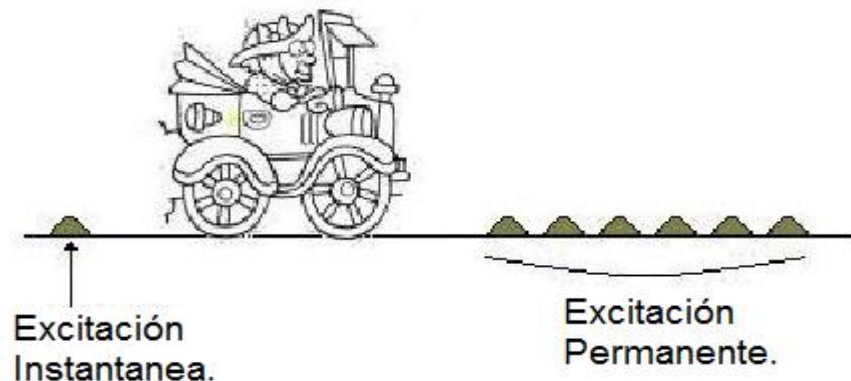
Una excitación del tipo permanente siempre está presente en el movimiento del cuerpo. Ejemplos:

- El caminar de una persona sobre un puente peatonal.
- Un rotor desbalanceado cuyo efecto es vibración por desbalance.

- El motor de un automóvil.
- Un tramo de retenedores es una excitación constante para el sistema vibratorio de un automóvil, entre otros.

La figura 2 muestra un panorama práctico de estos dos tipos de excitación en donde un carro pasa primero por un borde y vibra en su forma natural producto de esta **excitación instantánea**, posteriormente pasa por un conjunto de bordes que lo obligan a vibrar siendo una **excitación permanente**.

Figura 2. excitaciones mecánicas



Fuente: www.vibraciones.net23.net.

La vibración es una oscilación perceptible y medible en la superficie de la máquina, elementos y/o cimientos.

Las vibraciones mecánicas solo pueden ocurrir cuando las masas se mueven. Estas masas pueden ser partes rotativas u oscilantes.

Las vibraciones generadas en las máquinas son principalmente rotativas y reciprocantes. Esas vibraciones y esfuerzos son transmitidos por los rodamientos y/o cojinetes antifricción, a la carcasa, y de allí a sus bases y cimientos.

La vibración es una energía producida por medio de un defecto mecánico en una máquina, es un síntoma **NO** una causa.

Las vibraciones mecánicas pueden ser medidas tomando diferentes patrones y criterios que en su mayoría están establecidos, estas medidas tienen que ver con el movimiento por lo tanto conviene analizar algunos criterios relacionados con el movimiento de oscilación (Cfr. Barajas P. O. M., 2013)

2.6.1 Consecuencias de las Vibraciones.

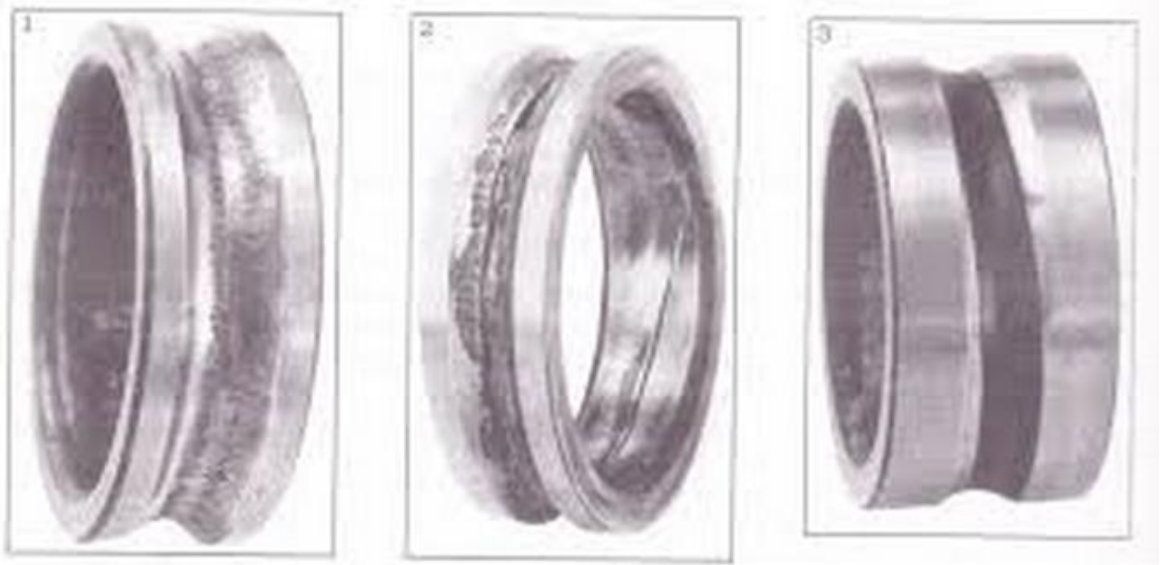
La mayor parte de las vibraciones en máquinas y estructuras son indeseables

porque aumentan los esfuerzos y las tensiones, disminuyendo el rendimiento del equipo y aumentando los niveles de energía eléctrica para lograr seguir en funcionamiento. Además son fuente de desgaste de materiales, de daños por fatiga, de movimientos y ruidos molestos.

Aunque todo sistema mecánico tiene características elásticas, de amortiguamiento y de oposición al movimiento, estas, solo se cumplen en condiciones normales de operación, conservando sus parámetros de diseño.

En la mayoría de los casos, la vibración afecta directamente los rodamientos, que son los elementos encargados de recibir la carga dinámica de la máquina, reflejo de esto queda evidenciado en pistas y elementos rodantes (Ver figura 3).

Figura 3. Vibraciones en rodamientos



Fuente www.google.com.co/search?q=daños+en+rodamientos

2.6.2 Tipos de vibraciones mecánicas.

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una máquina es determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración, reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas, y la corrección del problema que ellas representan.

Para una buena interpretación de los datos que se puedan obtener, es necesario conocer las diferentes causas de vibración y sus consecuencias, entre las más importantes están:

2.6.2.1 Vibración por desbalance.

El desbalance de la maquinaria es una de las causas más comunes de la vibración. Se puede originar por razones como: falta de material (socavaciones por oxido), o simplemente suciedad (material adherido a las piezas en movimiento). En muchos casos, los datos arrojados por un estado de desbalance indican:

1. La frecuencia de vibración se manifiesta a 1x las rpm de la pieza desbalanceada.
2. La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.
3. La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial, horizontal o vertical (en las máquinas con ejes horizontales).
4. El análisis de fase indica lecturas de fase estables.
5. La fase se desplazará 90° si se desplaza el captador 90°.

Importante: el desbalance de un rotor saliente a menudo tiene como resultado una gran amplitud de la vibración en sentido axial, al mismo tiempo que en sentido radial (Ver figura 4).

Figura 4. Suciedad en clarificadora



Fuente: Propia.

2.6.2.2 Vibración por falta de alineamiento.

La gran mayoría de los equipos que se emplean en la industria, se conforman de una parte eléctrica encargada de generar el movimiento y una parte mecánica encargada de realizar una labor específica, el acoplamiento entre estas partes debe ser perfecto no solo para evitar la vibración sino también el exceso de consumo de energía por parte del motor.

Para ello se deben tener en cuenta los planos (X, Y, Z), buscando el paralelismo entre ambos acoples.

En la mayoría de los casos los datos derivados de una condición de falta de alineamiento indican lo siguiente:

1. La frecuencia de vibración es de 1x rpm; también 2x y 3x rpm en los casos de una grave falta de alineamiento.
2. La amplitud de la vibración es proporcional a la falta de alineamiento.
3. La amplitud de la vibración puede ser alta también en sentido axial, además de radial.
4. El análisis de fase muestra lecturas de fase inestables.

Para tener en cuenta: La falta de alineamiento, aun con acoplamientos flexibles, produce fuerzas tanto radiales como axiales que, a su vez, producen vibraciones radiales y axiales.

Nota: Uno de los indicios más importantes de problemas debidos a falta de alineamiento y a ejes torcidos es la presencia de una elevada vibración en ambos sentidos, radial y axial. En general, cada vez que la amplitud de la vibración axial sea mayor que la mitad de la lectura radial más alta, hay un buen motivo de sospechar la existencia de un problema de alineamiento o eje torcido.

Una falta de alineamiento angular conllevan a los ejes de las máquinas conductora y conducida a vibración axial igual a la velocidad de rotación (rpm) del eje.

La falta de alineamiento en paralelo produce principalmente vibración radial con una frecuencia igual al doble de la velocidad de rotación del eje.

2.6.2.3 Vibración por Excentricidad.

La excentricidad es otra de las causas comunes de vibración en la maquinaria rotativa. Excentricidad en este caso no significa "ovalización", sino que la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor, el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica.

La excentricidad es en realidad una fuente común de desbalances, y se debe a un mayor peso de un lado del centro de rotación que del otro.

Una manera de diferenciar entre desbalance y excentricidad en este tipo de motor es medir la vibración con filtro afuera mientras el motor está funcionando bajo corriente. Luego, se desconecta el motor, observando el cambio de la amplitud de vibración. Si la amplitud se reduce gradualmente mientras el motor sigue girando por inercia, es muy probable que el problema sea debido a desbalance. Si, en cambio, la amplitud de vibración desaparece en el momento mismo en que el motor es desconectado, el problema es seguramente de naturaleza eléctrica, y es muy posible que se deba a excentricidad del inducido.

La excentricidad en rodetes o rotores de ventiladores, sopladores, bombas y compresores puede también crear fuerzas vibratorias. En esos casos las fuerzas son el resultado de fuerzas aerodinámicas e hidráulicas desiguales que actúan contra el rotor.

2.6.2.4 Vibración a causa de rodamientos y Chumaceras defectuosas.

Elevados niveles de vibración, ocasionados por rodamientos de chumacera defectuosos, son generalmente el resultado de una holgura excesiva (causada por

desgaste debido a una acción de barrido o por erosión química), aflojamientos mecánicos (metal blanco suelto en el alojamiento), o problemas de lubricación.

- a. Un rodamiento de chumacera con holgura excesiva hace que un defecto de relativamente menor importancia, tal como un leve desbalance o una pequeña falta de alineamiento, u otra fuente de fuerzas vibratorias, se transformen como resultado de aflojamientos mecánicos o en golpes repetidos (machacado).

En tales casos el rodamiento en si no es lo que crea la vibración; pero la amplitud de la misma seria mucho menor si la holgura de los rodamientos fuera correcta.

A menudo se puede detectar un rodamiento de chumacera desgastado por "barrido" efectuando una comparación de las amplitudes de vibración horizontal y vertical. Las máquinas que están montadas firmemente sobre una estructura o cimentación rígida revelaran, en condiciones normales, una amplitud de vibración ligeramente más alta en sentido horizontal.

- b. Holgura excesiva de los rodamientos.
- c. Torbellino de aceite

Este tipo de vibración ocurre solamente en máquinas equipadas con rodamientos de chumacera lubricados a presión, y que funcionan a velocidades relativamente altas (normalmente por encima de la segunda velocidad critica del motor).

La vibración debida a torbellinos de aceite a menudo es muy pronunciada, pero se reconoce fácilmente por su frecuencia fuera de lo común. Dicha frecuencia es apenas menor de la mitad de la velocidad de rotación (en rpm) del eje generalmente en el orden del 46 al 48% de las rpm del eje.

El problema de los torbellinos de aceite normalmente se atribuye a diseño incorrecto del rodamiento, desgaste excesivo del rodamiento, un aumento de la presión del lubricante o un cambio de la viscosidad del aceite.

Se pueden hacer correcciones temporales modificando la temperatura del aceite (viscosidad), introduciendo un leve desbalance o una falta de alineamiento de manera de aumentar la carga sobre el eje, o rascando y/o ranurando los costados del rodamiento, para desbaratar la "cuña" de lubricante.

Desde luego, una solución más duradera es reemplazar el rodamiento con uno que haya sido diseñado correctamente de acuerdo a las condiciones operativas de la máquina, o con uno que esté diseñado para reducir la posibilidad de formación de torbellinos de aceite.

Los rodamientos con ranuras axiales usan las ranuras para aumentar la resistencia a la formación de torbellinos de aceite en tres puntos espaciados uniformemente. Este tipo de configuración está limitado a las aplicaciones más

pequeñas, tales como turbinas de gas livianas y turbocargadores.

Los rodamientos de chumacera de lóbulos brindan estabilidad contra los torbellinos de aceite al proporcionar tres puntos de concentración de la película de aceite bajo presión, que sirven para centrar al eje.

Los rodamientos de riñón basculante son comúnmente utilizados para las máquinas industriales más grandes, que funcionan a velocidades más altas.

Hay dos causas comunes de vibración que pueden inducir un torbellino de aceite en un rodamiento de chumacera:

1. **Vibración proveniente de maquinaria ubicada en las cercanías:** Puede ser transmitida al rodamiento de chumacera a través de estructuras rígidas, tales como tuberías y cimentaciones. A este fenómeno se le conoce como Torbellino Inducido por el Exterior.
2. **Vibración ocasionada por otros elementos de la máquina misma:** Toda vez que se detecta la vibración característica del torbellino de aceite se deberá realizar una completa investigación de las vibraciones en toda la instalación, incluyendo las fuentes de vibración circunvecina, la estructuras de cimentación y las tuberías relacionadas. Se podrá así quizás descubrir una causa externa de los problemas de torbellino de aceite.

2.6.2.5 Elementos Rodantes Defectuosos.

Defectos en las pistas, en las bolas o en los rodillos de rodamientos de elementos rodantes ocasionan vibración de alta frecuencia; y, lo que es más, la frecuencia no es necesariamente un múltiplo integral de la velocidad de rotación del eje. La amplitud de la vibración dependerá de la gravedad de la falla del rodamiento.

Nota: la vibración generada por el rodamiento normalmente no es transmitida a otros puntos de la máquina. Por lo tanto, el rodamiento defectuoso es generalmente el que se encuentra más cerca del punto donde ocurre el mayor nivel de vibración de este tipo.

Falla de Rodamientos – Otras causas

Los rodamientos no fallan prematuramente a menos que alguna otra fuerza actúe sobre ellos; y tales fuerzas son generalmente las mismas que ocasionan vibración.

Causas comunes de fallas en los rodamientos

- Carga excesiva
- Falta de alineamiento
- Defectos de asientos del eje y/o de las perforaciones en el alojamiento
- Montaje defectuoso
- Ajuste incorrecto
- Lubricación inadecuada o incorrecta

- Sellado deficiente
- Falsa brinelación (deformación bajo carga)
- Corriente eléctrica

2.6.2.6 Vibración por lubricación inadecuada.

Una inadecuada lubricación, incluyendo la falta de lubricación y el uso de lubricantes incorrectos, puede ocasionar problemas de vibración en un rodamiento de chumacera. En otros casos la lubricación inadecuada causa excesiva fricción entre el rodamiento estacionario y el eje rotante, y dicha fricción induce vibración en el rodamiento y en las demás piezas relacionadas. Este tipo de vibración se llama "*dry whip*", o **látigo seco**, y es muy parecido al pasar de un dedo mojado sobre un cristal seco.

La frecuencia de la vibración debida al látigo seco generalmente es muy alta y produce el sonido chillón característico de los rodamientos que están funcionando en seco. No es muy probable que dicha frecuencia sea algún múltiplo integral de las rpm del eje, de manera que no es de esperarse ningún patrón significativo bajo la luz estroboscópica. En este respecto, la vibración ocasionada por el látigo seco es similar a la vibración creada por un rodamiento antifricción en mal estado.

Toda vez que se sospeche que un látigo seco sea la causa de la vibración se deberá inspeccionar el lubricante, el sistema de lubricación y la holgura del rodamiento.

2.6.2.7 Vibración por Aflojamiento Mecánico.

El aflojamiento mecánico y la acción de golpeo (machacado) resultante producen vibración a una frecuencia que a menudo es 2x, y también múltiplos más elevados, de las rpm. La vibración puede ser resultado de pernos de montaje sueltos, de holgura excesiva en los rodamientos, o de fisuras en la estructura o en el pedestal de soporte.

La vibración característica de un aflojamiento mecánico es generada por alguna otra fuerza de excitación, como un desbalance o una falta de alineamiento. Sin embargo, el aflojamiento mecánico empeora la situación, transformando cantidades relativamente pequeñas de desbalance o falta de alineamiento en amplitudes de vibración excesivamente altas. Corresponde por lo tanto decir que el aflojamiento mecánico permite que se den mayores vibraciones de las que ocurrirían de por sí, derivadas de otros problemas.

Nota: Un aflojamiento mecánico excesivo es muy probable que sea la causa primaria de los problemas cuando la amplitud de la vibración 2x las rpm es más de la mitad de la amplitud a la velocidad de rotación, 1x las rpm.

2.6.2.8 Vibración por Bandas de Accionamiento.

Las bandas de accionamiento del tipo en "V" gozan de mucha popularidad para la

transmisión del movimiento puesto que tiene una alta capacidad de absorción de golpes, choques y vibraciones.

Los problemas de vibración asociados con las bandas en "V" son clasificados generalmente por:

- Reacción de la banda a otras fuerzas, originadas por el equipo presente, que causan alteraciones.
- Vibraciones creadas por problemas de la banda en sí.

Las bandas en "V" son consideradas a menudo como fuente de vibración porque es tan fácil ver las bandas que saltan y se sacuden entre poleas. Por lo general, el reemplazo de las bandas es a menudo una de las primeras tentativas de corrección de los problemas de vibración.

Sin embargo es muy posible que la banda esté sencillamente reaccionando a otras fuerzas presentes en la máquina. En tales casos la banda es solamente un indicador de que hay problemas de vibración y no representan la causa misma.

La frecuencia de vibración de las bandas es el factor clave en la determinación de la naturaleza del problema. Si la banda está sencillamente reaccionando a otra fuerza de alteración, tales como desbalance o excentricidad en las poleas, la frecuencia de vibración de la banda será muy probablemente igual a la frecuencia alterante. Esto significa que la pieza de la máquina que realmente está causando el problema aparecerá estacionaria bajo la luz estroboscópica del analizador.

Nota: Si es defecto de la banda la frecuencia de vibración será un múltiplo integral 1, 2, 3 ó 4 de las rpm de la banda. El múltiplo verificado dependerá de la naturaleza del problema y de la cantidad de poleas, sea de accionamiento como locas, presentes en el sistema.

Es fácil determinar las rpm de una banda de la siguiente manera:

Rpm de la banda = (3.14 x diám. de la polea x rpm de la polea) / longitud de la banda. (Véase Ecuación 1)

2.6.2.9 Vibración por Problemas de Engranaje.

La vibración que resulta de problemas de engranaje es de fácil identificación porque normalmente ocurre a una frecuencia igual a la frecuencia de engrane de los engranajes, es decir, la cantidad de dientes del engranaje multiplicada por las rpm del engranaje que falla.

Problemas comunes de los engranajes, que tienen como resultado vibración a la frecuencia de engrane, comprenden el desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallas de lubricación y materias extrañas atrapadas entre los dientes.

No todos los problemas de engranajes generan frecuencias de vibración iguales a las frecuencias de engrane. Si un engranaje tiene un solo diente roto o deformado, por ejemplo, el resultado puede ser una frecuencia de vibración de 1x las rpm. Mirando la forma de onda de esa vibración en un osciloscopio conectado con un analizador, la presencia de señales de impulso permitirá distinguir entre este problema y las demás averías que también generan frecuencias de vibración de 1x las rpm. Desde luego, si hay más de un diente deformado, la frecuencia de vibración es multiplicada por una cantidad correspondiente.

La amplitud y frecuencia de vibración debida a los engranajes pueden también parecer erráticas a veces. Dicho tipo de vibración errática ocurre normalmente cuando un conjunto de engranajes está funcionando en condiciones de carga muy liviana. En tales condiciones la carga puede desplazarse repetidamente de un engranaje a otro de modo irregular.

Nota: Los problemas de rodamientos son predominantes en el punto de falla de los mismos, mientras que los problemas de engranajes pueden ser detectados en dos o más puntos de la máquina. (Cfr. Ramón F. & Mateo G., 2004)

2.7 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN

La medición y análisis de vibraciones es utilizado, en conjunto con otras técnicas de mantenimiento, en todo tipo de industrias como técnicas de diagnóstico de fallas y evaluación de la integridad de estructuras y máquinas.

La evaluación de equipos rotatorios, presenta una gran ventaja respecto a otras técnicas de inspección como lo son; las tintas penetrantes, el ultrasonido, radiografías, entre otros. Esto se debe a que la evaluación es realizada en línea; es decir con la máquina en movimiento, evitando con esto la pérdida de producción que genera una detención.

2.7.1 Parámetros de medición y análisis de vibración.

Es posible examinar la señal de vibración en términos de *Aceleración*, *Velocidad* y *Desplazamiento*.

- **Desplazamiento (amplitud):** es la distancia entre la posición de la partícula que vibra y su posición de reposo. Generalmente nos referimos a la amplitud máxima. Unidad: m
- **Velocidad:** la velocidad es la que anima a la partícula. Equivale a la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo. Unidad: m/seg

- **Aceleración:** Es la variación de la velocidad por unidad de tiempo y equivale a la segunda derivada del desplazamiento con respecto al tiempo. Unidad: m/seg²

El **desplazamiento** de vibración pone un fuerte énfasis en las frecuencias más bajas, y que la **aceleración** pone un fuerte énfasis en las frecuencias más altas. Cuando se estudia el espectro de vibraciones de una máquina, es deseable enseñar el parámetro que mantenga un nivel más uniforme en todo el rango de frecuencias. Eso aumentara el máximo el rango dinámico de la señal medida. Para la mayoría de máquinas rotativas, de tamaño medio, se verá que es la **velocidad** de vibración que produce el espectro más uniforme por esta razón, es la que se escoge como parámetro de *default* del monitoreo de máquina.

El tema de aceleración, velocidad y desplazamiento es muy importante a la hora de elegir el sensor. Se ha visto que medir el desplazamiento es lo mejor para máquinas lentas y aceleración para máquinas rápidas.

Todo esto es posible si se elige el sensor correcto, para la selección de sensor adecuado se debe considerar:

- Valor de la amplitud
- Temperatura de la superficie
- Rango de las frecuencias

El transductor o sensor es el primer eslabón en la cadena de medición y debería reproducir exactamente las características de la magnitud que se desea medir. Un transductor es un dispositivo electrónico que sensa una magnitud física y la convierte en una señal eléctrica (voltaje o miliamperaje) según el tipo, proporcional a la magnitud medida.

2.7.2 Tipos de sensores o transductores empleados en la medición de vibraciones.

a. Sensores de desplazamiento

Conocido también como transductor de “corriente Eddy” o proxímetro, se aplica normalmente para bajas frecuencias (por debajo de 1.000 Hz). Los proxímetros se emplean para medir el desplazamiento radial o axial de ejes. Se instalan en las cubiertas de rodamientos o a su lado y detectan el desplazamiento del eje en la relación a su posición de anclaje. Un sistema de captación de proximidad de tipo Eddy se compone del propio sensor y un acondicionador de señal. Su respuesta en frecuencia es excelente, no tienen un límite inferior de frecuencia, por lo que pueden medir vibración y posición.

Cuando se trata de sensores de desplazamiento se debe tener en cuenta que

existen dos tipos, desplazamiento de contacto y desplazamiento sin contacto.

Ventajas

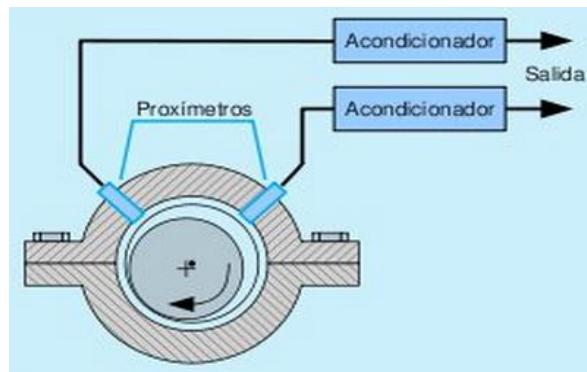
- Mide el movimiento relativo entre su punta y el eje de giro.
- Mide tanto la componente continua como la alterna de una señal vibratoria.

La tensión continua permite localizar físicamente el eje en el cojinete objeto de estudio. La tensión alterna suministra información de la forma de onda y del espectro de vibración, lo que permite diagnosticar y observar la evolución de defectos mecánicos.

Desventajas

- El rango de frecuencias está limitado en cierto modo respecto a otros modernos transductores típicamente lineales entre 0-1.000 Hz
- Se requiere un acondicionador de señal
- Se ven afectados por errores de lectura eléctricos y mecánicos. Incluso pequeñas grietas en el eje pueden hacer que el transductor las interprete como una gran actividad de vibración (Ver figura 5).

Figura 5. Sensor de movimiento o desplazamiento



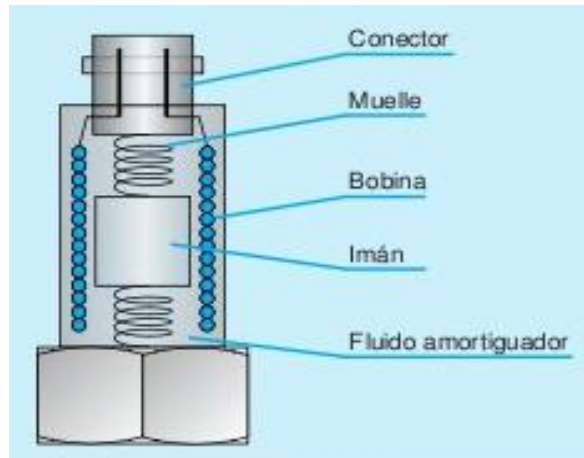
Fuente: www.sinaes.es/sensores/transductores_desplazamiento.html.

b. Sensor de velocidad o velocímetro:

Aplicados en máquinas donde el eje transmite la vibración a la carcasa con poca amortiguación, es decir, las amplitudes de vibración en la carcasa son grandes. Se compone de un imán permanente ubicado en el centro de una bobina de hilo de cobre. Cuando la carcasa vibra, se crea un movimiento relativo entre el imán y

el bobinado, induciéndose por la ley de Faraday una tensión proporcional a la velocidad del movimiento (Ver figura 6).

Figura 6. Sensor de velocidad



www.sinaes.es/sensores/transductores_desplazamiento.html.

Ventajas

- Mide directamente la velocidad, que es proporcional a la de la vibración.
- No se necesita fuente externa de alimentación, lo que permite enviar señal eléctrica a lo largo de grandes distancias por cable, haciéndolo ideal para aplicaciones donde el centro de control este lejos.

Desventajas

- Las dimensiones del transductor son relativamente grandes, necesitando grandes bases magnéticas para su sujeción. En consecuencia, el rango de frecuencias es, en cierto modo, restrictivo: 10-1.000 Hz.
- La orientación de la medida, vertical u horizontal del transductor puede alterar la señal de salida en un orden de 5-10%
- La salida del transductor depende de la temperatura. A mayor temperatura la salida del sensor se reduce al debilitarse el campo magnético.

c. Sensor de aceleración o acelerómetro

Los acelerómetros son los sensores más utilizados en el análisis de vibraciones en maquinaria. Todos los colectores portables están provistos de un acelerómetro, aunque la mayoría de la gente integra la señal y trabaja en unidades de velocidad.

Existen diferentes tipos de acelerómetros, el más común es el piezoeléctrico con un amplificador interno. Estos acelerómetros se instalan externamente, generalmente sobre el alojamiento de los apoyos o de la parte de la máquina a monitorear.

Este tipo de transductor genera una tensión eléctrica proporcional a la aceleración por presión sobre un cristal piezoeléctrico. Estos acelerómetros pueden captar con precisión señales entre 1 Hz y 15.000 Hz. Estos dispositivos son muy apropiados para tomar datos de vibración a alta frecuencia.

Algunos transductores especiales pueden medir frecuencias mucho más bajas y también mucho más altas. La recolección de datos de vibración a altas frecuencias depende del medio de fijación del transductor a la máquina.

Ventajas

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

Desventajas

- Cuando se usa en modo “hand-held” o “stinger” para medir altas frecuencias, la respuesta de señal es muy pobre por encima de 1.200 Hz.
- La salida de amplitud viene dada en unidades de aceleración. Esta salida debe ser integrada para obtener la representación espectral o el valor global de amplitud de velocidad. (Ver figura7).

Figura 7. Sensor de aceleración



Fuente: www.sinaes.es/sensores/transductores_desplazamiento.html.

2.7.3 Unidades para la medición de vibraciones.

Para medir una vibración es necesario conocer las variables que se emplean: Frecuencia y Amplitud ambas en función del tiempo.

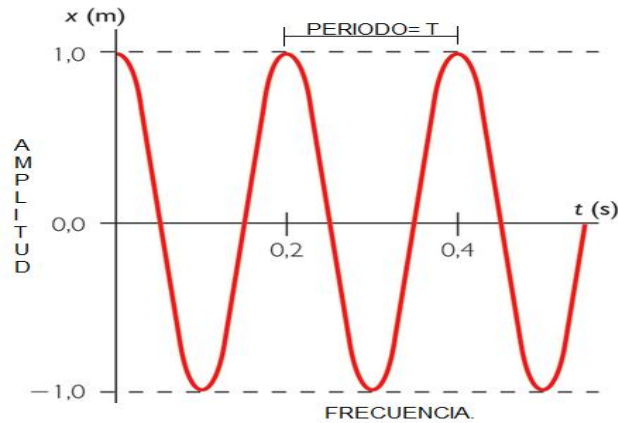
Frecuencia: Todo movimiento periódico o armónico cumple con las características de una función periódica, es decir que existe una constante T llamada periodo tal que la posición en un instante de tiempo $x(t)$ es la misma en $x(t + nT)$ para $n = 1, 2, 3, 4, \dots$. Por lo tanto se puede definir al periodo como el valor del tiempo en la cual se efectúa un ciclo completo. El inverso del periodo se le conoce como la frecuencia de oscilación y representa de una manera las veces que se repite el movimiento en un determinado tiempo.

Amplitud: Es una señal armónica, el valor máximo se le conoce como amplitud y si se mide desde la referencia se le llama amplitud de pico pero si se mide desde extremo a extremo entonces se le conoce como amplitud de pico a pico. Dentro del ambiente laboral, estos parámetros son utilizados para la medición del movimiento de la vibración de una máquina y que son:

- a) El desplazamiento de la vibración
- b) La velocidad de la vibración
- c) La aceleración de la vibración

- d) La fase.
(Ver figura 8 para relación entre frecuencia y amplitud)

Figura 8. Frecuencia y amplitud en función del tiempo



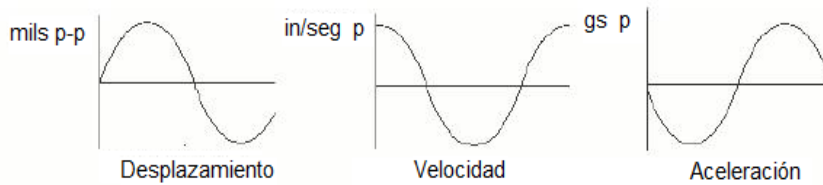
Fuente: <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/parametrosdemedicindevibracin.htm>.

El desplazamiento de la vibración generalmente se mide de pico - pico y usualmente se usan las unidades de milésimas de pulgada (mils) que es 0.001 in ó micrómetro que es 0.001 m.

La velocidad de vibración generalmente se mide de pico y usualmente se usan las unidades de pulgada por segundo (in/seg) ó milímetros por segundo (mm/seg) Mientras que en la aceleración de vibración generalmente se mide de pico a pico y usualmente se usa como unidad el gs, donde g es la aceleración de la gravedad 980.665 cm/s^2 . La fase se refiere a la medida relativa entre dos puntos de medición, generalmente se usa el ángulo de separación entre las señales que representan el movimiento de estos puntos.

Estos parámetros se pueden visualizar fácilmente en la figura 9, se puede observar como los parámetros de desplazamiento y velocidad en fase a 90° mientras que entre la velocidad y la aceleración están en fase también a 90° con la velocidad y a 180° con el desplazamiento.

Figura 9. Unidades de medición de las vibraciones

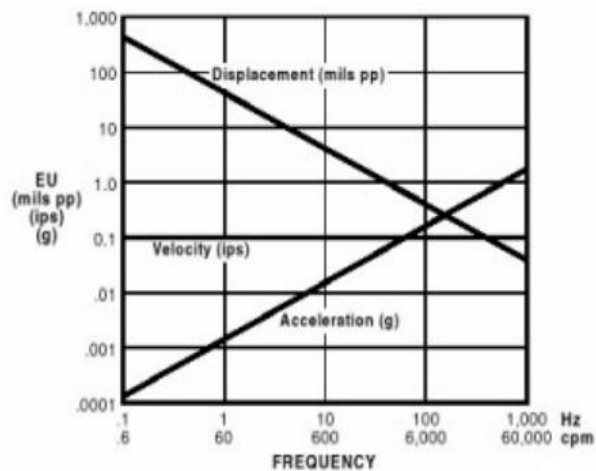


Fuente: <http://vibraciones.net23.net>

Si se mide aceleración, se podrá integrar y ver los datos en unidades de velocidad. Cuando se integra de aceleración a velocidad, el proceso tiene en cuenta el desfase. La información a alta frecuencia es disminuida y la información a más alta frecuencia es ampliada. De hecho la información de baja frecuencia, se ve tan ampliada que es necesario emplear un filtro electrónico. (pasa-altos, del recolector de datos), fijado generalmente entre 0,2 y 50 Hz, o bien en el software.

Qué mejor que un gráfico para relacionar el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Se tendrá como ejemplo un nivel de vibración fijo de 2,54 mm/s. el plano se encuentra en escala logarítmica, en eje "x" indica la frecuencia y el eje "y" indica el nivel de vibración (Véase la figura 10).

Figura 10. Interrelación de unidades de medición de vibraciones

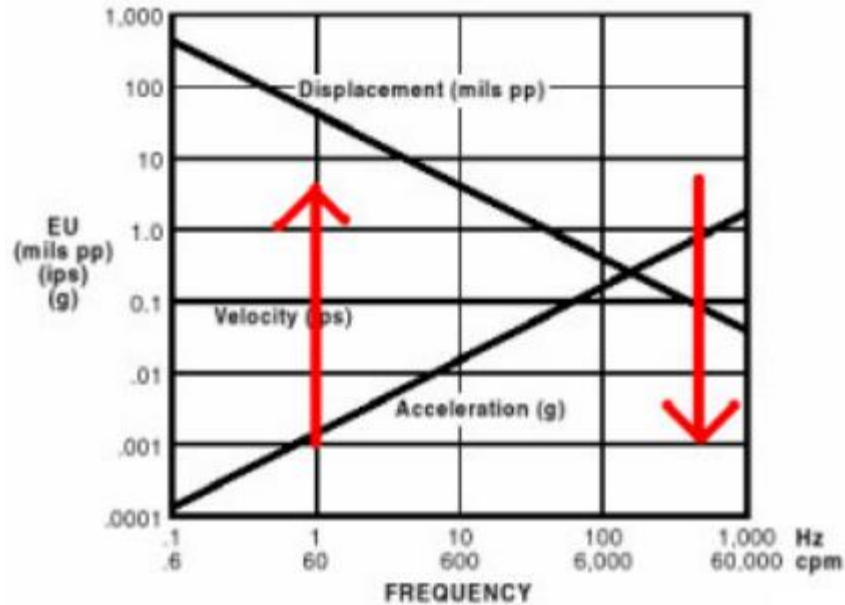


Fuente: www.tav.net/transductores/medida-vibraciones-sensores.pdf.

Todos los sensores tienen límites físicos y electrónicos, por esta razón deben ser montados correctamente y deberán ser confrontados con los cálculos determinados; esto se reflejara en las medidas cuando son integradas de aceleración a velocidad, o de velocidad a desplazamiento. La información de baja frecuencia se debe amplificar, mientras que la de alta frecuencia se reduce (Véase

figura 11).

Figura 11. Interpretación de unidades de medición de vibraciones



Fuente www.tav.net/transductores/medida-vibraciones-sensores.pdf.

Se pueden realizar los cálculos utilizando las siguientes formulas:

$$\text{Velocidad} = 2 \cdot \pi \cdot F \cdot D = \pi \cdot F \cdot A / 2 \quad (2)$$

$$\text{Aceleración} = 2 \cdot \pi \cdot F \cdot V = (2 \cdot \pi \cdot F) \cdot 2 \cdot D \quad (3)$$

donde= D=Desplazamiento, valor pico (mm)
 F= Frecuencia (Hz ó CPS)
 V= Velocidad (mm/seg)
 A= Aceleración (mm/seg²)

Todos los valores son valores pico, multiplicar por 0,707 para obtener valores RMS, ó por 2 para valores pico a pico. (Cfr. Analista de vibración – Nivel I, 2013).

2.8 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN LOCAL EN LÍNEA

Dentro de los diversos procesos de manufactura con los cuenta la industria, encontramos maquinaria especializada, compleja e importante, en donde una falla imprevista, en uno de estos equipos representaría grandes pérdidas, para el equipo y para la producción.

Son muchas las técnicas empleadas en el mantenimiento predictivo entre ellas el

análisis de vibraciones. Cuando se habla de análisis, se habla de monitoreo y dependiendo de la criticidad del equipo esta debe ser periódica o constante, es decir, realizar mediciones en un tiempo establecido (según la producción o según plan de mantenimiento) o realizar una medición constante las 24 horas del día.

Primero se debe definir el propósito fundamental para el cual se habrá de implementar un programa de medición de vibraciones, en donde estarán involucradas las partes afectadas, en este caso los departamentos de Producción y Mantenimiento.

La reducción de costos de mantenimiento pueden aumentar las ganancias de la empresa o la posibilidad de inversión.

2.8.1 Ventajas del análisis de vibraciones.

Reducción de los costos de mantenimiento

- Identificar y corregir los problemas en las máquinas, antes de que estos sean más serios y más costosos de reparar.
- Identifica y reemplaza prácticas pobres de mantenimiento.
- Mejora la planeación y los programas de mantenimiento.
- Reduce el costo de horas laborales extras, del personal de mantenimiento.
- Mayor calidad en las reparaciones.
- Reducción de partes para mantenimiento en inventario.
- Reduce el mantenimiento preventivo programado, que puede ser innecesario y costoso.

Incremento de la producción

- Mejores condiciones de seguridad
- Reducción de tiempos perdidos inesperados por fallos en el equipo.
- Aumenta el valor de cada máquina, por el incremento anual de producción.
- Extensión de la vida útil del equipo, manteniendo una calidad constante durante el proceso.
- Reducción de pérdida de la materia prima
- Aumenta el grado de confiabilidad de la maquinaria, permitiendo cumplir a tiempo con las órdenes de producción.

Las ganancias obtenidas por la reducción de costos de mantenimiento e incremento de producción pueden ser aplicadas directamente a las ganancias de la empresa.

El análisis de vibraciones no puede realizarse en cualquier parte de la maquinaria, ya que hay partes que pueden mostrar un dato más exacto y confiable. Primero

deberán ubicarse los llamados puntos de prueba y con ayuda del transductor, que debe ser ubicado lo más cerca posible de los puntos de rodamiento, con metal sólido entre el rodamiento y el transductor, ya que no debe utilizarse directamente sobre el rodamiento, pero tampoco deberá usarse las llamadas gorras de rodamiento, porque son hechas de metal delgado y conducen poco la energía de vibración.

El desarrollo de la electrónica y los sistemas de cómputo han permitido de manera satisfactoria la implementación de nuevas técnicas de análisis de señales con aplicación en un sin número de procesos dentro de la industria, es así, como se empleara esta técnica para capturar, procesar y analizar las vibraciones de uno de los equipos de clarificación de la fábrica Buencafé Liofilizado de Colombia, con la firme convicción de lograr un diagnóstico de fallas en tiempo real controlado y/o monitoreado remotamente por medio de una red Intranet, desarrollado en el ambiente *Intouch*.

2.9 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los sistemas de adquisición de datos (*SAD*) constituyen la interfaz entre el mundo analógico y el digital. Para que esto sea posible es necesario cumplir varias etapas que son (véase figura 12):

Figura 12. Esquema de adquisición de datos



Fuente: http://www.ni.com/academic/instructor/meche_dynamics_vibration.htm.

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

Etapa de adquisición: esta etapa se encarga de recibir la información transmitida por el transductor, la cual en un principio esta de forma analógica y deben ser

digitalizadas de manera que se puedan procesar, por esta razón los elementos que componen esta etapa son conversores A/D (análogo/digital) y conversores D/A. Para las señales dinámicas, como la vibración, se recomienda emplear tarjetas de adquisición de datos con alta resolución (mayor a 16 bits) y una velocidad de muestreo de 100 Khz

Etapa de procesamiento: es la etapa en donde se analizan, las señales utilizando técnicas de procesamiento digital. Para ello se puede hacer uso de diferentes lenguajes de programación que permitan implementarlas de manera eficiente y confiable. Para esta aplicación se empleara un Controlador Lógico Programable. (PLC).

Etapa de visualización: En esta etapa se pueden visualizar, controlar y supervisar los datos adquiridos, a través de un software, el cual es llamado SCADA. Los sistemas SCADA proporcionan comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, actuadores, motores, entre otros) y controlan el proceso de forma automática desde un PC o computadora, visualizando en pantalla cada una de las estaciones remotas que conforman el sistema, los estados de ésta, las situaciones de alarma y la toma de acciones físicas sobre algún equipo lejano.

Cada uno de los ítems de SCADA involucran muchos subsistemas, por ejemplo, la adquisición de datos puede estar a cargo de un PLC; el cual toma las señales y las envía a las estaciones remotas usando un protocolo de comunicación determinado, esta comunicación por lo regular se realiza mediante buses especiales o redes LAN.

Además envía la información generada en el proceso productivo a distintos usuarios, todos en tiempo real, así las áreas de administración, calidad, proceso y mantenimiento tendrán al mismo tiempo la misma información.

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

Aquí se pueden almacenar cualquier cantidad de variables, como lo son nivel, presión, temperatura, entre otros (Cfr. *National Instruments*, 2011)

2.10 SISTEMAS SCADA

2.10.1 Fundamentación teórica de los Sistemas SCADA.

La palabra SCADA significa a (*Supervisory Control And Data Acquisition*), Control Supervisor y adquisición de Datos.

Un sistema SCADA es una aplicación de aplicaciones software especialmente

diseñada para funcionar sobre ordenadores de control de producción, con acceso a la planta mediante la comunicación digital con los instrumentos y actuadores y una interfaz gráfica de alto nivel. La interconexión de los sistemas SCADA también es propia, es decir, se realiza una interfaz del PC a la planta centralizada, cerrando el lazo sobre el ordenador principal de supervisión (Ver figura 13).

Figura 13. Prototipo de sistema SCADA



Fuente:http://formacion.plcmadrid.es/descargas/docs/proyecto_automatizacion.pdf

Un Software SCADA debe ser capaz de ofrecer al sistema:

- La posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma.
- La generación de registros históricos, provenientes de las señales de la planta, que pueden ser exportados para el proceso sobre una hoja de cálculo.
- La ejecución de programas, que modifican la ley de control, o incluso anular o modificar las tareas asociadas al autómeta, bajo ciertas condiciones.

2.10.2 Requisitos básicos para adquirir un sistema SCADA.

En el mercado existen muchos tipos de sistemas SCADA, es por eso que se deben tener en cuenta varios aspectos a la hora de adquirir uno de estos software, dependiendo del fabricante o de la finalidad con que se va a hacer uso del sistema, por ello antes de decidir cuál es el más adecuado se debe tener en cuenta y tener presente los requerimientos básicos, que son:

- El sistema debe tener arquitectura abierta, es decir, debe permitir su crecimiento y/o expansión, así como deben adecuarse a las necesidades futuras del proceso y de la planta.
- Deben permitir la adquisición de datos de todo tipo equipo, así como la comunicación a nivel interno y externo (redes locales y de gestión).
- La programación e instalación no debe presentar mayor dificultad, debe contar con interfaces graficas que muestren un esquema básico y real del proceso.
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware y fáciles de utilizar, con interfaces amigables para el usuario.

2.10.3 Funciones Principales del Sistema.

Supervisión remota de instalaciones y equipos: Permite al operador conocer el estado de desempeño de las instalaciones y los equipos alojados en la planta, lo que permite dirigir las tareas de mantenimiento y estadística de fallas.

Control remoto de instalaciones y equipos: Mediante el sistema se puede activar o desactivar los equipos remotamente (por ejemplo abrir válvula, activar interruptores, encender motores, entre otros) de manera automática y también manual. Además es posible ajustar calores de referencia, algoritmos de control.

Procesamiento de datos: El conjunto de datos adquiridos conforman la información que alimenta el sistema, esta información es procesada, analizada y comparada con los daros anteriores, y con datos de otros puntos de referencia, dando como resultado una información confiable y veraz.

Visualización grafica dinámica: El sistema es capaz de brindar imágenes en movimiento que representan el comportamiento del proceso, dándole el operador la impresión de estar presente dentro de una planta real. Estos gráficos también pueden corresponder a curvas de las señales analizadas en el tiempo, durante el proceso.

Generación de reportes: El sistema permite generar informes con datos estadísticos del proceso en un tiempo determinado.

Representación de señales de alarma: A través de las señales de alarma se logra alertar al operador frente a una falla o a la presencia de una condición perjudicial o fuera de lo aceptable. Estas señales pueden ser visuales, sonoras o ambas.

Almacenamiento de información histórica: Se cuenta con la opción de almacenar los datos adquiridos, la cual puede analizarse posteriormente, el tiempo de almacenamiento dependerá del operador o del autor del programa.

Programación de eventos: Es una opción que brinda la posibilidad de programar

subprogramas que manifiestan automáticamente reportes, estadísticas, graficas de curvas... entre muchas otras funciones.

2.10.4 Elementos del Sistema SCADA.

Un Sistema SCADA está conformado por:

Interfaz Operador Máquina: (*HMI*) *Human Machine Interface*. Es el entorno visual que brinda el sistema para que el operador se adapte al proceso desarrollado por la planta. Permite la interacción del ser humano con los medios tecnológicos implementados.

Unidad Central (*MTU Unit Terminal Master*). Conocida como unidad central Maestra, la cual es la encargada de ejecutar las acciones de mando a través de un software responsable de comunicarse con las unidades remotas (PLC's) y a su vez con los programas *HMI*. La programación se realiza por medio de bloques de programa en lenguaje de alto nivel. La unidad también se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos.

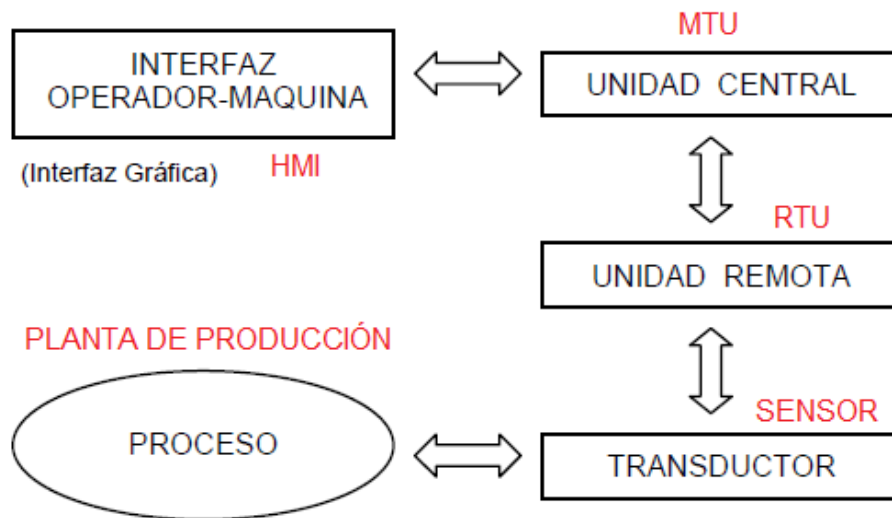
Unidad Remota (*RTU Remote Terminal Unit*). Lo constituye todo elemento que envía algún tipo de información a la unidad central de forma remota, obtiene los datos, los descifra en determinado formato y los transmite a la Unidad Central Maestra (*MTU*). Es parte del proceso productivo y necesariamente se encuentra ubicada en la planta.

La RTU se conecta al equipo físicamente y lee los datos de estado como abierto/cerrado desde una válvula, lee las medidas como temperatura, flujo, presión, voltaje, es así como la RTU puede enviar señales para controlar los dispositivos, logrando poder manipularlos al antojo del operador.

Sistema de comunicaciones: Se encarga de la transferencia de información del punto donde se realizan las operaciones, hasta el punto donde se supervisa y controla el proceso. Lo conforman los transmisores, receptores y medios de comunicación.

Transductores: Son los elementos que permiten la conversión de una señal física en una señal eléctrica (y viceversa). Su calibración es muy importante para que no haya problema con la confusión de valores de los datos (ver figura 14).

Figura 14. Diagrama de una adquisición de datos



Fuente <http://www.aiu.edu/applications>

Un sistema SCADA debe ser muy confiable. Los sistemas de comunicación para este software de vigilancia se han desarrollado para manejar comunicaciones de bajo nivel de una manera predecible. El funcionamiento normal para un sistema SCADA es esperar siempre, que cada transmisión sea reconocida. Las fallas eventualmente repetidas harán que el RTU en cuestión sea marcado como fuera de servicio; todo esto está ligado a sus comunicaciones y sus "Protocolos de comunicación".

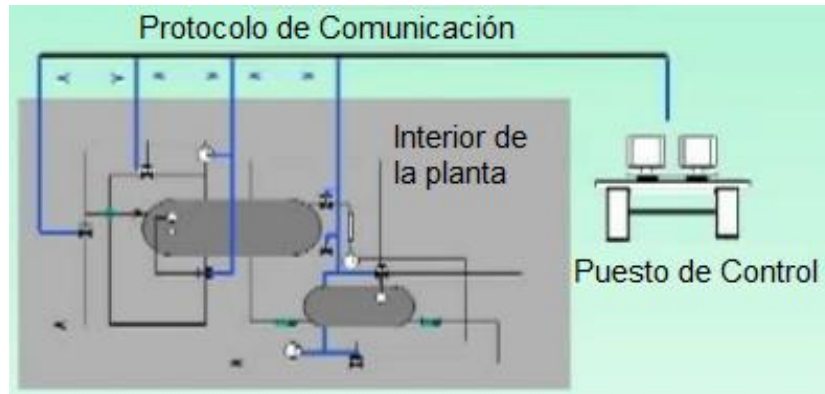
2.11 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Son un conjunto de reglas que permiten la transferencia e intercambio de datos entre distintos dispositivos que conforman una red. Estos han evolucionado a través del tiempo de la mano de la tecnología electrónica y del desarrollo de los microprocesadores, los cuales desde su incursión en la industria han posibilitado su integración a redes de comunicación con importantes ventajas, entre las cuales se tienen:

- Mayor precisión derivada de la integración de tecnología digital en las mediciones.
- Mayor y mejor disponibilidad de información de los dispositivos de campo.

- Diagnóstico remoto de cada uno de los componentes que integran un proceso determinado (Protocolos de comunicación industriales) [ver figura 15].

Figura 15. Esquema de comunicación en una planta industrial



Fuente:<http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/articulos/agosto-06.pdf>.

La integración de todos los dispositivos independientes, se puede lograr dividiendo las tareas entre grupos de procesadores jerárquicamente anidados. Dando lugar a una estructura de redes industriales, clasificada en tres categorías:

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

2.12 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN PORTÁTIL O DE NIVEL GLOBAL

La medición de nivel global es utilizada para medir la vibración total en forma de aceleración, velocidad o desplazamiento a través de medidores locales, ligeros portátiles, esto los hace ideales para la recolección de datos de máquinas en servicio de una planta. Estos instrumentos han existido por años y en algún momento fueron los principales dispositivos en la evaluación de los equipos dentro de los programas de mantenimiento predictivo, en donde se recolectaban los datos para luego graficarlos nuevamente.

Una de las variables más importantes a la hora de identificar una falla empleando el análisis de vibraciones es la frecuencia, la cual, según sus valores, por más bajos que estos sean podrían identificar condiciones anormales en los elementos de máquinas, tales como rodamientos, condición de los engranajes, roce en el

rotor, estado del lubricante, entre otros, previniendo así, futuras averías o paros intempestivos de la máquina.

Dentro de los análisis de vibraciones, los mejores y más completos estudios, se realizan a través de evaluaciones del espectro de vibración, el espectro equivale a la suma general de toda la vibración medida por el transductor dentro del rango de frecuencias seleccionado. El transductor puede incluso detectar la vibración de una máquina adyacente y se incluyen dentro del espectro de vibración, siendo posible separarla solo con el espectro analizando cada frecuencia adquirida, sin este recurso no sería posible diagnosticar e identificar la posible causa, generadora de la vibración.

2.12.1 Equipos empleados para la medición de la vibración portátil.

Figura 16. Medidor de vibraciones portable FLUKE 805



Fuente <http://www.google.com.co/search>.

Los medidores de nivel global de vibración no son herramientas útiles para el desarrollo de programas de análisis de vibraciones debido a su falta de capacidad. Solo son posiblemente útiles en el seguimiento de maquinaria no crítica, ya que el nivel de vibración en determinadas frecuencias no puede ser medido por estos instrumentos.

En este caso, los problemas potencialmente graves no pueden desarrollar un efecto sobre el nivel global, es decir, desgaste en cojinetes, engranajes, fisuras en barras de rotor, entre otras fallas, no podrían ser detectadas con este medio.

El medidor de vibración global, no tiene la capacidad de medir la amplitud de vibración versus el contenido de frecuencia (espectro de frecuencias) (Efytimes, 2013).

2.13 ANALISIS DE VIBRACIÓN

Para realizar la clasificación de la severidad de la vibración en una máquina, la variable del movimiento a considerar (**desplazamiento, velocidad o aceleración de la vibración**) depende del tipo de norma y del rango de frecuencias tenidas en cuenta para realizar el análisis, todo con el propósito de establecer clasificaciones para los equipos indicando como han de llevarse a cabo las medidas y como han de analizarse los datos obtenidos; definiendo, del mismo modo, las condiciones de operación del equipo durante el procedimiento de ensayo.

2.13.1 Tipos de Normas.

Según el tipo de desarrollo y de aplicación pueden considerarse varios tipos de normas, entre ellas:

Normas Internacionales (ISO- International Standards Organization). Se consideran de máxima prioridad en transacciones internacionales, siendo en la práctica el punto de partida para valorar la severidad de vibraciones. El principal inconveniente que presenta este tipo de normas es su carácter general.

Recomendaciones de los fabricantes. Son recomendaciones dadas por los fabricantes sobre los niveles de vibración permisibles en sus equipos. En la mayor parte de los casos, se limitan al área de la turbomaquinaria, aunque hay una gran tendencia a exigir este tipo de información al fabricante cada vez que se adquiere en equipo crítico.

Normas Internas. Resulta recomendable desarrollar normativas internas propias de vibraciones por ser las que mejor se adaptan a los equipos de cada planta productiva. Esta es una de las tareas más difíciles dentro del Mantenimiento Predictivo, pero se ve recompensada a medio plazo por los excelentes resultados obtenidos. Para ello, la organización debe contar con personal calificado y certificado; de lo contrario debe contratar el servicio que, lo que resultaría más costoso.

2.13.2 Tipos de maquinaria.

Al igual que las normas, las máquinas también pueden subdividirse; teniendo en cuenta su medida y evaluación de la vibración estas pueden dividirse en 4 categorías.

Máquinas de movimiento alternativo: este tipo de máquinas poseen componentes rotativos y alternativos, un claro ejemplo son, motores diesel, bombas y compresores. En estos casos, la vibración se mide normalmente en la estructura principal de la máquina a bajas frecuencias.

Máquinas rotativas con rotores rígidos: este grupo lo componen los motores

eléctricos, bombas de desplazamiento positivo de tipo monoetapa y bombas de baja velocidad. La vibración habitualmente se mide en la estructura principal de la máquina (tapas de cojinetes o soportes) donde los niveles de vibración resultan indicativos de las fuerzas de excitación generadas en el rotor como consecuencia de desequilibrios, rozamientos, deformaciones térmicas, vórtices y otros tipos de excitación.

Máquinas rotativas con rotores flexibles: la máquina puede vibrar de acuerdo con más de un modo de vibración según pasa por una o más de sus velocidades críticas hasta alcanzar la velocidad correspondiente al régimen de servicio (generadores a través de turbinas de vapor, bombas multietapa y compresores). En este tipo de máquinas, la medida de la amplitud de vibración en un elemento de la estructura puede no ser indicativa del nivel de vibración del rotor, por ejemplo, un rotor flexible puede experimentar desplazamientos en vibración de gran amplitud que den lugar a un rápido fallo de máquinas, aunque el nivel de vibración medido en la tapa del cojinete resulte ser muy pequeño. En estos casos, resulta esencial medir el nivel de vibración directamente sobre el eje.

Máquinas rotativas con rotores semirígidos: turbinas de vapor de baja presión, compresores de flujo axial y ventiladores, son máquinas cuyo tipo de rotor flexible permite la medida de la amplitud de la vibración, pueda ser tomada en la tapa del cojinete, la cual reflejara de forma directa sobre la medición.

2.14 NORMAS EMPLEADAS PARA LA MEDICIÓN DE LA CRITICIDAD DE LA VIBRACIÓN

2.14.1 Carta de Rathbone.

Aunque es una guía NO una norma, tiene amplia aceptación en el ámbito industrial. Su creación fue hacia los años treinta y perfeccionada posteriormente. Esta carta dispone de una escala logarítmica frecuencial en Hercios o RPM y de una logarítmica de amplitudes en desplazamiento (Pico o Pico a Pico) en velocidad, mediante los cuales podremos determinar directamente la severidad de la vibración.

La carta aunque es muy empleada, tiene algunas limitaciones como por ejemplo:

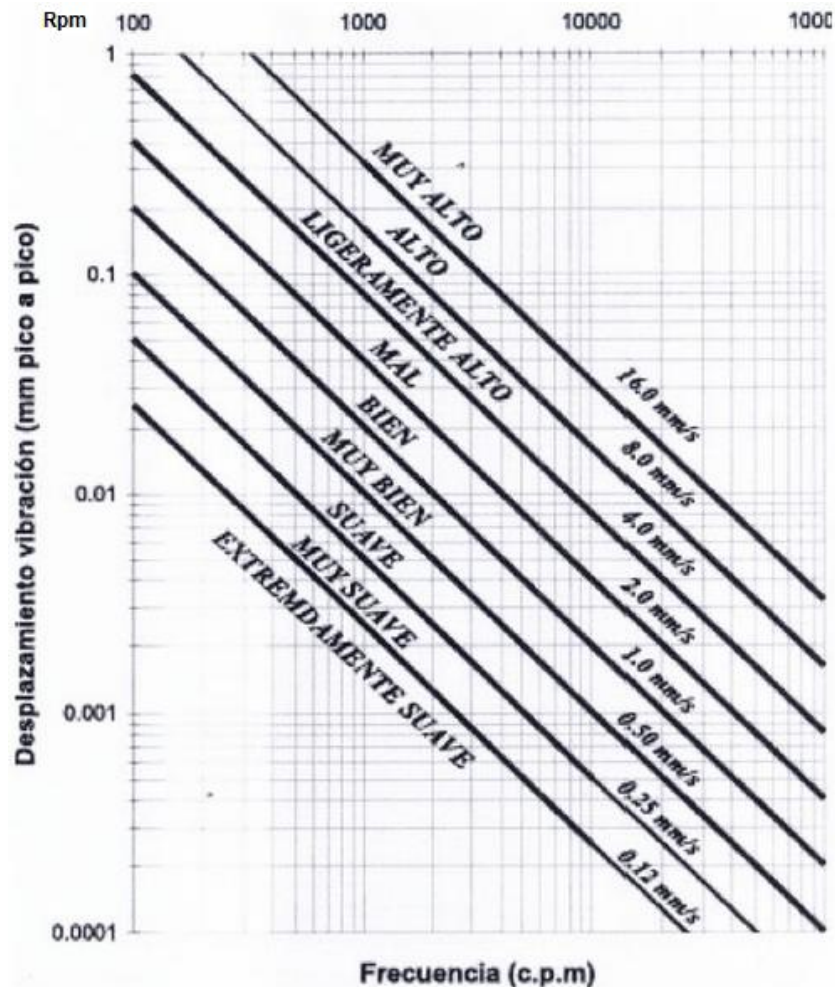
- No tiene en cuenta el tipo de máquina, la potencia y la rigidez de los anclajes.
- Es aplicable solamente a los equipos rotativos y no a los alternativos u otros sistemas industriales.
- Cuento mayor es la frecuencia, la amplitud de vibración en desplazamiento tiene que ser menor para que se conserve la misma severidad, es decir, si un equipo vibra a 300 cpm con 100 micras p-p. la

severidad es buena, pero si la misma amplitud corresponde a una frecuencia de 4.000 cpm, entonces la severidad es “grave”. La vibración a baja frecuencia es menos peligrosa que la vibración a alta frecuencia de ahí que las averías de engranajes y rodamientos, que se producen generalmente a alta frecuencia sean muy peligrosas.

- Este es el motivo por el cual las amplitudes de baja frecuencia se miden en desplazamientos y las de alta frecuencia en velocidad o aceleración. La carta de Rathbone fue creada para máquinas de bajas Rpm y hoy se considera obsoleta.

Carta de Rathbone

Figura 17. Carta de Rathbone



<http://www.sinais.es/normativa/rathbone.html>.

2.14.2 Norma ISO 2372 de 1974.

Con esta norma se pueden analizar equipos cuya velocidad de operación este entre las 100 y las 200 Revoluciones por Segundo, lo que es igual a las 600 ó 12.000 Revoluciones por minuto.

Los datos que se requieren para su aplicación, son el nivel global de vibración en velocidad- valor eficaz RMS, en un rango de frecuencia entre 10 y 1000 Hz, distinguiendo las clases de equipos rotativos.

- **Clase I** : Equipos pequeños hasta 15 Kw

- **Clase II:** Equipos medios, de 15 a 75 Kw
- **Clase III:** Equipos grandes, por encima de 75 Kw con cimentación especial rígida o de 300 Kw con cimentación especial.
- **Clase IV:** turbomaquinaria (equipos con Rpm > a la velocidad crítica)

Para utilizar la norma ISO 2372, basta con clasificar la máquina en estudio dentro de la clase correspondiente y una vez obtenido el valor global de vibración entre 600 y 60.000 Cpm localizar en la tabla de esta norma, la zona en la que se encuentra.

Figura 18. Tabla de severidad de vibración según norma ISO 2372

Velocidad (mm/s, rms)	Tipos de máquinas				
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	
0,18 a 0,28	A				A Buena
0,28 a 0,45					
0,45 a 0,71					
0,71 a 1,12					
1,12 a 1,8	B		B Satisfactoria		B Satisfactoria
1,8 a 2,8	C				
2,8 a 4,5	C		C Inatisfactoria		C Inatisfactoria
4,5 a 7,1	D				
7,1 a 11,2	D		D Inaceptable		D Inaceptable
11,2 a 18	D				
18 a 28	D				D Inaceptable

Fuente: <http://www.sinai.es/normativa/rathbone.html>

2.14.3 Norma ISO 10816 de 1995.

Esta norma establece las condiciones y procedimientos para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objetivo de garantizar el funcionamiento confiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las normas ISO 2372 e ISO 3945, que en su momento fueron empleadas para analizar vibraciones mecánicas en máquinas que operaban desde 10 hasta 200 revoluciones por segundo. La norma ISO 10816 contiene un estándar que consta de cinco partes:

- **Parte I:** Indicaciones generales.

- **Parte II:** Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 Mw con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 Rpm.
- **Parte III:** Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 Kw y velocidades entre 120 y 15000 Rpm.
- **Parte IV:** Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.
- **Parte V:** Conjuntos de máquinas de plantas de hidrogenación y bombeo.

Los criterios de vibración de este estándar se aplica a un conjunto de máquinas con potencias superiores a 15 Kw y velocidades de entre 120 y 15.000 Rpm. Los criterios son solo aplicables para vibraciones producidas por la propia máquina y no para vibraciones que son transmitidas a la máquina desde fuentes externas. El valor eficaz (Rms) de la velocidad de la vibración se utiliza para determinar la condición de la máquina, este valor se puede determinar con casi todos los instrumentos convencionales para la medición de la vibración.

Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos principales han alcanzado sus temperaturas estacionarias de trabajo y con la máquina funcionando con condiciones nominales y específicas (Velocidad, flujo, presión y carga, determinando así su voltaje).

En máquinas con velocidad y carga variable, las mediciones deben realizarse bajo todas las condiciones a las que se espera que las máquinas trabajen durante periodos prolongados de tiempo. Los valores máximos medidos, bajo estas condiciones, serán considerados representativos de la vibración, si esta es superior a lo que el criterio permite y se sospecha de excesiva vibración de fondo, las mediciones se deberán realizar con la máquina detenida para determinar el grado de influencia de la vibración externa. Si con la máquina detenida excede el 25% de la vibración medida con la máquina en movimiento, son necesarias acciones correctivas para reducir el efecto de esta vibración (de fondo).

La severidad de la vibración se clasifica conforme a parámetros., algunos de ellos son:

- Tipo de máquina.
- Potencia o altura del eje.
- Flexibilidad del soporte.

Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, potencia o altura del eje

Las significativas diferencias en el diseño, tipos de descanso y estructuras de la

máquina, requieren una división en grupos, las máquinas de estos grupos pueden tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles.

- **Grupo I:** Máquinas rotativas grandes con potencia superior a 300 Kw, máquinas eléctricas con altura de eje mayores o iguales a 315 mm. ($H \geq 315$).
- **Grupo II:** Máquinas rotativas medianas con potencia entre 15 y 300 Kw, máquinas eléctricas con altura de eje mayor o igual a 160mm y menor o igual a 315 mm. ($160 \leq H \leq 315$)
- **Grupo III:** Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor *separado* (flujo centrifugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 Kw
- **Grupo IV:** Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor *integrado* (flujo centrifugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 Kw

Para tener en cuenta:

La altura del eje H de una máquina está definida como la distancia medida entre la línea del centro del eje y el plano de la base de la máquina misma.

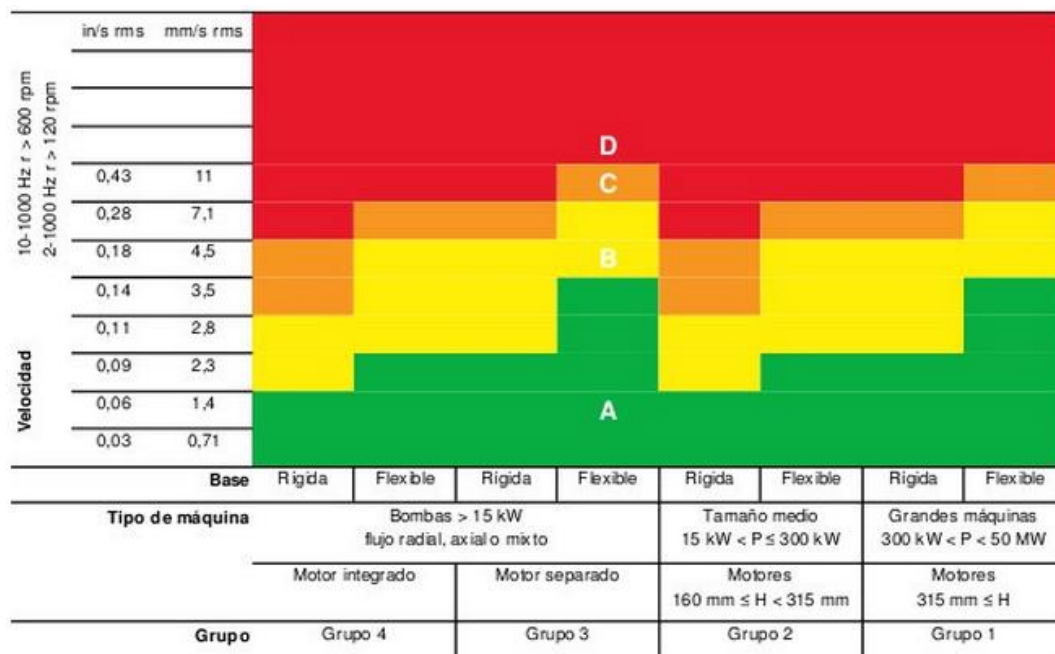
La altura del eje H de una máquina sin patas o de una máquina con pies levantados o cualquier máquina vertical, se debe tomar como la altura de eje H de una máquina horizontal en el mismo marco básico. Cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de máquina puede ser utilizada.

Clasificación según la flexibilidad del soporte

Si la primera frecuencia natural del sistema máquina-soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación) en al menos un 25%, entonces el sistema soporte puede ser considerado rígido en esa dirección. Todos los otros sistemas soportes pueden ser considerados flexibles. En algunos casos el sistema máquina-soporte puede ser considerado rígido en una dirección de medición y flexible en la otra.

Por ejemplo, la primera frecuencia natural en la dirección vertical puede estar sobre la frecuencia principal de excitación mientras que la frecuencia natural horizontal puede ser considerablemente menor. Tales sistemas serian rígidos en el plano vertical y flexible en el plano horizontal. En estos casos, la vibración debe ser evaluada de acuerdo a la clasificación del soporte que corresponda en la dirección de la medición.

Figura 19. Tabla de severidad de vibración según norma ISO 10816



Fuente <http://www.sinais.es/normativa/rathbone.html>.



Máquina nueva o reacondicionada:

Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas.



Máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones.



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



Máquinas con valores de vibración altos, lo que los hace peligrosos para la máquina ya que esta puede sufrir daños.

2.14.4 Normas para certificación en análisis de vibraciones mecánicas.

Dentro de las normas para analizar la severidad de la vibración, se encuentran también las normas para certificar a las personas que realizan dichas lecturas y analizan los datos obtenidos, entre ellas la más relevante, la norma ISO 18436.

Norma ISO 18436-2 de 2003: especifica los procedimientos para capacitar y certificar al personal que realiza monitoreo de condiciones de maquinaria y

diagnóstico de máquinas basados en el análisis de vibraciones. La certificación de esta norma supondrá el reconocimiento de las cualificaciones y competencias de las personas para realizar mediciones de la vibración utilizando sensores portátiles e instalados en dichos equipos.

La certificación en esta norma solo puede lograrse una vez se hayan cursado y aprobado sus 4 categorías, que son:

- **Categoría I:** las personas que satisfacen esta categoría se les reconoce estar certificadas para realizar mediciones de vibraciones en máquinas con instrumentos de un canal y análisis de espectros preliminares en algunos tipos de máquinas.
- **Categoría II:** las personas que satisfacen esta categoría se les reconoce estar calificadas para realizar medición y análisis vibraciones básicas en máquinas industriales de acuerdo a procedimientos establecidos.
- **Categoría III:** las personas que satisfacen esta categoría se les reconoce estar calificadas para realizar medición y análisis de vibraciones con instrumentos multicanales, seleccionar las técnicas de análisis más apropiadas y establecer programas de monitoreo de vibraciones.
- **Categoría IV:** las personas que satisfacen esta categoría se les reconoce estar calificadas para realizar y/o dirigir todo tipo de medición y análisis de vibraciones, recomendar acciones correctivas de uso común para reducir el nivel de vibraciones de máquinas y estructuras, e interpretar y evaluar normas y recomendación del fabricante para fijar niveles de aceptación y alarma.

2.15 COMO PUEDE USARSE LA VIBRACIÓN PARA EVALUAR CONDICIONES EN UNA MÁQUINA

La finalidad del análisis de vibraciones es encontrar un aviso con suficiente tiempo para poder analizar causas y formas de resolver el o los problemas que pudiese tener la máquina, antes de que este genere un paro no programado.

Ya se ha tratado con algún detalle la vibración desde el punto de vista de sus causas y características generales. Al igual que de su funcionamiento y de los instrumentos que se emplean para medirla, ahora, el siguiente paso es identificar tanto los problemas como las causas en máquinas específicas, a través de los análisis. Pero antes de eso, recordemos algunos de los parámetros necesarios para evaluar la vibración.

2.15.1 Parámetros de la vibración.

Un punto importante a la hora de hablar de vibraciones es conocer la severidad de la vibración la cual indica la gravedad de un posible defecto que pueda tener la máquina, la amplitud de la vibración expresa la gravedad de problema, pero es difícil establecer valores límites de vibración que identifiquen una avería.

Los parámetros de la vibración habitualmente utilizados para las mediciones de las vibraciones de las máquinas son la frecuencia, la amplitud, el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y la energía de impulsos (*Spike energy*).

Vibración

La vibración no es más que el movimiento de un lado al otro de una máquina o parte de ella, con respecto a su posición inicial, por un tiempo prolongado, es decir,

La vibración es la respuesta de un sistema a algún estímulo o fuerza aplicada al sistema:

$$\text{Vibración} = \frac{\text{Fuerza Dinámica}}{\text{Resistencia Dinámica.}} \quad (5)$$

¿Qué causa la Vibración?

En la mayoría de los casos los problemas mecánicos son el causal de este síntoma, los más comunes son: Desequilibrio de partes rotativas, desalineación de los acoplamientos y cojinetes, flexión de los ejes, engranajes desgastados, excéntricos o dañados, correas en mal estado, también encontramos fuerzas electromagnéticas, fuerzas aerodinámicas, resonancia, entre otras.

La causa de la Vibración, independiente de cuál sea ésta, es una fuerza que cambia tanto en magnitud como en dirección en el tiempo. Estas causas tienen sus propias características que dependen de la manera como dichas fuerzas se hayan generado.

¿Cuándo analizar?

Generalmente se realiza un análisis cuando se revela un aumento significativo de la vibración o ruido durante los chequeos periódicos a la maquinaria, lo ideal sería un monitoreo constante el cual emitiera señales de alarma al momento del incremento de vibración de los equipos, los cuales determinarían la verdadera severidad de vibración que experimenta la máquina.

Cuando el síntoma es ruido excesivo, el análisis de la vibración y el ruido de la maquinaria dará a conocer si el ruido proviene de desperfectos mecánicos del aparato o si este es una característica del funcionamiento normal de la máquina, para este chequeo es fundamental el concepto del operario o personal encargado del funcionamiento del mismo.

Frecuencia de Vibración

La frecuencia de vibración es el tiempo que se requiere para completar un ciclo vibratorio completo, una vibración periódica es el movimiento que ocurre cuando una partícula realiza un movimiento oscilatorio alrededor de una posición de referencia, repitiéndolo de la misma manera luego de haber transcurrido una determinada cantidad de tiempo. Esta se expresa en ciclos por segundo (CPS) o también llamados Hertz (Hz).

Periodo de Vibración

El periodo de vibración, es el tiempo transcurrido entre dos condiciones sucesivas e iguales de movimiento. La frecuencia se calcula a partir del inversa del Periodo (T), si el periodo indica el tiempo de una oscilación, la frecuencia indica el número de ciclos de oscilación producidos por unidad de tiempo.

Amplitud de Vibración

La amplitud de vibración permite conocer el CUANTO del movimiento vibratorio, debido a la adición de masa en el punto indicado, el nivel de vibración aumenta a medida que aumente la velocidad de giro. La altura de la onda es la amplitud. La amplitud de vibración se puede medir en tres variables.

Desplazamiento de Vibración: es la distancia recorrida por el punto medido, debido a la vibración.

Velocidad de Vibración: matemáticamente es la primera derivada del desplazamiento en función del tiempo, es decir que mide las variaciones de la posición o desplazamiento. La velocidad alcanza un máximo cuando la masa pasa por la posición de equilibrio y es cero cuando invierte su movimiento en los extremos. La velocidad de vibración se experimenta por el punto medido al pasar por la posición neutra.

Aceleración: es el cambio de velocidad en el tiempo y es la segunda derivada del desplazamiento. La aceleración alcanza su punto máximo en el instante en que la velocidad está en su punto mínimo., es decir, en el punto donde la masa ha desacelerado hasta detenerse y está por comenzar a acelerarse nuevamente en la dirección opuesta.

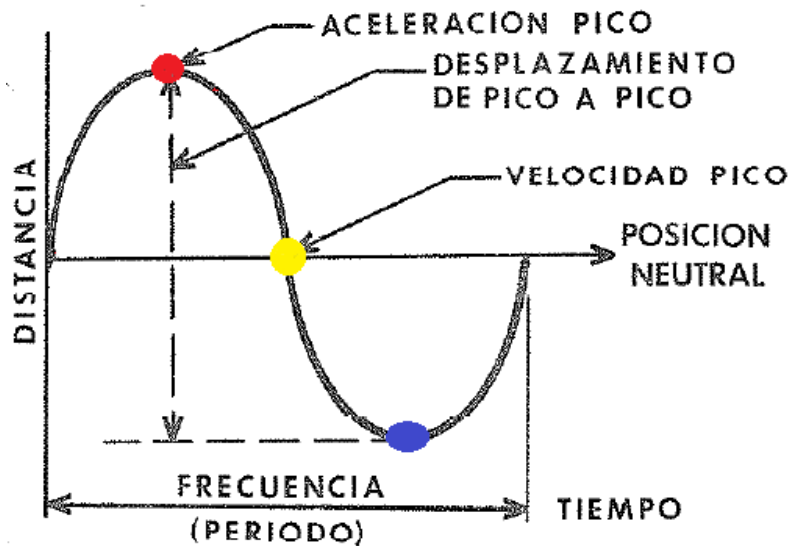
¿Cómo se miden?, ¿en qué unidades?

Desplazamiento= MILS pico a pico (ingles) o Micrones pico a pico (métrico).

Velocidad= in/seg Rms o pico (ingles), ó mm/seg Rms (métrico).

Aceleración= in/seg² (ingles) o mm/seg² (métrico) [ver figura 31].

Figura 20. Parámetros que definen la vibración



Fuente IRD Mechanalysis.

- En este punto de la onda (en la cresta) encontramos la aceleración máxima relacionada con la velocidad mínima.
- En el intermedio de la onda (posición neutra) encontramos la velocidad máxima relacionada con la aceleración mínima.
- En la parte más baja encontramos nuevamente una velocidad mínima relacionada con una aceleración máxima.

A bajas frecuencias se puede medir desplazamiento,
A altas frecuencias podemos medir aceleración,
Para medir velocidad no se necesita conocer la
frecuencia.

De acuerdo al sistema métrico utilizado, las unidades en las cuales se pueden medir la vibración cambian. Esta selección es importante al momento de buscar en una tabla si un valor de vibración se encuentra dentro de los valores buenos, aceptables o críticos. Se podría incurrir en un error si se mezclan unas unidades con otras, dando un diagnóstico falso.

Cuando se comparan valores de amplitudes globales, ambas señales se deben medir en el mismo rango de frecuencias y con el mismo factor de escala, el factor

de escala se puede medir de la siguiente forma:

RMS (Root Mean Square): media de la raíz cuadrada: Es equivalente al valor empleado por los electricistas, es la energía que tiene la onda de vibración, por lo que es usado en aceleración.

Valor pico (Pk ó P): Es la medida del máximo valor de la onda de vibración, teniendo mayor uso en velocidad.

Valor Pico a Pico (Pk-Pk ó P-P): Es la medida entre el máximo positivo y el máximo negativo de la señal. Se utiliza normalmente para desplazamiento.

Fase de la Vibración

La fase define el CÓMO de la vibración, es decir, permite conocer cómo se mueven los apoyos de una máquina a una frecuencia determinada. La fase vibratoria se mide en grados angulares usando tanto una luz estroboscópica como una célula fotoeléctrica. La fase es la medición de cómo una parte se mueve o vibra en relación con un punto de referencia fijo. Un ángulo de desfase de 180° significa que está justamente en oposición de fase. Si son dos masas que se mueven con la misma frecuencia siempre mantendrán la misma fase de diferencia.

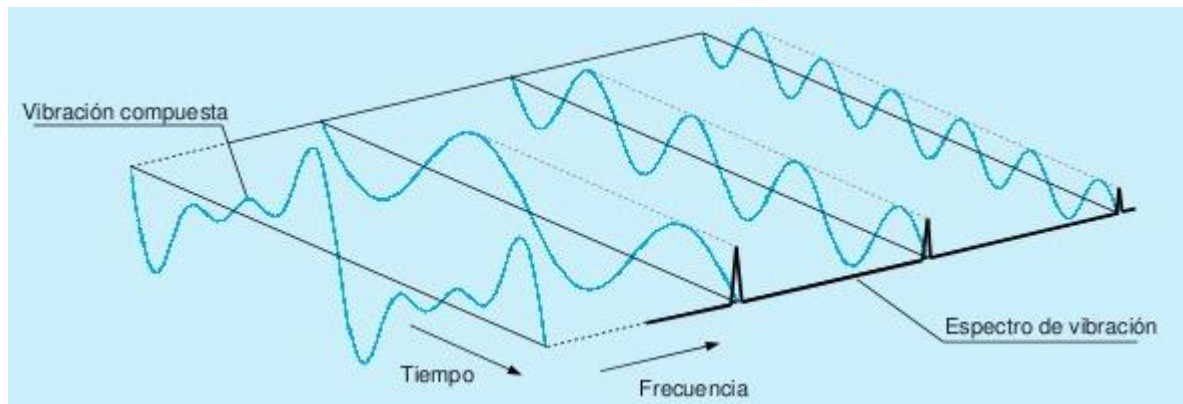
Espectro de vibración

Un espectro es una representación gráfica de la vibración en el dominio de la frecuencia con la amplitud de vibración (desplazamiento, velocidad o aceleración) en el eje Y y la frecuencia en el eje X (CPM o Hz). Allí se reúnen todas las señales capturadas directamente de la máquina, vibraciones sumadas en un solo gráfico, lo cual podría ser un inconveniente a la hora de realizar un diagnóstico, estas señales contienen gran cantidad de datos encriptados en forma compleja, ya que cada elemento genera una señal diferente y característico de su geometría y construcción.

Para realizar este estudio, el matemático francés Jean Baptiste Fourier encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos, Fourier indico que “cualquier forma de onda sinusoidal real, puede combinarse para hacer otra forma de onda más compleja y viceversa, cualquier forma de onda compleja puede ser separada en sus componentes simples de forma de onda sinusoidal.” es decir, el análisis de vibraciones que emplea la FFT (*Fast Fourier Transforms*), captura la señal del equipo, calcula las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y grafica el espectro.

Suma de señales en un espectro de vibración.

Figura 21. FFT de ondas vibratorias



Fuente www.google.com.co/search.

Transformada rápida de Fourier (FFT)

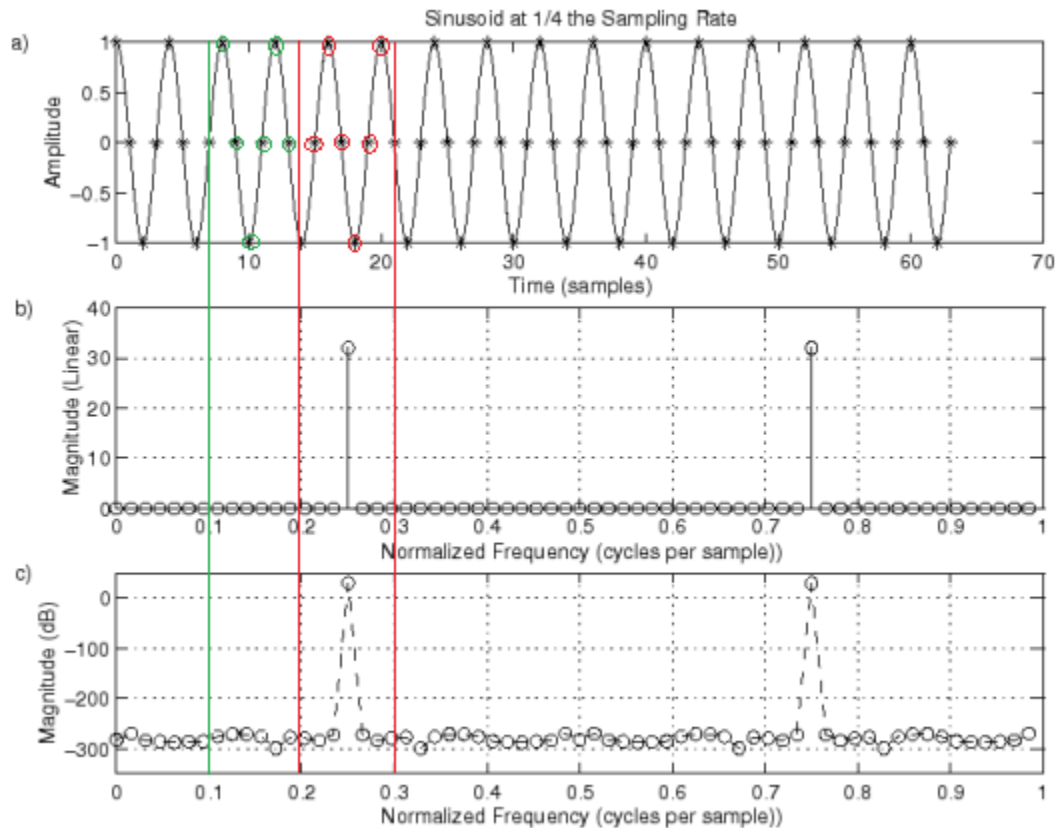
La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo eficiente matemático utilizado para la transformación de una señal de vibración muestreada desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Desafortunadamente, la señal no puede ser transformada en el dominio de la frecuencia de una manera continua. En primer lugar, debe ser muestreada y digitalizada antes que la transformación pueda ocurrir. Esto significa que las muestras del dominio del tiempo se digitalizan para muestras en el dominio de la frecuencia.

Un registro de tiempo se define como un número finito de muestras consecutivas, igualmente espaciadas de la señal de entrada. Porque hace que el algoritmo de transformación más simple y mucho más rápido, el número finito de muestras está limitado a un múltiplo de 2. Los microprocesadores trabajan en potencias de 2, llamados números binarios, por lo tanto, los intervalos de 4096 o muestras igualmente espaciadas a intervalos iguales de 212 (para este fin son empleados los instrumentos A/D a 12 bit, Análogo/Digital).

Transformada rápida de Fourier de una Sinusoide

Figura 22. FFT a partir de señales sinusoidales



Fuente: https://ccrma.stanford.edu/workshops/cm2007/topics/clases/PDFs/05fourier_handout.pdf.

2.15.2 Diagnóstico de vibraciones según su espectro de vibración.

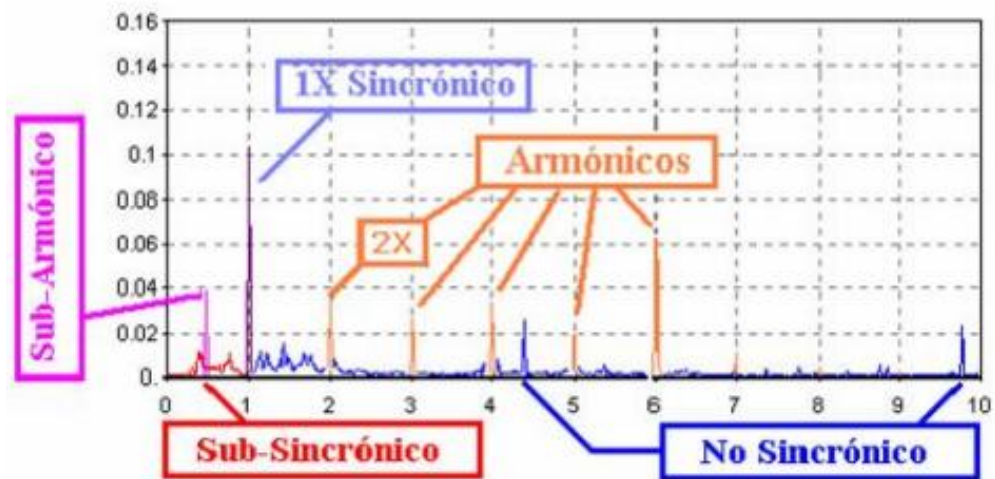
Para diagnosticar un problema mecánico a través de un espectro de vibración, se deben identificar sus componentes fundamentales, los cuales se ilustran en la figura 34.

El espectro de vibración está conformado por varios tipos de armónicos, que se diferencian según su amplitud en la frecuencia de vibración y se clasifican en:

- **Sincrónicos** = Son todos aquellos que se encuentran en una frecuencia de valor entero, es decir, 1X, 2X, 3X... 6X, 7X.
- **No sincrónicos** = Son todos aquellos armónicos que se encuentran en medio de los sincrónicos o sincrónicos, es decir, cuyo valor pertenece a un valor no entero o decimal, 4.5X, 9.8X, de la frecuencia de trabajo de la máquina.

- **Sub sincrónico** = Son todos aquellos valores que se encuentran por debajo de la frecuencia de trabajo de la máquina, es decir, todo lo que está por debajo de la 1X.
Más que la interpretación del espectro es fundamental conocer las características típicas de cada uno de los elementos a diagnosticar, como lo son:

Figura 23. Componentes de un espectro de vibración



Fuente www.sisman.utm.edu.ec.

- Componentes principales
- Principios básicos de operación
- Velocidades típicas de operación
- Principales tipos de fallas que presentan
- Frecuencias a las cuales se presentan

2.15.3 Como analizar un espectro de vibración.

Para poder analizar de buena forma un espectro vibratorio, se deben realizar algunas acciones como:

- Relacionar en forma precisa la frecuencia de las vibraciones con la velocidad de rotación de la máquina.
- Determinar para cada componente (frecuencia) vibratoria o grupos de componentes, la causa que la o las genera. Es de notar que las vibraciones pueden provenir de:

- Vibraciones propias al funcionamiento de la máquina: componentes a la frecuencia de paso de álabes en turbomáquinas (f_p = número de alabes por RPM), componentes a la frecuencia de engrane en reductores (f_e = número de dientes por RPM), entre otros.
- Vibraciones generadas por condiciones inapropiadas de funcionamiento: bombas centrífugas que trabajan a bajo flujo.
- Vibraciones provenientes de otras máquinas.
- Las más comunes, vibraciones generadas por fallas en la máquina: desalineamiento, soldaduras mecánicas, rozamientos.
- Una forma importante de facilitar el análisis y diagnóstico de fallas es comparar el espectro medido con el espectro base, el cual corresponde a aquel que se tomó cuando la máquina estaba funcionando en buenas condiciones (generalmente, máquina recién instalada).

¿Qué buscar en un espectro?

- Componentes a la velocidad de rotación de la máquina
- Armónicos de la velocidad de rotación
- Frecuencias más bajas de la velocidad de rotación. Distinguir si se trata de subarmónicos o subsíncronicos ($0.48x$; $0.5x$)
- Familias de armónicos y/o subarmónicos no relacionados a la frecuencia de rotación. Por ejemplo f_e , $2f_b$, BPFO, entre otros.
- Identificación de bandas laterales
- Vibraciones de banda ancha.

2.16 FALLAS MÁS COMUNES PARA EQUIPOS ROTATORIOS

Desbalanceo

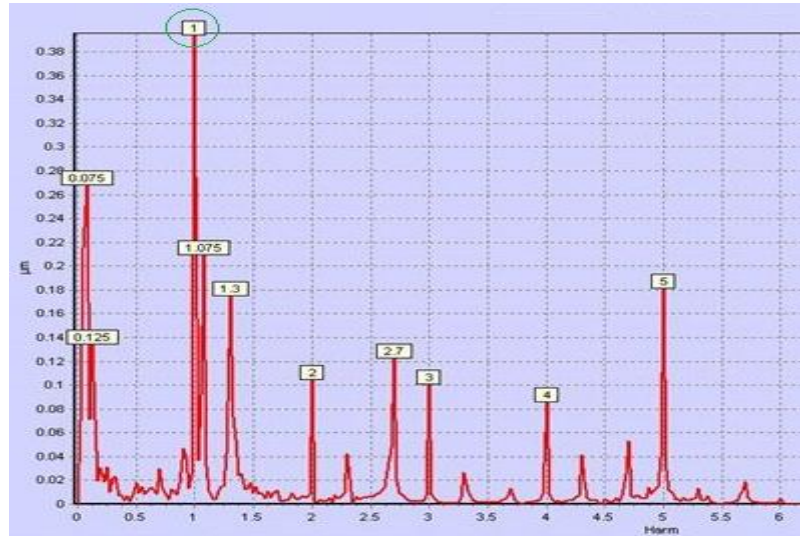
Es una de las fallas más comunes de vibración en maquinaria, cuando esta se produce se caracteriza por altos valores a la frecuencia de rotación del equipo. Esta se produce debido a que, al girar el rotor se genera una fuerza centrífuga radial hacia afuera, lo que provoca que el eje del rotor se flecte y la fuerza sea transmitida a los apoyos de la máquina.

La fuerza resultante tiene una forma armónica, por lo que su forma de onda sería sinusoidal y la frecuencia de excitación será la velocidad de giro del rotor, es decir, la $1x$ del equipo.

El desbalanceo es imposible de eliminarlo por completo, siempre se tendrán desbalances en los rotores, el punto es que estos se deben mantener dentro de

los márgenes aceptables para el buen funcionamiento del equipo y la seguridad de la planta (ver figura 24).

Figura 24. Espectro de vibración por desbalance



Fuente: <https://www.google.com.co>

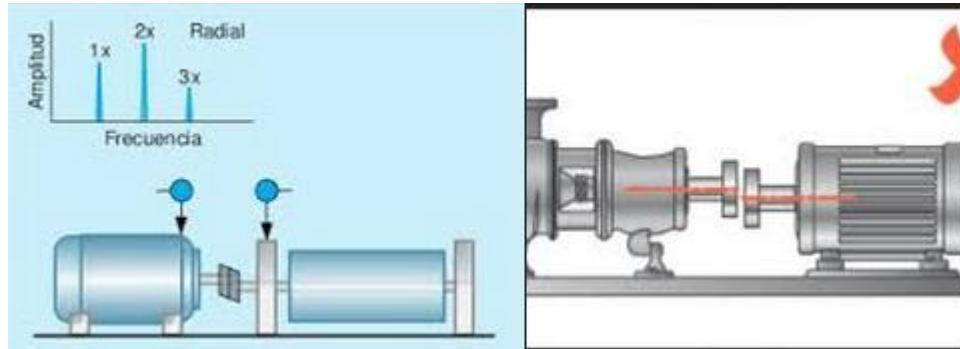
Desalineamiento

Es una condición en la cual los ejes de la máquina conductora y conducida no están en la misma línea de centros, por lo regular se encuentran dos tipos:

- Paralelo
- Angular

El efecto sobre el equipo que provoca el desalineamiento, radica en la flexión del eje, conductor y conducido, aumentando la carga en los apoyos de la máquina impactando y disminuyendo la vida útil de los rodamientos (ver figura 25).

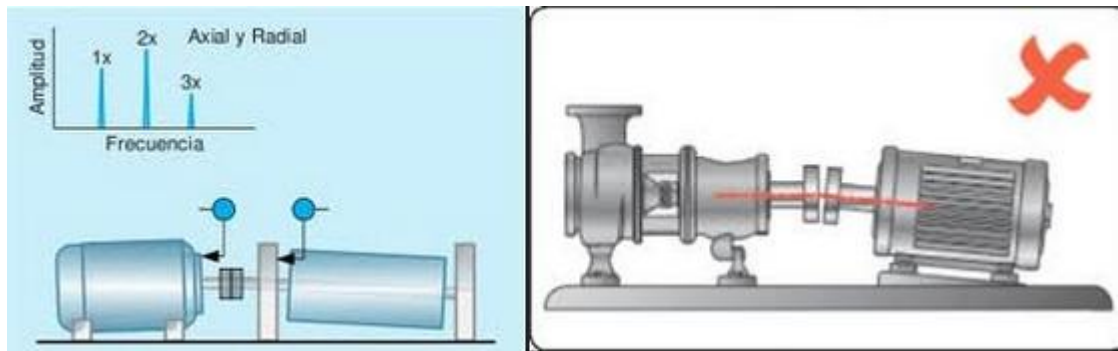
Figura 25. Desalineación Paralela



Fuente <https://www.google.com.co>.

Al igual que en el caso de desbalance, la desalineación no puede erradicarse por completo, por esta razón, los fabricantes en la mayoría de los casos recomiendan utilizar acoplamientos del tipo flexibles para que absorban en alguna medida la desalineación que pueda tener la máquina.

Figura 26. Desalineación Angular



Fuente <https://www.google.com.co>.

El espectro vibratorio normalmente muestra armónicos de la 1x, generalmente hasta la 3x, pero un desalineamiento severo puede llegar a tener hasta armónicos de 8x, que podría confundirse con solturas mecánicas, se podrían diferenciar analizando el piso de ruido elevado en los espectros, la desalineación no presenta este fenómeno.

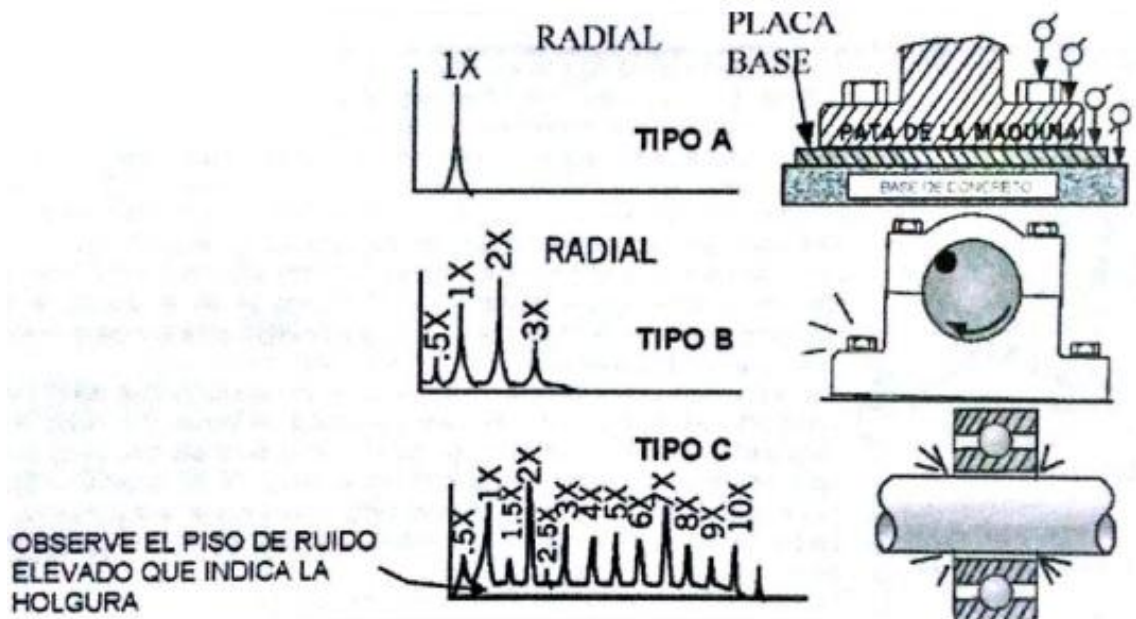
Un rodamiento inclinado generara una vibración axial considerable. Causará un

movimiento torcido con un cambio de fase de aproximadamente 180° entre la parte superior e inferior, derecha e izquierda de la caja de alojamiento del rodamiento. El tratar de alinear el acoplamiento no solucionará el problema, por lo general se debe retirar el rodamiento e instalarlo nuevamente.

Soltura Mecánica

Existen múltiples casos de solturas mecánicas, por tal razón el espectro de vibración se indica a través de 3 tipos, A, B y C (ver figura 38).

Figura 27. Tipos de holgura mecánica



Fuente Technical Associates of Charlotte.

Tipo A = Se debe a una fragilidad estructural de las bases de la máquina, de la placa base o del cemento; también se debe a un mortero deteriorado, a pernos de sujeción sueltos en la base y la distorsión del armazón de la base. El análisis de la fase puede revelar una diferencia de fase de aproximadamente 90° a 180° entre las lecturas verticales en el perno. En la base de la máquina, en la placa base y en la base en sí.

Tipo B = Por lo general se debe a pernos de anclaje flojos, a fracturas en la estructura del armazón o en el pedestal del rodamiento.

Tipo C = Normalmente se genera a causa de un ajuste inadecuado entre las

partes componentes originando muchas armónicas debido a la respuesta no lineal de la partes sueltas a las fuerzas dinámicas del rotor. Causa un truncamiento de la forma de onda y un piso de ruido mayor en el espectro. Con frecuencia el tipo C se debe a que el aro exterior del rodamiento esta flojo en su tapa, a un rodamiento suelto y que da vueltas en su eje.

Las mediciones del tipo C, por lo regular se tornan inestables entre lectura y lectura, la holgura mecánica es altamente direccional, si se comparan los niveles en incrementos de 30° en dirección radial en toda la caja del rodamiento, además se debe considerar que la holgura mecánica provoca múltiples sub-armónicos a exactamente ½ ó 1/3 RPM (0.5x , 1.5x, 2.5x).

Falla en rodamientos

La forma más simple para estimar la vida útil de un rodamiento está dada por la ecuación:

$$L_{10h} = \frac{106}{60n} (C/P)^p \quad (6)$$

Donde,

L_{10h} = Vida nominal del rodamiento en horas de servicio.

n = Velocidad de giro en rpm

C = Capacidad de carga dinámica (en N)

P = Carga dinámica equivalente (en N)

p = Exponente.

Para p los valores pueden ser:

- Rodamientos de bolas = 3;
- Rodamientos de rodillos 10/3.

La vida corresponde al número de horas que se espera que más del 90% de los rodamientos opere antes de manifestar problemas de fatiga, por lo que esta cantidad puede variar al ser esta vida útil un estimado estadístico.

Existen 4 tipos de daños generados por vibraciones en rodamientos, que son:

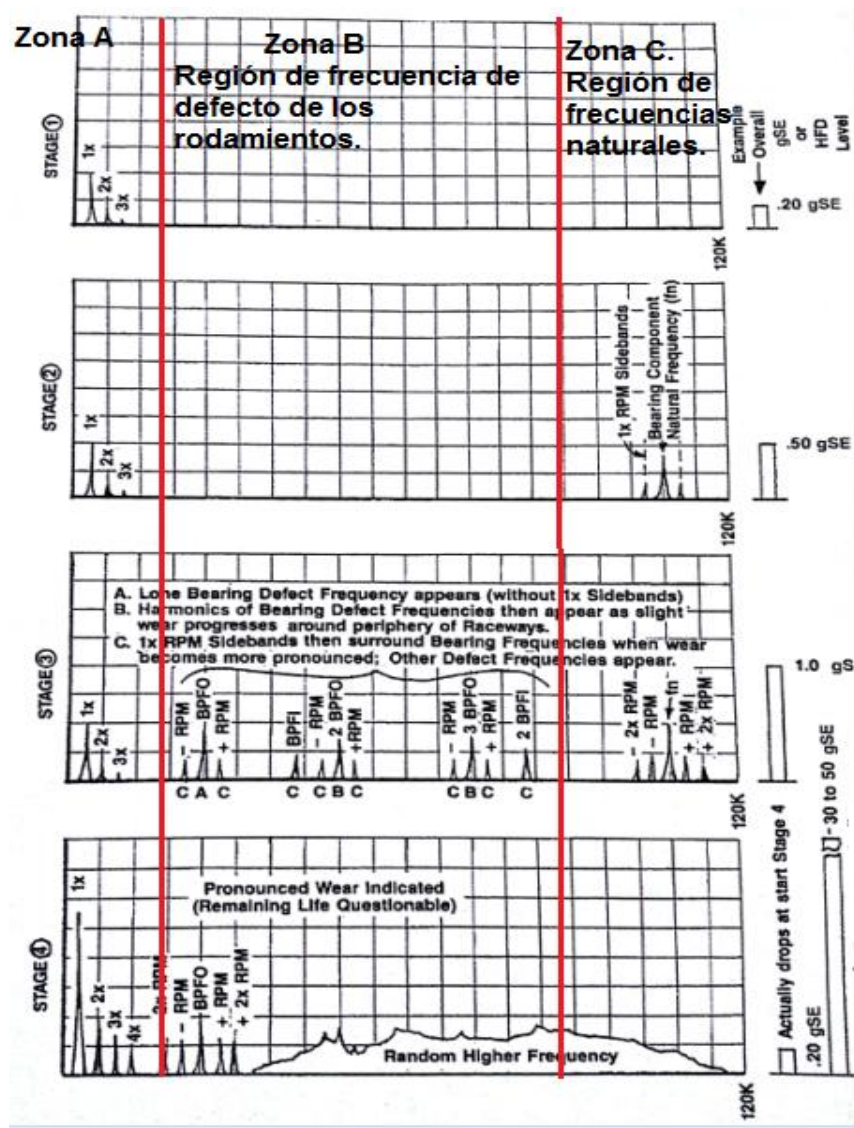
- Etapa 1: Las primeras indicaciones de problemas en los rodamientos aparecen en frecuencias ultrasónicas que oscilan entre 250,000 y 300,000 Hz, luego a medida que incrementa el desgaste, cae a aproximadamente 20,000 – 60,000 Hz lo que equivale a 1,200,000 - 3,600,00 CPM. Algunos de los métodos empleados para la adquisición de estos valores son; Filtro Spike Energy (gSE), Aceleración de alta frecuencia HFD (g) y por el impulso de choque (dB).

- Etapa 2: Los defectos ligeros del rodamiento comienzan a “excitar” las frecuencias naturales (f_n) de sus componentes, que generalmente ocurren en un rango de 30K – 120K CPM. Dichas frecuencias naturales también pueden ser resonancias de las estructuras de apoyo del rodamiento. Las frecuencias de bandas laterales aparecen arriba y abajo del pico de frecuencia natural al final de la etapa 2. La energía Spike Energy crece (por ejemplo, de .25 a .50 gSE).
- Etapa 3: Aparecen armónicos y frecuencias de defectos del rodamiento, a medida que el desgaste progresa, aparecen más armónicas y el número de bandas laterales crecen, tanto alrededor de estas como alrededor de las frecuencias naturales del componente del cojinete. En esta etapa por lo general el problema ya es visible y en la mayoría de los casos se extiende a toda la periferia del rodamiento. Los espectros demodulados de alta frecuencia y envolventes ayudan a confirmar esta etapa.
- Etapa 4: Hacia el final, incluso se afecta la amplitud 1X RPM. Esta crece y normalmente causa el crecimiento de muchos armónicos de 1X; las frecuencias naturales discretas de rodamientos y de componentes, comienzan a desaparecer y se reemplazan con piso de ruido de alta frecuencia, de banda ancha y aleatoria. Además, las amplitudes del piso de ruido de alta frecuencia y de Spike Energy pueden disminuir, sin embargo, antes del daño total del rodamiento, la energía Spike Energy y la HFD por lo regular crecen a amplitudes excesivas.

f_n = Frecuencias naturales de los componentes y de la estructura de soporte del rodamiento instalado.

Espectro de velocidad de un rodamiento en sus 4 etapas de fallas primarias

Figura 28. Etapas de daño de un rodamiento



Fuente: Technical Associates of Charlotte.

Síntomas de un rodamiento en sus diferentes etapas de desgaste

Etapas de daño de un rodamiento

- Nivel de ruido y temperatura en un rango normal.
- Incremento en las medidas ultrasónicas de sonido, emisión acústica, Spike Energy y deflexión en la pista externa.
- Vibración global baja, no hay impactos en el rodamiento.

Etapas 2

- Ligero incremento en el nivel de ruido.
- Temperatura normal
- Gran incremento del sonido ultrasónico, emisión acústica, Spike Energy y deflexión de la pista externa.
- Frecuencia del rodamiento claramente visible en escala logarítmica, apenas visible en la escala lineal del espectro, notable aumento en el ruido de fondo.

Etapas 3

- Nivel de ruido muy audible
- Ligero aumento de temperatura
- Muy alto sonido ultrasónico, emisión acústica, Spike Energy, y deflexión en la pista externa.
- Gran incremento en la vibración global, en aceleración y velocidad.
- Frecuencia del rodamiento con armónicos y bandas laterales claramente visibles en la escala lineal en el espectro de vibración.

Etapas 4

- Incremento en el nivel de ruido y de temperatura.
- Incremento significativo en la vibración global en desplazamiento y velocidad, disminución en la aceleración.
- Disminución gradual seguida de un rápido incremento en sonido ultrasónico, emisión acústica Spike Energy, justo antes del fallo.

3. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA PLANTA

Buencafé Liofilizado de Colombia en la búsqueda de producir el mejor café del mundo con los más altos estándares de calidad, cuenta al interior de su moderna planta con diferentes procesos para la transformación del café y dar valor agregado a tan apetecido producto. Estos procesos los podemos observar en la figura 29.

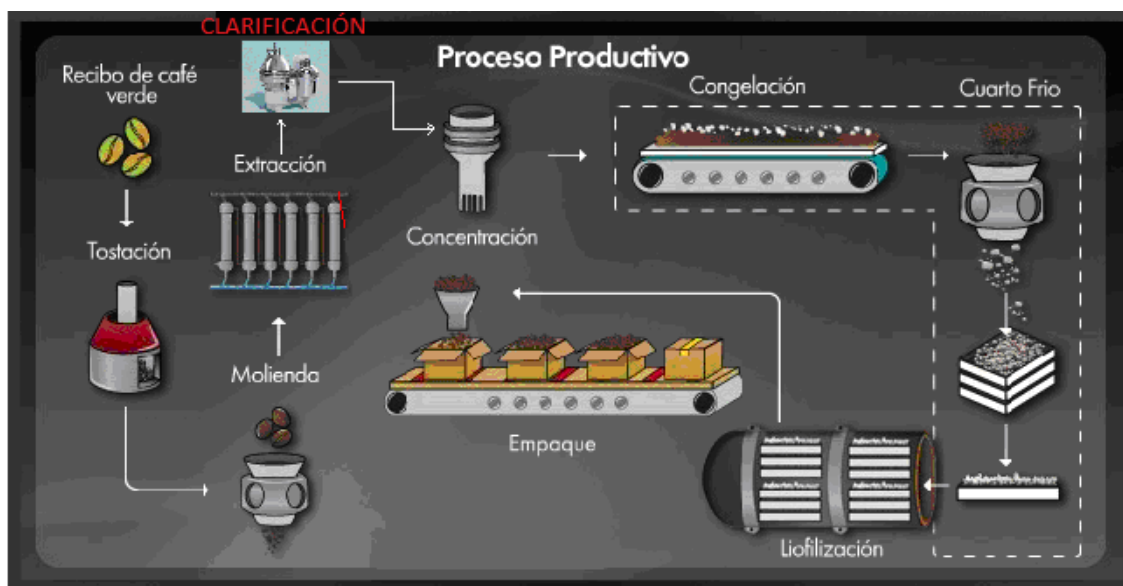
Figura 29. Café soluble liofilizado (*freeze dried*)



Fuente www.buendia.com.

Observando el proceso de forma integral intervienen en el los servicios industriales, el tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales, se puede tener un mejor concepto analizando la figura 30.

Figura 30. Proceso de liofilización



Fuente www.buencafe.com.

3.1 RECIBO MATERIA PRIMA

Buencafé usa café trillado en almendra 100% colombiano, que proviene de diferentes regiones cafeteras del país, manualmente seleccionado y cumpliendo con los estándares de trazabilidad que garantizan su calidad desde el cultivo, lo que permite a Buencafé ofrecer a sus clientes la mejor opción de café liofilizado y extracto de café.

3.2 TOSTACIÓN

La materia prima se somete a altas temperaturas que desarrolla reacciones químicas que favorecen el aroma, el sabor y el color propios de la bebida, características fundamentales para obtener una buena calidad en el producto final.

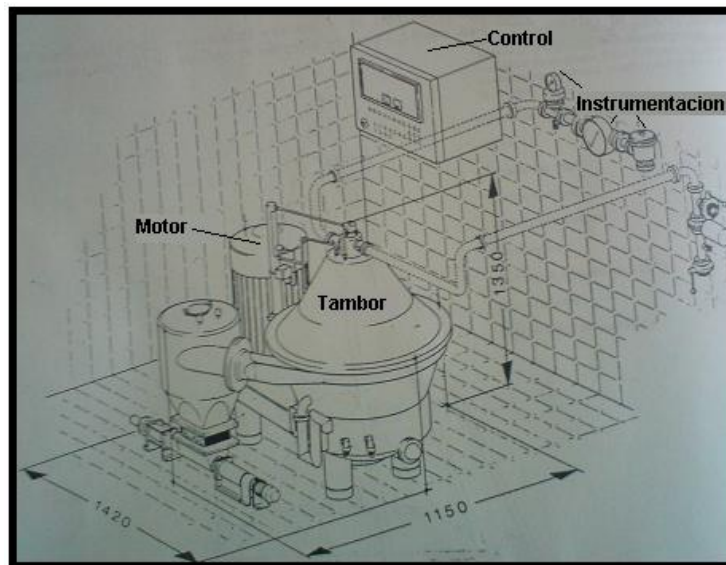
3.3 EXTRACCIÓN

Extracción de sólidos solubles: el café tostado y molido se carga en columnas precoladoras, por las que circula agua caliente bajo condiciones controladas de temperatura y presión.

3.4 CLARIFICACIÓN

Las clarificadoras o centrífugas son equipos que se utilizan para separar mezclas de líquidos o para eliminar sólidos contenidos en suspensión. Este proceso en general lo podemos ver a continuación en la figura 31.

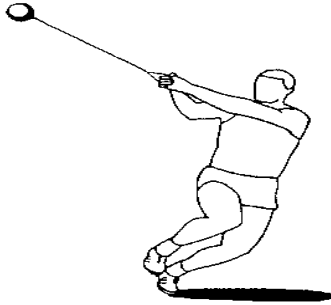
Figura 31. Clarificadora o Centrífuga



Fuente Manual Westfalia.

Al girar el tambor de una clarificadora se generan grandes fuerzas centrífugas al interior como se muestra en la siguiente figura.

Figura 32. Efecto de la fuerza centrífuga



Fuente Manual Westfalia.

Por acción de estas fuerzas, se logra en un tiempo muy breve la separación de los líquidos mezclados y/o la eliminación de los sólidos. Los componentes de mayor densidad se desplazan hacia la periferia del tambor, mientras que los de menor densidad se dirigen hacia el centro del mismo.

Para obtener estas fuerzas centrífugas considerable se imprime gran velocidad al tambor. Las altas velocidades de rotación permiten obtener una alta eficiencia, pero además, someten al material de la centrífuga a grandes esfuerzos.

La velocidad de rotación del tambor es una magnitud importante para el diseño de la centrífuga. La velocidad de rotación depende de las propiedades químicas y físicas del producto a centrifugar, tales como:

- Temperatura (si es superior a 100°C o inferior a 0°C)
- Densidad de los componentes líquidos y sólidos
- Agresividad en cuanto a corrosión y erosión se refiere (condiciona la elección del material del tambor)

Conociendo estos factores, se determina la velocidad de rotación del tambor atendiendo a la suficiente seguridad.

3.5 CONCENTRACIÓN

Con el fin de incrementar la concentración del extracto diluido, se utiliza la técnica de concentración para garantizar un incremento en la proporción de los sólidos solubles en el extracto, produciendo el extracto concentrado.

3.6 CONGELACIÓN

El extracto espumado es llevado a un cuarto frío y servido sobre una superficie refrigerada, donde se congela a muy bajas temperaturas.

3.7 LIOFILIZACIÓN

El extracto congelado granulado y clasificado es cargado en recipientes y llevado a las cámaras o túneles de liofilización, en donde por medio de calentamiento y vacío, se sublima el hielo, obteniendo un producto seco, con un pequeño porcentaje de agua residual.

3.8 EMPAQUE GRANEL Y FRASCOS

Buencafé solo empaca producto que cumpla con las especificaciones de calidad. Éste se empaca a granel o, de acuerdo a los requerimientos de los clientes, en frascos y bolsas, y es despachado luego a los diferentes mercados del mundo. Buencafé se caracteriza por su prueba de taza consistente, equilibrada, excelente aroma y sabor.

4. MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo y cumplimiento de nuestros objetivos se hace necesario el empleo de una metodología que establezca una serie de pasos y procedimientos efectivos fundamentados en la medición y análisis de la vibración dentro del mantenimiento predictivo.

El desarrollo de este trabajo nos permite cimentar las bases que sirven como guía para futuros análisis de este tipo, ya que, en la actualidad no se cuenta con sistemas desarrollados en Buencafé Liofilizado de Colombia que conlleven a la práctica del mejoramiento del mantenimiento predictivo.

4.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO

Este tal vez fue uno de los factores determinantes que intervino en la escogencia del proyecto y el equipo a analizar, ya que, los altos costos de mantenimiento en las intervenciones técnicas que requieren estos equipos, impactan de manera drástica los presupuestos que se destinan para dichos equipos. Las clarificadoras de extracto líquido de café son tal vez algunos de los equipos con más costos

tanto en la adquisición como en la ejecución de su mantenimiento.

Utilizando el *software SAP (Systeme, Anwendungen und Produkte)* sistemas, aplicaciones y productos se filtran las órdenes de trabajos de mantenimiento de los últimos dos años y observamos que el costo de estas intervenciones superaba los 200 millones de pesos colombianos, teniendo en cuenta que son 3 equipos idénticos, pero que no deja de sorprender la elevada suma que cuesta el sostenimiento de dichos equipos.

Se realizó además un cuadro comparativo extraído de *SAP* donde se relacionó el tipo de mantenimiento (correctivo, preventivo) y las cantidades de intervenciones realizadas en este período analizado, alrededor de 170; todo lo anterior dio como resultado que es un equipo bastante interesante para aplicar en cuanto a costos se refiere.

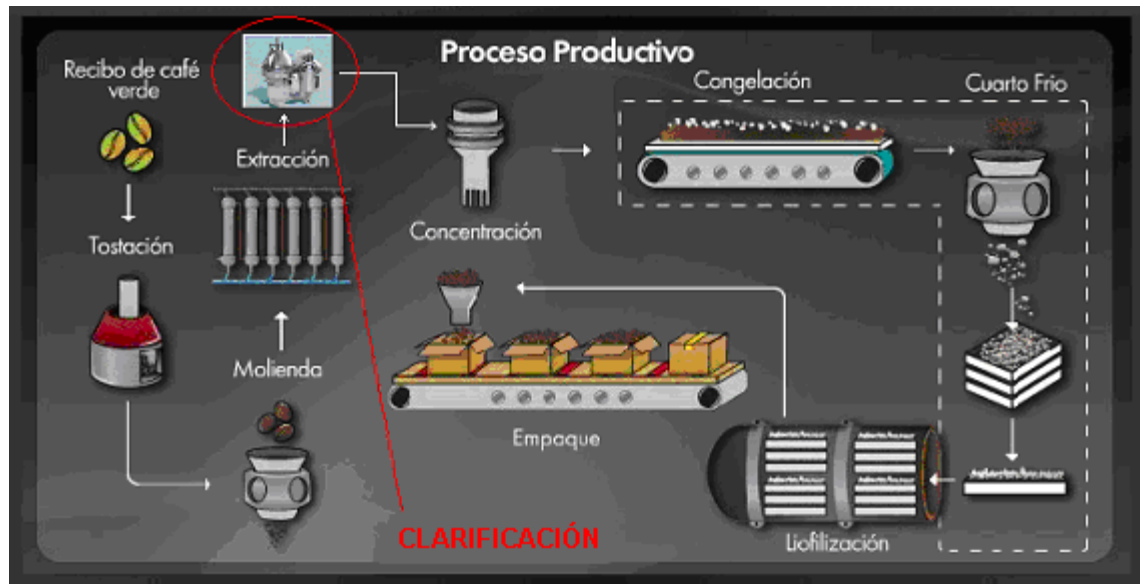
Figura 33. Costos Mantenimiento Clarificadoras Desde 2010

Aviso	Orden	Cl.	Inic.extr.	Texto breve	Costes tot.reales
10137149	50045533	PM01	15.02.2010	CAMBIAR BOMBA CLARIFICADORA 1	157,901
10137820	50045703	PM01	21.02.2010	CLARIFICADORA 3 PEGADA SIN CORREA	2,118,292
10139351	50046430	PM01	06.03.2010	CELDA DE CARGA TQ LODOS DESCALIBRADA	32,340
10140572	50046763	PM01	17.03.2010	REVISAR TRANSMISOR PESO TQ LODOS	234,462
10137772	50045776	PM01	20.03.2010	SE PEGA CLARIFICADORA 3	629,771
10140997	50046956	PM01	23.03.2010	revisar clarificadora 2	2,017,850
10141025	50047039	PM01		TQ CLARIFICADO 1 DESCALIBRADO	32,340
10141101	50047157	PM01		revisar sonda de nivel tq clarificado 2	32,340
10141184	50047160	PM01		TERMOCUPLA TO D DESCALIBRADA	32,340
10142401	50047402	PM01	05.04.2010	REVISAR CLARIFICADORA 3	2,397,819
10142751	50047722	PM01	07.04.2010	CALIBRAR TQ CLARIFICADO 1	36,465
10141998	50047644	PM01	11.04.2010	CALIBRAR TQ DE CLARIFICADO 1	18,232
10143476	50047926	PM01	14.04.2010	revisar transmisor de nivel tap 1	32,400
10144157	50048136	PM01	21.04.2010	CLARIFICADORA 1 CON ESCAPE DE PRODUCTO	36,465
10143414	50047944	PM01	27.04.2010	AGITADOR TANQUE DE SODA DISPARADO	405,281
10144844	50048399	PM01	28.04.2010	REVISION CLARIFICADORA 3	38,362
10138896	50046192	PM01	04.05.2010	habilitar trasiego tanques de almacenami	582,208
10145353	50048431	PM01		TANQUE D DESAJUSTADO	0
10146080	50048651	PM01	11.05.2010	REALIZAR MITTO. A CLARIFICADORA 1	833,511
10146942	50048984	PM01	21.05.2010	REVISAR CLARIFICADORA 3	723,728
10145648	50048550	PM01	28.05.2010	REVISAR CLARIFICADORA 1 RUIDO	952,067
10146549	50048832	PM01	29.05.2010	AGITADOR TQ DE LODOS NO PRENDE	251,894
10148314	50049427	PM01	02.06.2010	REVISAR CLARIFICADORA 2	1,948,883
10148343	50049479	PM01		RECONOCER CLARIFICADORA 2	148,899
10149139	50049607	PM01	10.06.2010	REPARAR REDUCTOR RELEVO TQ LODOS CLA	537,929
10149184	50049665	PM01	11.06.2010	AGITADOR DEL TQ C DESACOPLADO	210,204
10149541	50049741	PM01	15.06.2010	CALIBRAR TQ CLARIFICADO 2 A 0	39,853
10149886	50049859	PM01	18.06.2010	REVISAR CLARIFICADORA 2	2,469,007
10149856	50049864	PM01		CAMBIO DE SENSOR CUENTA REVOLUCIONES	546,915
10149857	50049866	PM02		CAMBIO ELECTROV MANIOBRA CLARIFIC 1	3,560,351
10150306	50049966	PM02	21.06.2010	Instalac Electricas Trans Flujo Clarif3	271,410
10150824	50050125	PM01	25.06.2010	MANEJO DE EXTRACTO FUERA DE LINEA	29,740
10148930	50049561	PM01	28.06.2010	LUBRICAR CLARIFICADORA 2	39,853

Fuente Propia SAP Buencafé.

4.2 ANÁLISIS DEL PROCESO

Figura 34. La Clarificación dentro del proceso productivo



Fuente www.buencafe.com.

Partiendo de la figura 34 se observa que el proceso de clarificado se encuentra en una de las zonas donde la demanda de extracto líquido es alta. En este lugar se encuentran 3 clarificadoras con una capacidad de procesamiento de 5.500 L/h cada una. Por procesos anteriores estos equipos deben recibir unos 15.000 L/h de extracto diluido (Sólidos en suspensión) y entregar unos 13.500 L/h a procesos posteriores. Podemos observar que la producción de esta área es bastante grande y que si falta uno de estos equipos la merma de producción es notoria.

Si se efectúa un cálculo rápido una clarificadora para aproximadamente 30 horas para efectuar un mantenimiento correctivo por parte del área técnica. Si multiplicamos $5.500 \text{ L/h} * 30\text{h} = 165.000$ litros que se dejan de producir por uno de estos equipos, si se aplicaran factores de conversión en cuanto al valor de producir un litro de este extracto las sumas monetarias en cuanto a pérdidas serían bastante grandes. Es por esto que los paros deben de ser planeados y no intempestivos para que el impacto se minimice. Este es otro factor decisivo para la implementación de un modelo predictivo en este equipo.

4.3 SELECCIÓN DEL EQUIPO

Estos estudios anteriores arrojaron resultados interesantes sobre los cuales se dirigió la selección del equipo al cual se realizó y aplicó el **sistema de monitoreo de vibraciones en un equipo rotativo** específicamente a una de estas clarificadoras de tan vital importancia dentro del proceso productivo y su costo activo. Fue así como el equipo elegido fue la **Clarificadora 1** del área de manejo de extracto diluido dentro del proceso de Clarificación.

4.3.1 Descripción del Equipo

Clarificadora de separación de sólidos en suspensión de un líquido con una capacidad y rendimiento de 7000 L/h aproximadamente, accionada por un motor trifásico especial de arranque pesado con conexión en estrella-triángulo y arranque prolongado.

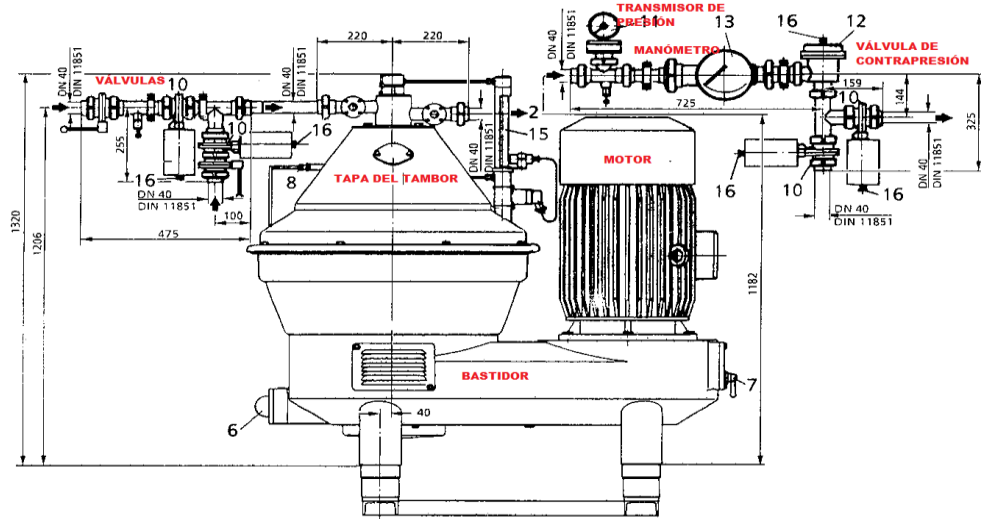
Tabla 1. Datos técnicos del equipo

Nombre	Clarificadora SC 35-36
Velocidad de Giro	7230 RMP
Accionamiento	Por banda
Sentido de giro	Horario
Motor	Potencia: 18.5 Kw
	Conexión: Estrella Triángulo
	Tensión: 440 V
	Tiempo de arranque: 7 min Aprox.
	Corriente de arranque: 1.8-2 x In
	Clase de aislamiento: H
	Frecuencia: 60 Hz
Revoluciones: 3600 RPM	
Agua de Maniobra	Presión: mín 2 Bar, máx 4 Bar Caudal: 7000 L/h
Calidad del aceite	Tipo: CLP 46 DIN ó CC 46 ISO
	Cantidad: 5 L
Programador	Tipo: PLC Logix 500

Fuente Manual Westfalia.

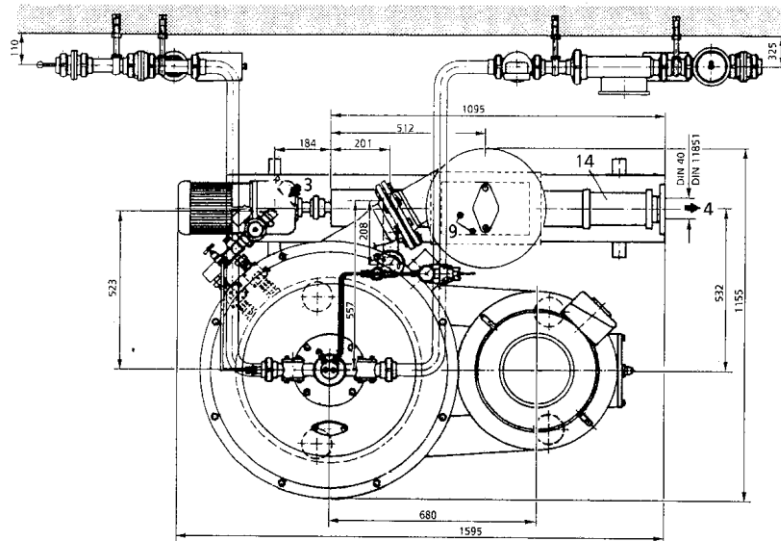
4.3.2 Partes y Dimensiones del equipo

Figura 35. Vista Alzado del equipo



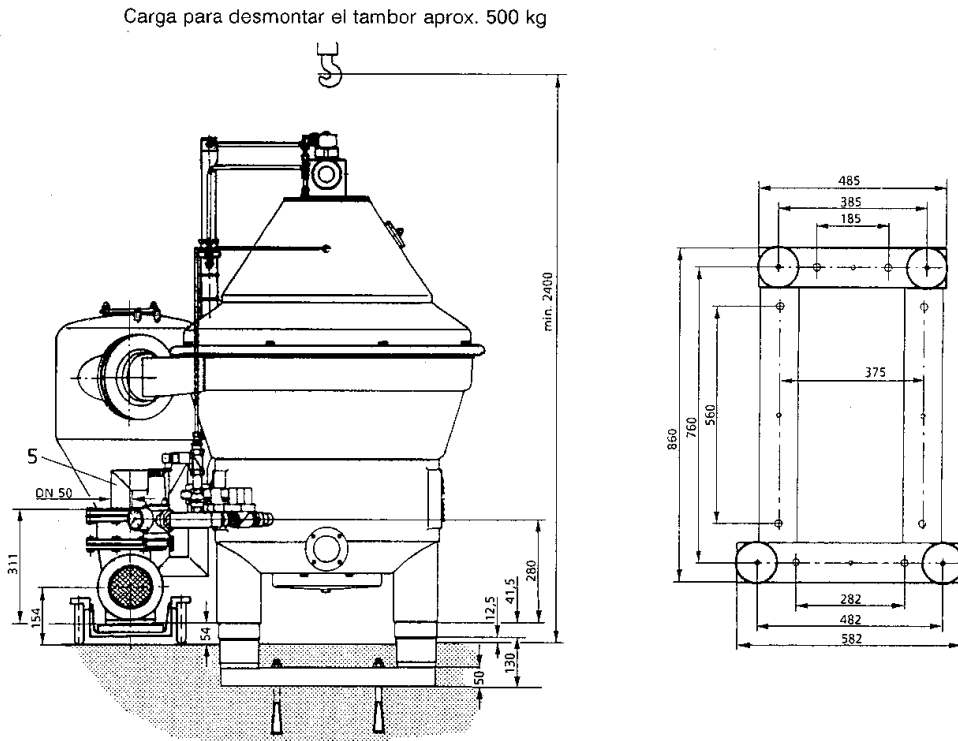
Fuente Manual Westfalia.

Figura 36. Vista en Planta del equipo



Fuente Manual Westfalia.

Figura 37. Vista Lateral Izquierdo del equipo



Fuente Manual Westfalia.

5. RESULTADOS

5.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE LECTURA, TOMA DE DATOS EN TIEMPO REAL E IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR

El diseño del sistema para la lectura y la toma de datos en tiempo real permitió indicar el funcionamiento de los elementos de un equipo rotativo de altas revoluciones llamado Clarificadora 1 del área de extracto diluido. El sistema en general cuenta con una serie de dispositivos y elementos propios de Buencafé Liofilizado de Colombia que integran el monitoreo de vibraciones al equipo en mención, estos equipos son:

Un **sensor** *Metrix* ST5484E que envía una señal analógica a un **PLC** *logix* 500 slc 5/03 con tarjeta de entradas analógicas 1746-NI4. Se cuenta con un **PC** *Lenovo* con sistema operativo *Windows xp* versión 2002, capacidad de disco de 144 GB, 2

GB de memoria Ram y este equipo tiene como nombre Tanques.buencafe.com dentro del dominio Buencafe.com; la comunicación PLC-SCADA es RS232 y la versión de la aplicación del **SCADA** de visualización es *Intouch 10*.

Figura 38. Supervisión en Planta



Fuente Propia.

5.1.1 Características del sensor.

Se utiliza para el montaje un sensor Metrix modelo ST5484E. Este elemento combina en un solo paquete sensor y acondicionador de señal, convirtiéndolo así en un transmisor de vibración.

Figura 39. Sensor Metrix



Fuente www.metrixvibration.com.

DATOS DE PLACA DEL SENSOR

Transmisor de vibración

Modelo ST5484E-121-020-00

0 a 1.0 [IPS] (Pulgadas por segundo) ó 25.4 [mm/s] = 4-20 [mA]

Frecuencia de respuesta 2 [Hz] a 1500 [Hz] - 3 [dB]

Alimentación V = 11-30 VDC

Carga R = 50(V-11) OHMS

Certificado a prueba de explosiones Clase I, GRP B, C, D; Clase II, GRP E,

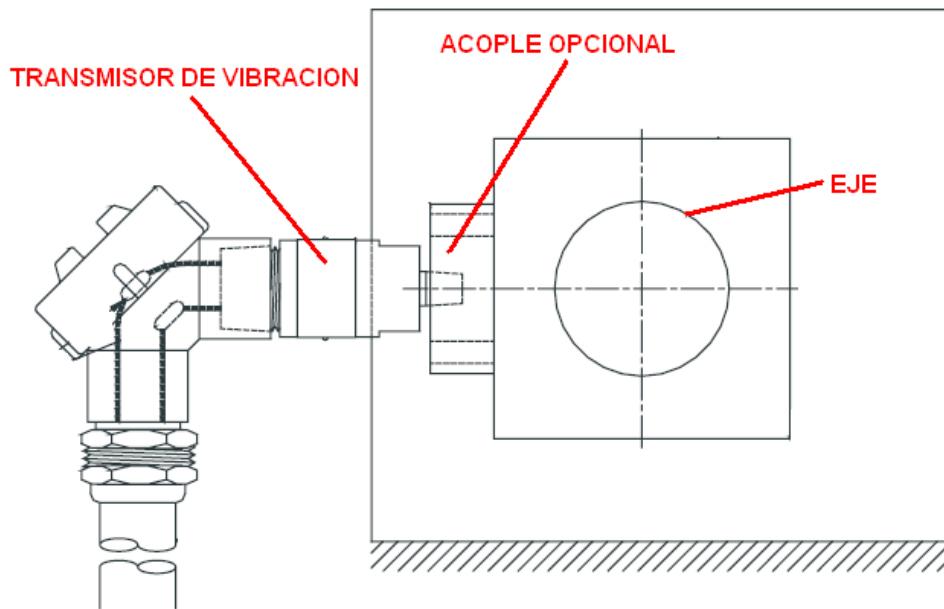
F,G

No requiere sello

Cero de verificación 4 mA +/- 0.1 mA
Span de verificación (Escala completa) 20 mA +/- 0.4 mA

5.1.2 Montaje típico sensor de vibración

Figura 40. Montaje típico sensor de vibración

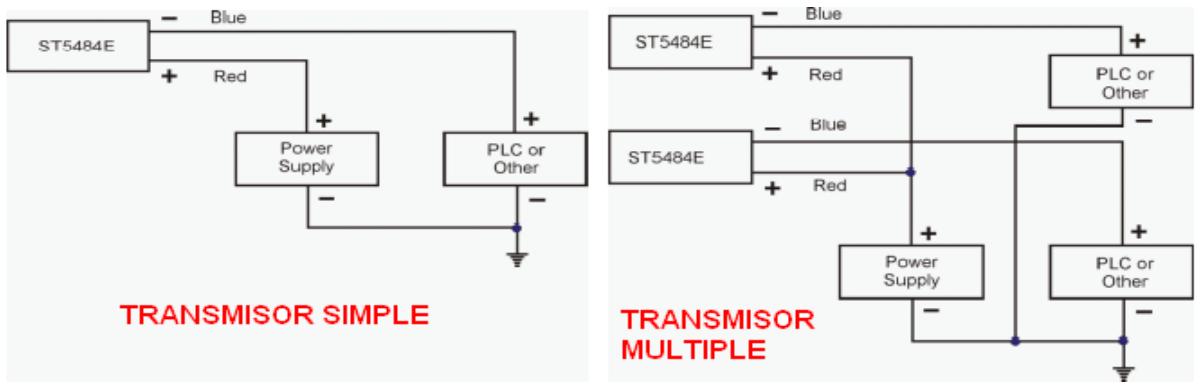


Fuente www.metrixvibration.com.

5.1.3 Circuito electrónico para montaje al plc del transmisor de vibración.

A continuación se muestra la figura de los circuitos electrónicos que se utilizan para montajes de transmisor simple y transmisores múltiples, es este caso se utilizará el simple.

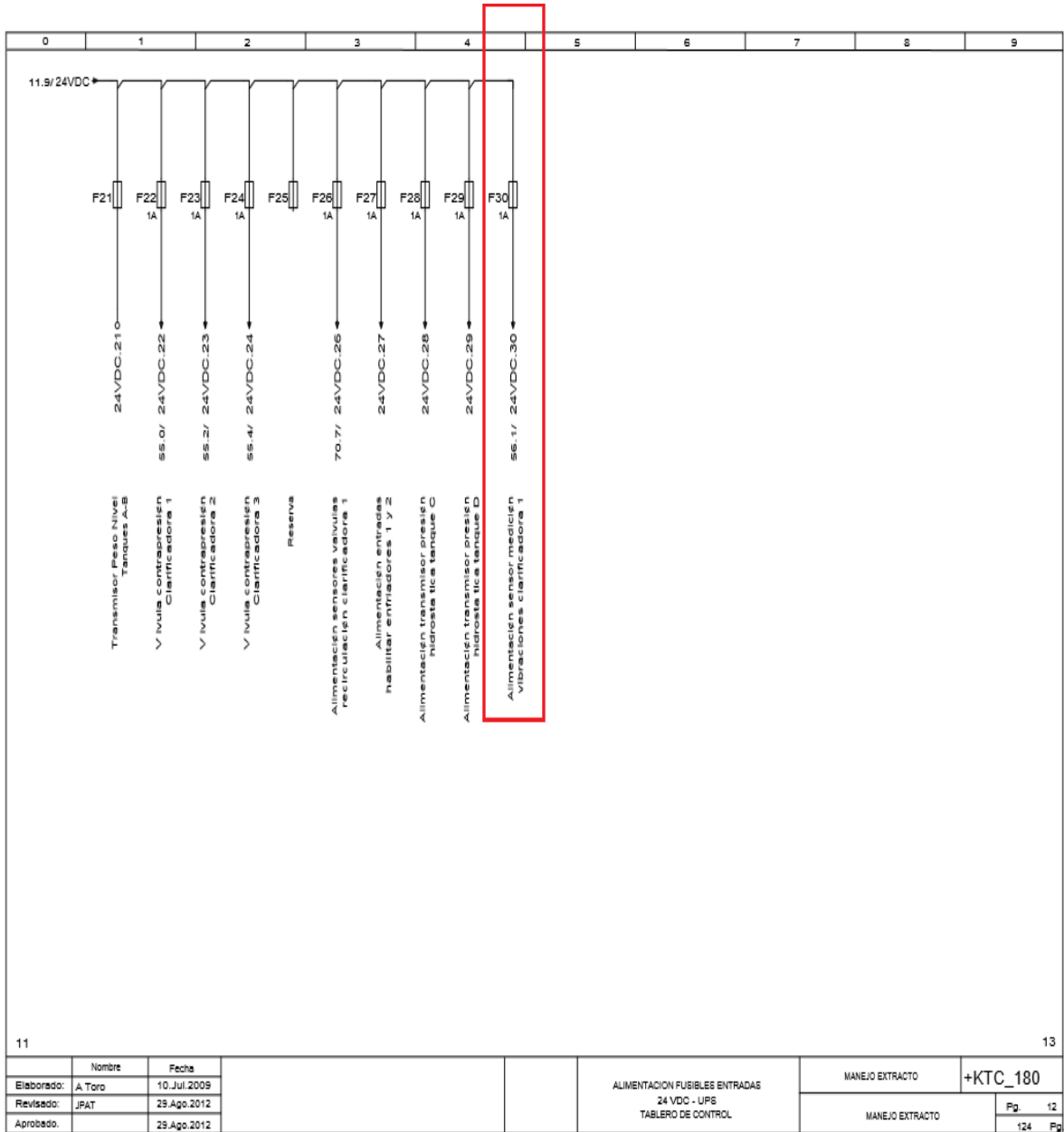
Figura 41. Montaje Electrónico



Fuente www.metrixvibration.com.

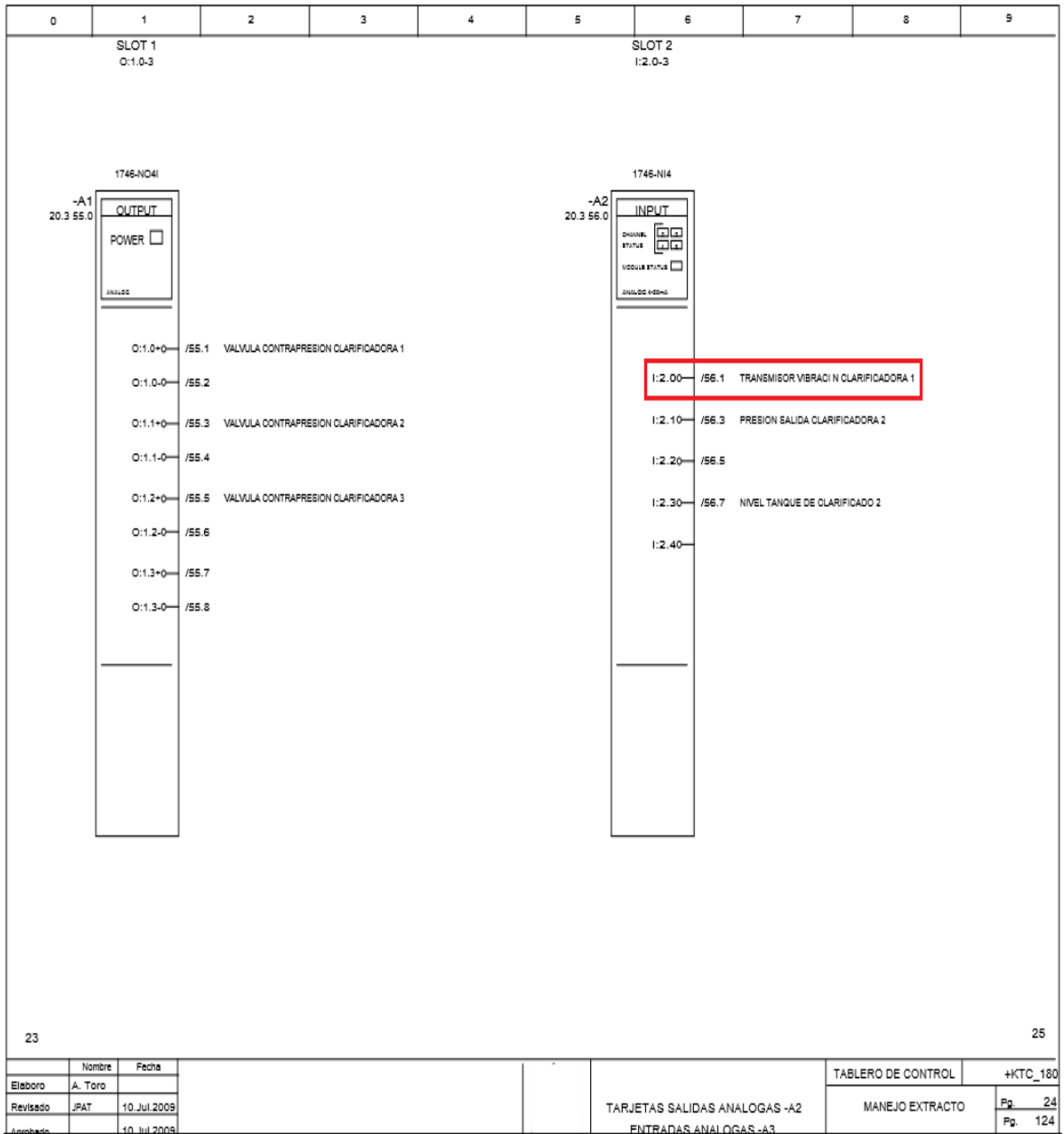
El circuito electrónico es alimentado a 24 VDC y protegido con un fusible de 30 mA, el *spot* del PLC es el -A2 I:2.0 IN 0 y se modifica el archivo en los planos del *software Eplan* diluido páginas 12 y 56.1, este *software* es el utilizado por Buencafé Liofilizado de Colombia para el histórico en cuanto archivo de planos electrónicos. Los planos se muestran a continuación en las figuras 42, 43 y 44.

Figura 42. Alimentación Fusibles entradas 24 VDC - UPS



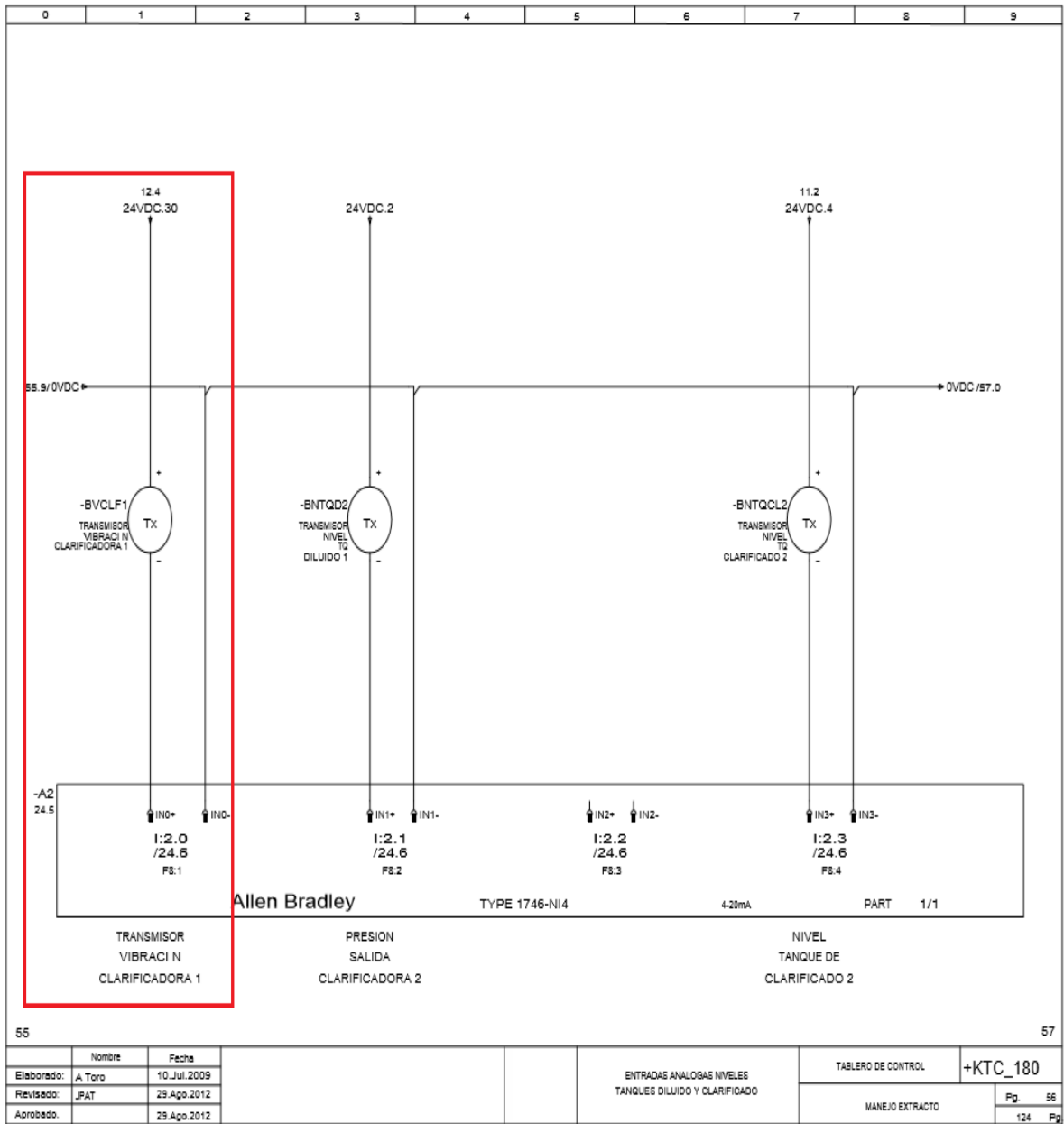
Fuente Planos Eplan Buencafé Liofilizado de Colombia.

Figura 43. Tarjeta salidas análogas PLC



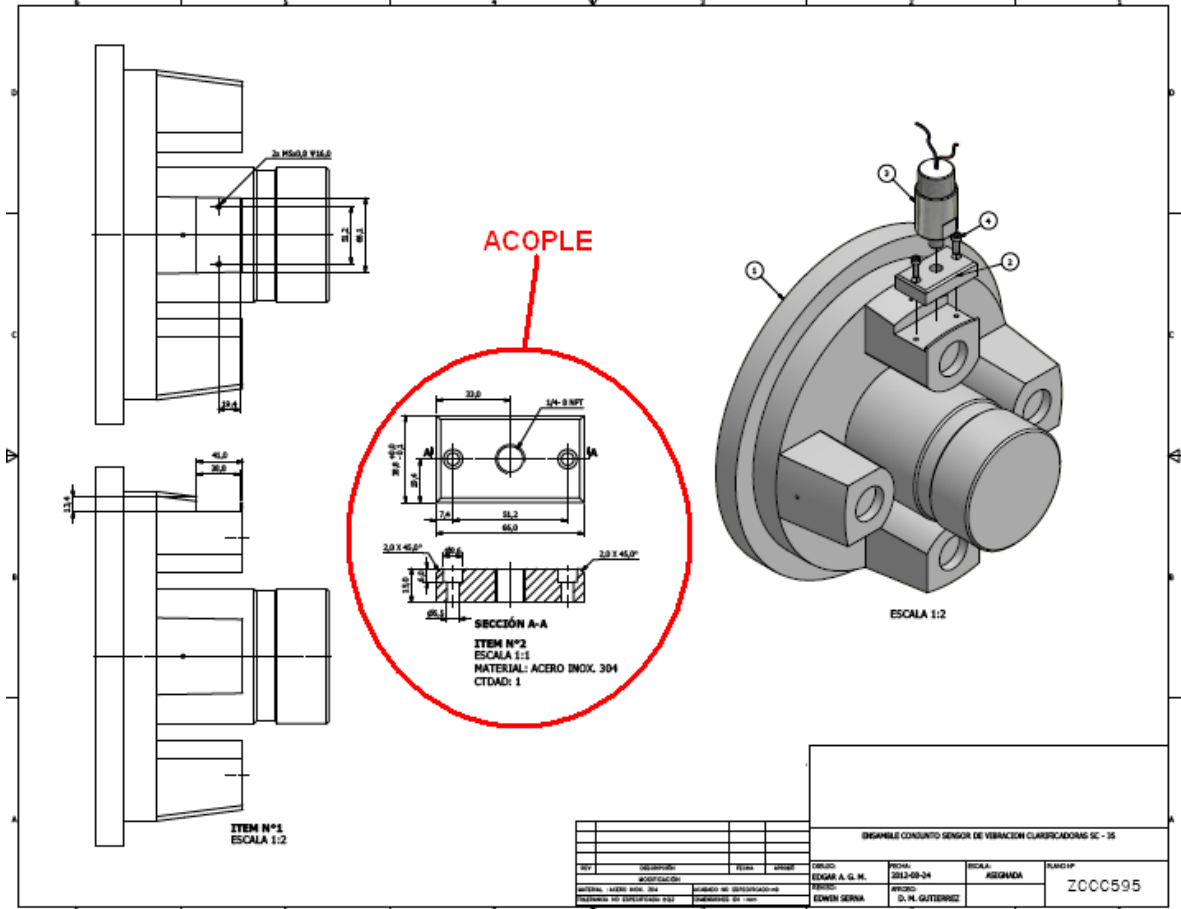
Fuente Planos Eplan Buencafé Liofilizado de Colombia.

Figura 44. Conexión transmisor de vibración



Fuente Planos Eplan Buencafé Liofilizado de Colombia.

Figura 45. Ensamble conjunto sensor vibración clarificadora 1

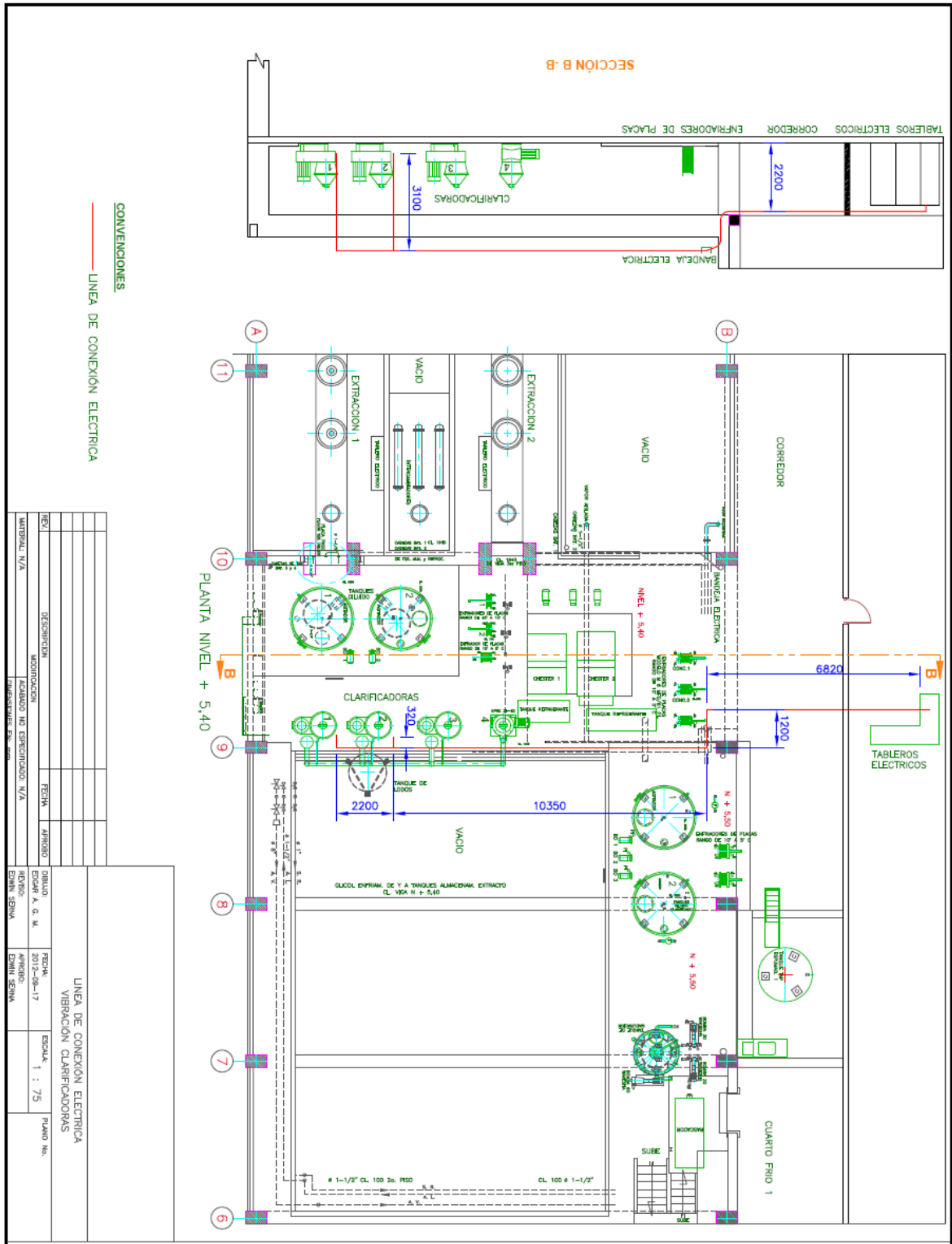


Fuente Plano *Inventor* Buencafé Liofilizado de Colombia.

5.1.4 Esquema Eléctrico.

Para este montaje es necesario tener la ubicación exacta en planta del equipo, en este caso clarificadora 1. Se acude a marcar la línea eléctrica en un plano existente en *Autocad 2010* de Buencafé Liofilizado de Colombia que permita tener claras todas las distancias del equipo a la fuente de voltaje y el tablero del PLC. Figura 83.

Figura 46. Línea conexión eléctrica vibración clarificadora 1



Fuente Planos Autocad Buencafé Liofilizado de Colombia.

El plano anterior permite conocer la longitud del cable. El cable que se utiliza y se recomienda para este tipo de sistemas donde se manejan bajas corrientes y no se quieren interferencias por ruido es el **apantallado 2 x 18 AWG**. Este cable es conducido hacia el tablero de control +KTC-180 a través de tubería *conduit* de ½” de la misma longitud del cable, cabe aclarar que esta línea de tubería ya existía en el campo y contiene otra línea de sensado.

Tabla 2. Datos Técnicos Cable Apantallado 2 x 18 AWG

American Wire Gauge AWG	18
Apantallado/No apantallado	Apantallado
Color de la Funda	Gris
Diámetro Externo	4.2mm
Filamentos del Núcleo	7\26
Forma del Cable	Multiconductor
Hilo de Drenaje	Sí
Longitud del Carrete	100m
Material Conductor	Cobre
Material de Aislamiento	Polietileno (PE)
Material de la Funda	Baja Emisión de Humos, Libre de Halógenos (LSZH)
Máxima Temperatura de funcionamiento	+70°C
Número de Hilos	7
Número de Núcleos	2
Tamaño de los Hilos	26 AWG
Tensión Nominal	300 V
Tipo de Pantalla	Lámina Auminio/Poliéster
Área Transversal	0,82 mm ²

Fuente www.es.rs-online.com.

5.2 PRUEBAS Y MANTENIMIENTO A EQUIPO PILOTO, PREVIO A LA IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR

Luego de conocer una serie de parámetros del equipo seleccionado, como el lugar que ocupa en el proceso, denominación, capacidades, dimensiones, costos de mantenimiento, entre otros, procedemos a estudiar y montar los elementos que hacen parte del sensado, procesamiento y registro de la señal de vibración, conexión eléctrica y los preparativos de la máquina para instalación mecánica del sistema.

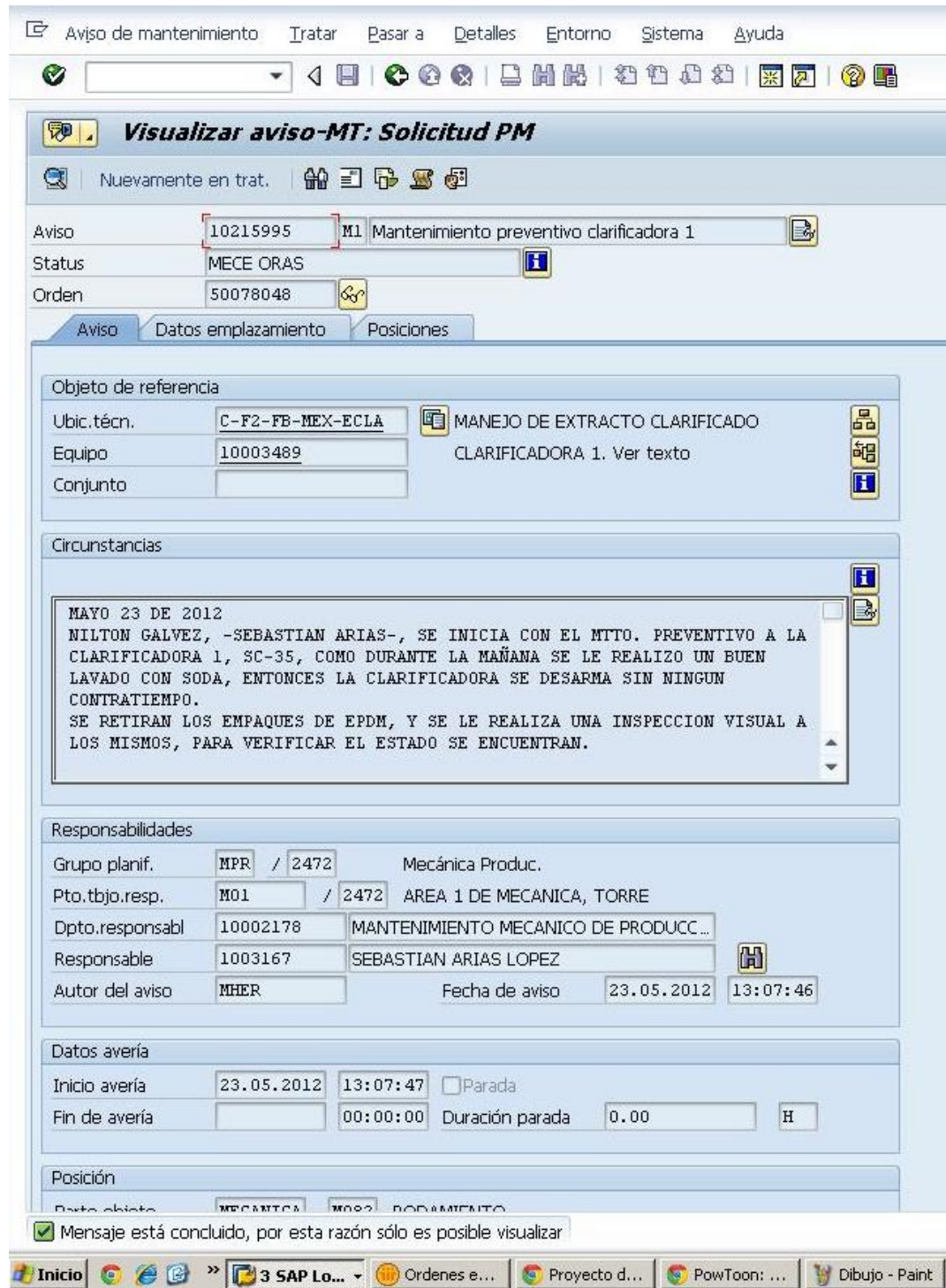
5.2.1 Mantenimiento General de la clarificadora.

Se convierte de vital importancia retornar la máquina a condiciones iniciales óptimas de funcionamiento, para esto es necesario realizar al equipo un mantenimiento general que garantice que la toma de datos con el nuevo sistema de monitoreo de la vibración sea confiable y efectivo.

Con los técnicos mecánicos de Buencafé se programó un mantenimiento el cual incluía un desmontaje de todas las piezas, una limpieza general a las mismas, recambio de los elementos de desgaste y rodadura, cambio de soportes y amortiguadores cedidos, lubricación, funcionamiento de válvulas de entrada y salida de producto, válvulas de maniobra hidráulica de la clarificadora, entre otras.

Toda la intervención quedó registrada en el *software* correspondiente de mantenimiento de Buencafé “*SAP*” con su orden de trabajo donde quedaron consignadas todas estas actividades que se realizaron en el equipo.

Figura 47. Orden de mantenimiento general

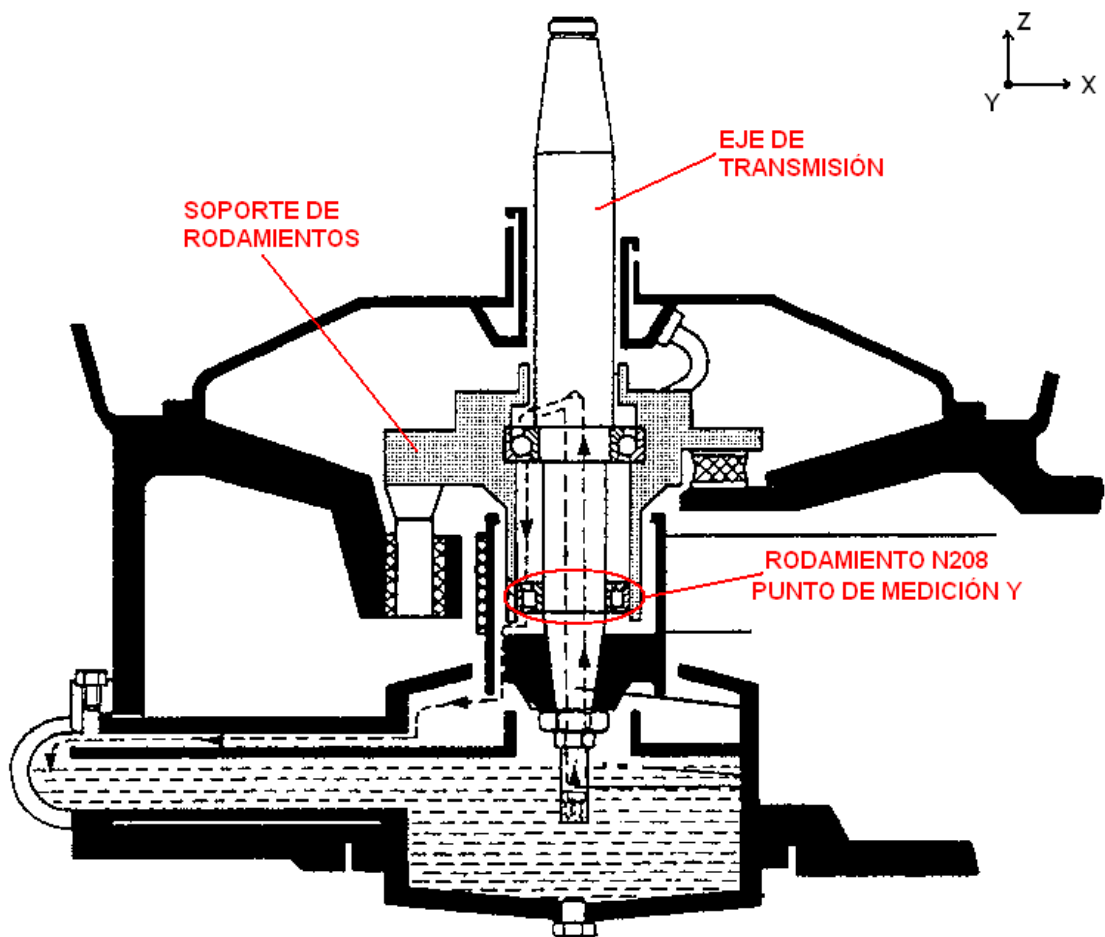


Fuente propia SAP Buencafe.

5.2.2 Montaje mecánico.

Con la ayuda de los técnicos mecánicos de Buencafé Liofilizado de Colombia, se ve oportuna la intervención de la Clarificadora 1 para realizarse en esta un mantenimiento preventivo, y se discute el punto más conveniente donde debe quedar el dispositivo (sensor) para el registro de vibración. Se elige como punto de medición, luego de estudiar el manual de despiece mecánico del equipo, un lugar del soporte de un rodamiento de carga radial pura (Rodamiento N208) y ubicar la medición en el mismo sentido de carga de este; siendo el punto un de los dos lugares de apoyo del eje de transmisión de la máquina (ver Figura 48).

Figura 48. Soporte eje del tambor Clarificadora

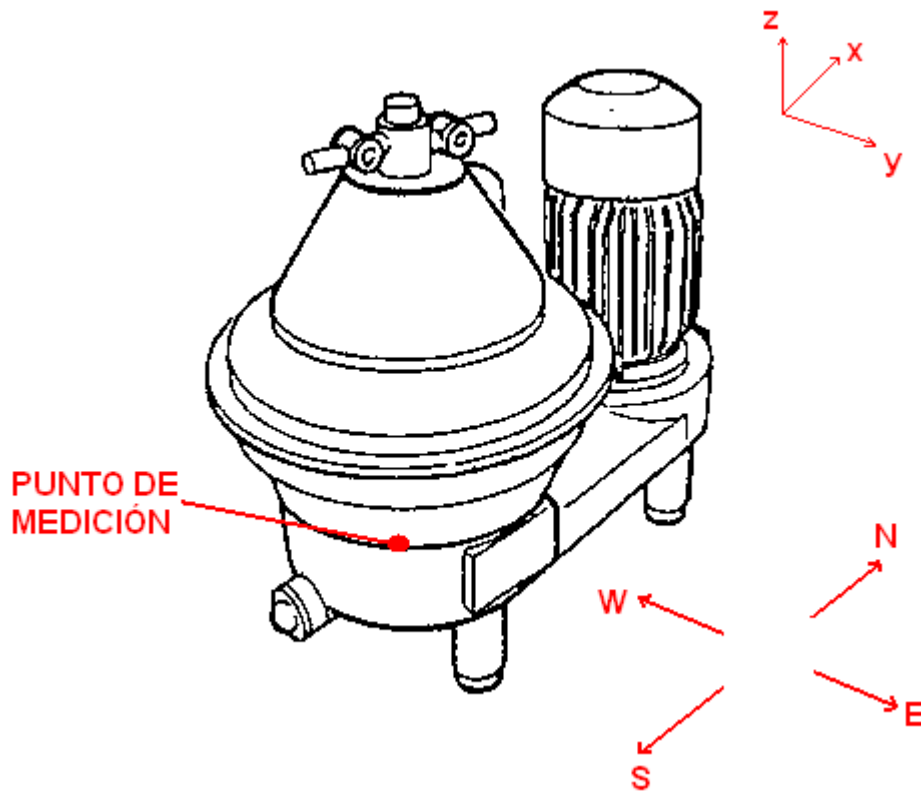


Fuente Manual Westfalia.

Es de anotar que el punto de medición está ubicado en el plano X-Y en el sentido oriente a occidente con respecto a la ubicación del equipo en planta,

convirtiéndose así en una magnitud unidimensional al no tener disponibilidad sino de un solo sensor (ver Figura 49).

Figura 49. Orientación punto de medición



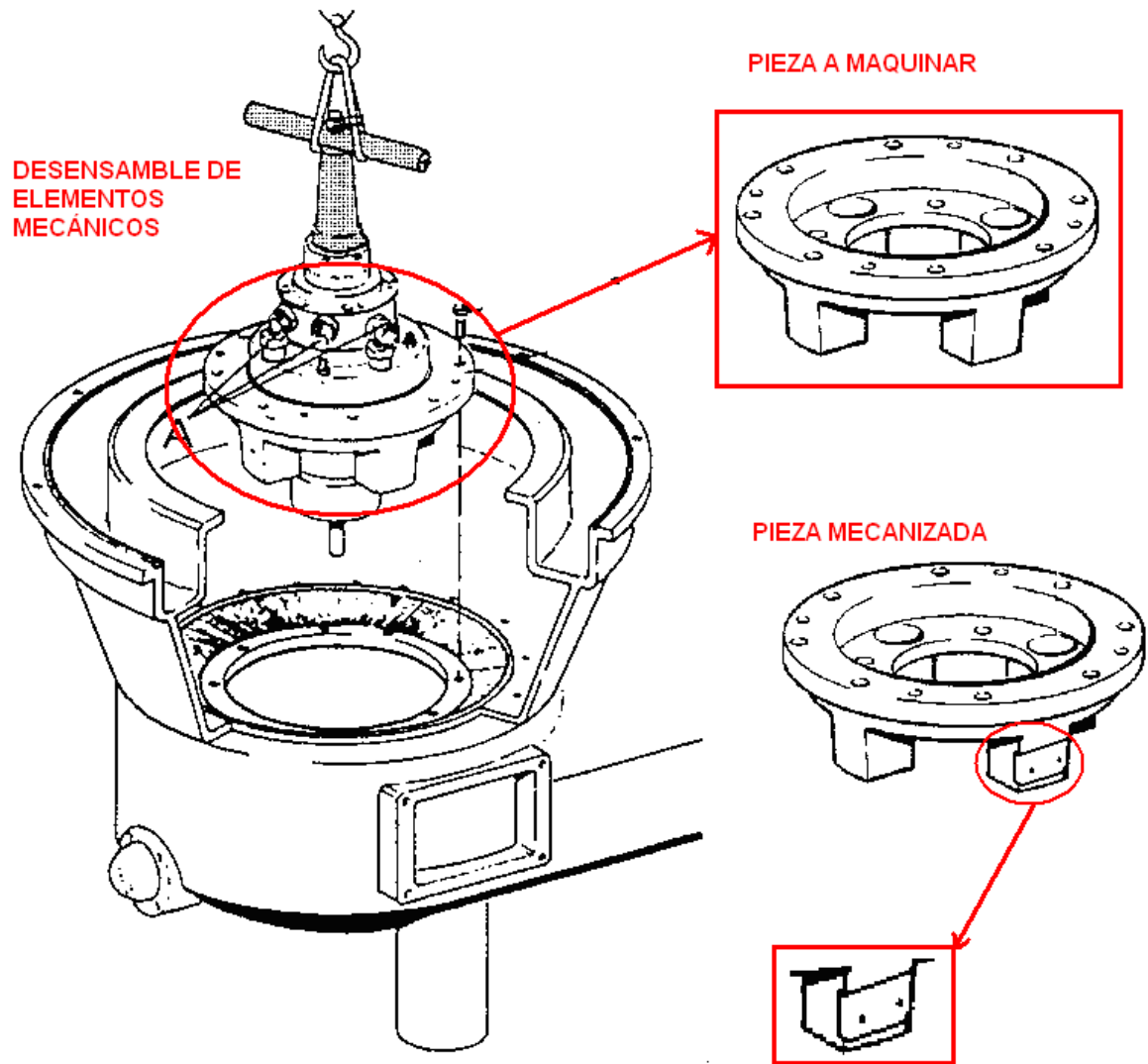
Fuente Manual Westfalia.

Con el punto de medición establecido, en conjunto con los técnicos mecánicos se inicia el despiece del equipo para llegar al punto donde debe ubicarse el sensor y así iniciar con el maquinado de las partes, sin alterar estructural y estéticamente la zona de posicionamiento del transductor.

Teniendo el soporte del rodamiento en el banco mecánico se hace un levantamiento de planos para pasar los elementos en el sector de mecanizado.

Con la ayuda de las máquinas herramientas (Torno, fresadora, taladro de árbol, entre otras) se ejecutan los trabajos de cepillado de la cara plana del soporte donde estará ubicado un acople para el montaje del sensor. Este acople se fabrica bajo las especificaciones y recomendaciones del fabricante del transmisor. A continuación se muestra en la figura 51 el resultado de la operación.

Figura 50. Desensamblaje de Pieza a Mecanizar



Fuente Propia.

Se dibuja el plano en *Inventor* 2010 como *software* de diseño mecánico de Buencafé Liofilizado de Colombia con las respectivas modificaciones a la pieza que contiene el sensor de vibración y se da el respectivo consecutivo en el historial de archivos en los planos mecánicos de Buencafé. Figura 45.

Figura 51. Imágenes de Implementación.

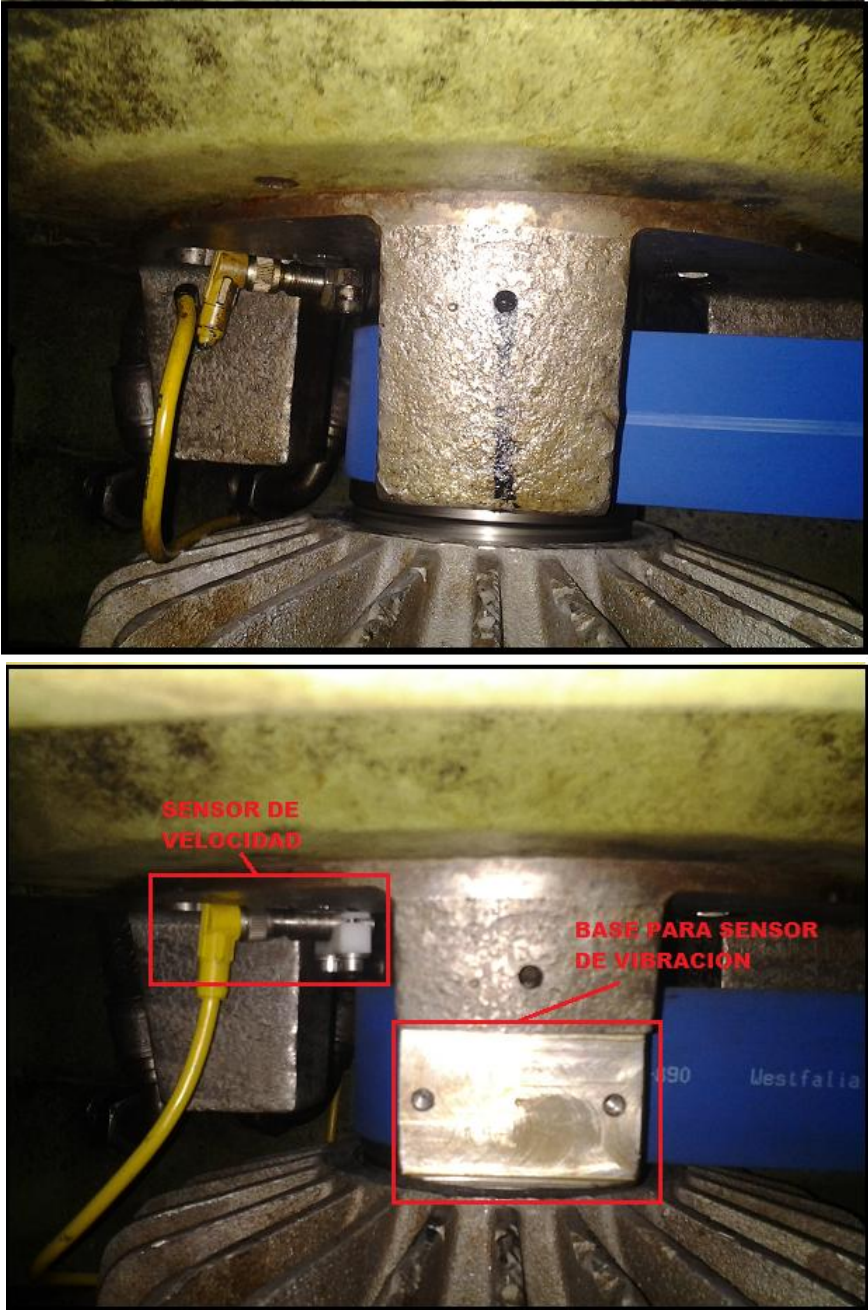
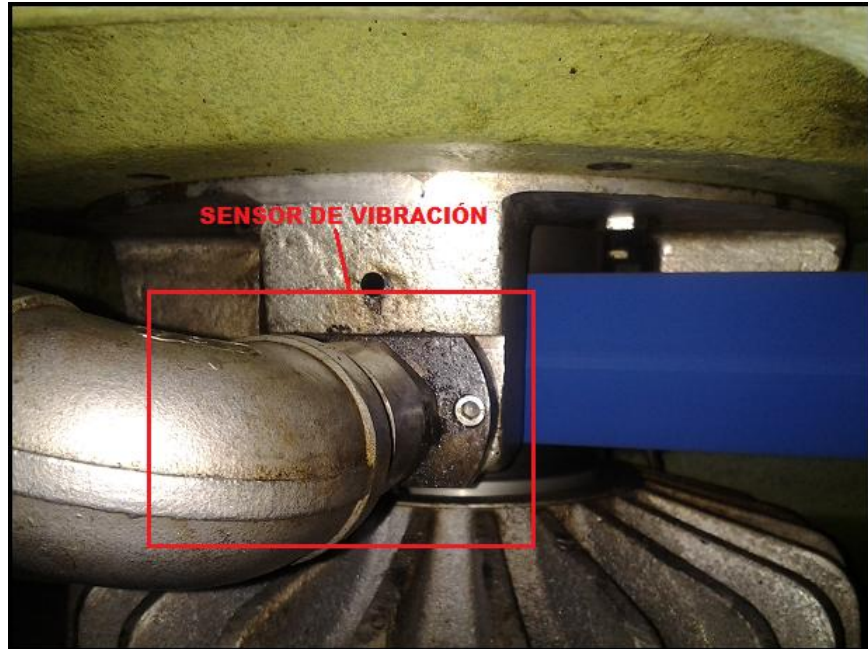


Figura 51. (Continuación)



Fuente Propia.

5.3 PANEL DE VISUALIZACION EMPLEANDO EL SOFTWARE IN TOUCH

La presentación en el panel de visualización (monitor existente en un cuarto de operación) utilizando el software In Touch permitió tener la disponibilidad de las gráficas y el historial del equipo de clarificación 1, en donde quedaron registrados aquellos eventos de funcionamiento, frecuencias, sobrecargas, entre otros.

Para registrar los cambios en cuanto al diseño y la pantalla de supervisión *HMI* (*Human Machine Interface*) e incorporar la nueva programación en cuanto al monitoreo de vibraciones es necesario acudir al equipo INGE40.BUENCAFE.COM dominio Buencafé ubicado en el área de Ingeniería de Buencafé Liofilizado de Colombia.

Este equipo se encuentra disponible para trabajar en el *SCADA*, licenciado con la versión 2007 de *In Touch Application Manager*.

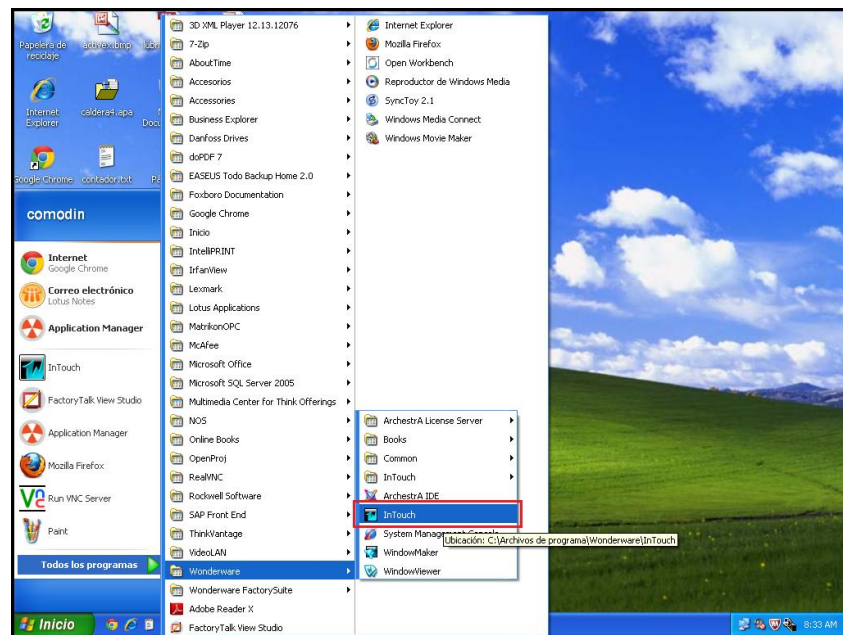
A continuación se describe el procedimiento para realizar el cambio en la pantalla adecuada donde quedará la nueva aplicación; es de anotar que solo se modificará

parcialmente un diseño existente de una aplicación en planta, donde quedará incluido toda la medición y monitoreo de la vibración.

Es importante trabajar la resolución en esta modificación igual a la resolución de la pantalla del equipo en planta donde se encuentra instalada esta aplicación, para este caso es de 1024 x 768 pixeles.

En la parte inferior izquierda en la pantalla se da clic en Inicio, todos los programas, *Wonderware*, *InTouch* como se muestra a continuación en la figura 53.

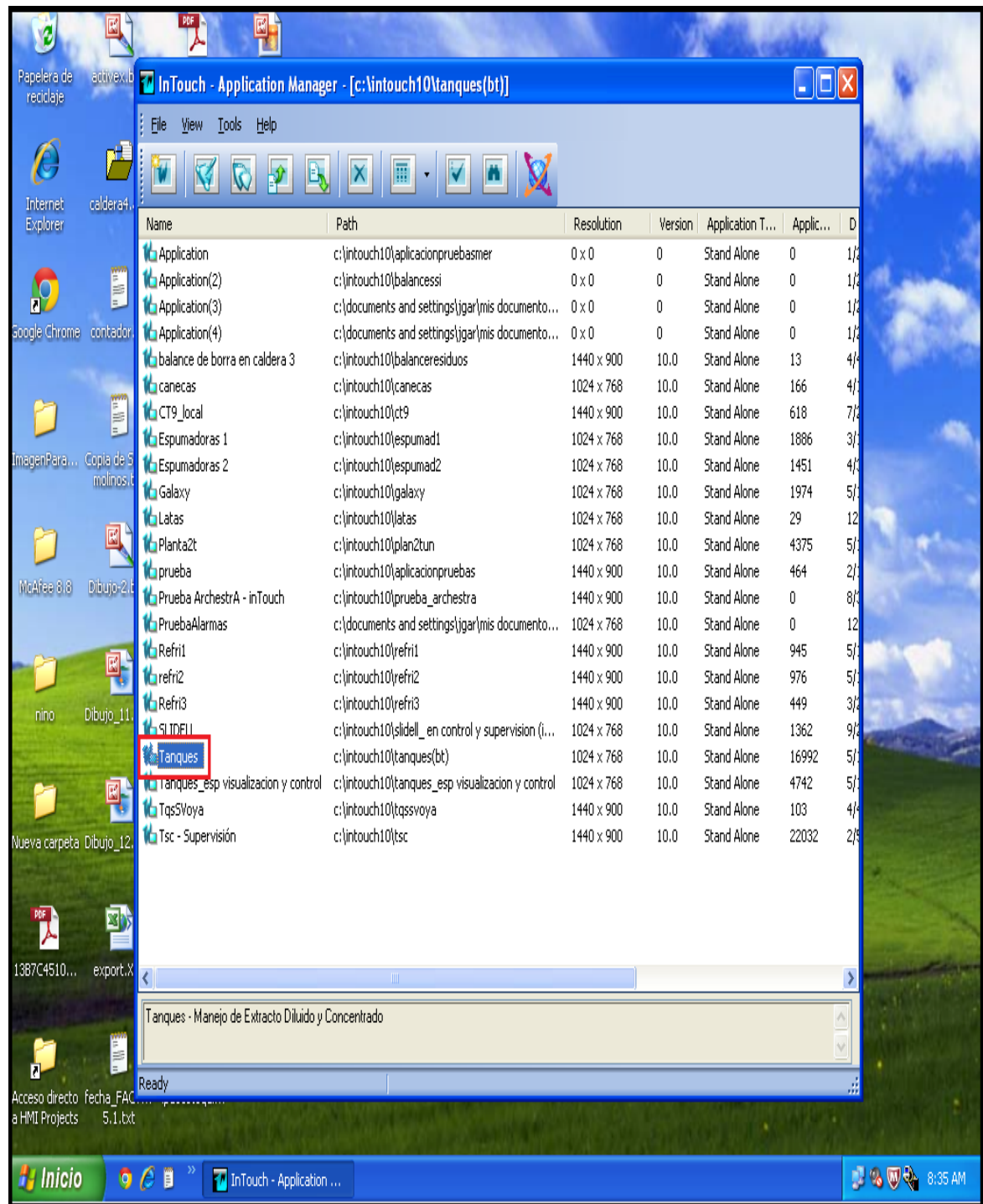
Figura 52. Menú de inicio SCADA



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

Inmediatamente se abre la ventana donde se encuentra la aplicación que se debe modificar, en este caso se da un *clic* a tanques, aquí también aparece el *PLC* de campo y la resolución de la pantalla en la cual fue diseñada toda la interfaz. Ver figura 53.

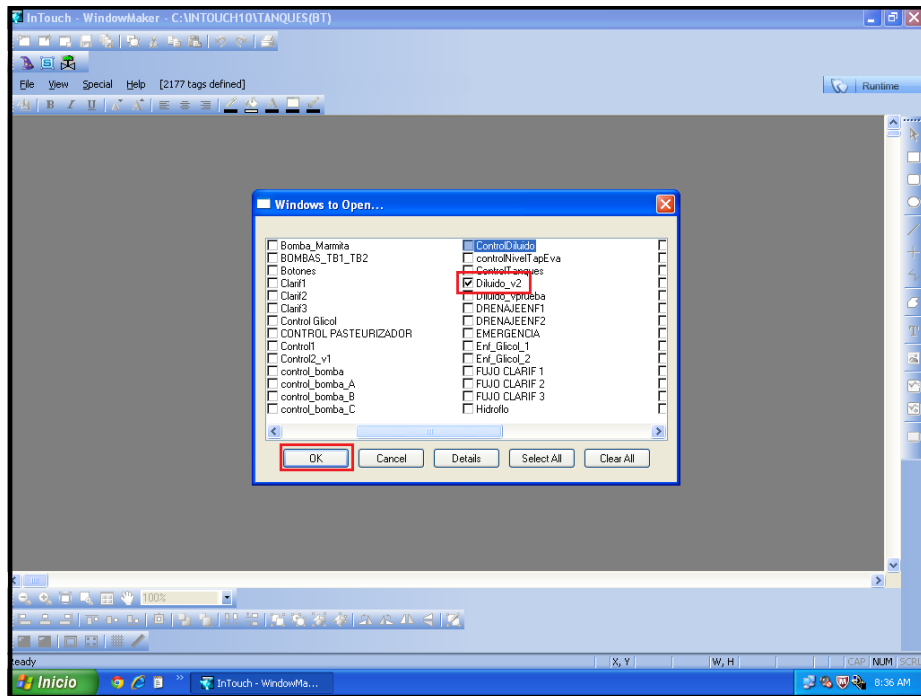
Figura 53. Selección del PLC



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

Cuando se da clic en tanques se abre una ventana de diálogo donde se selecciona Diluido_v2 y clic en OK. Figura 54.

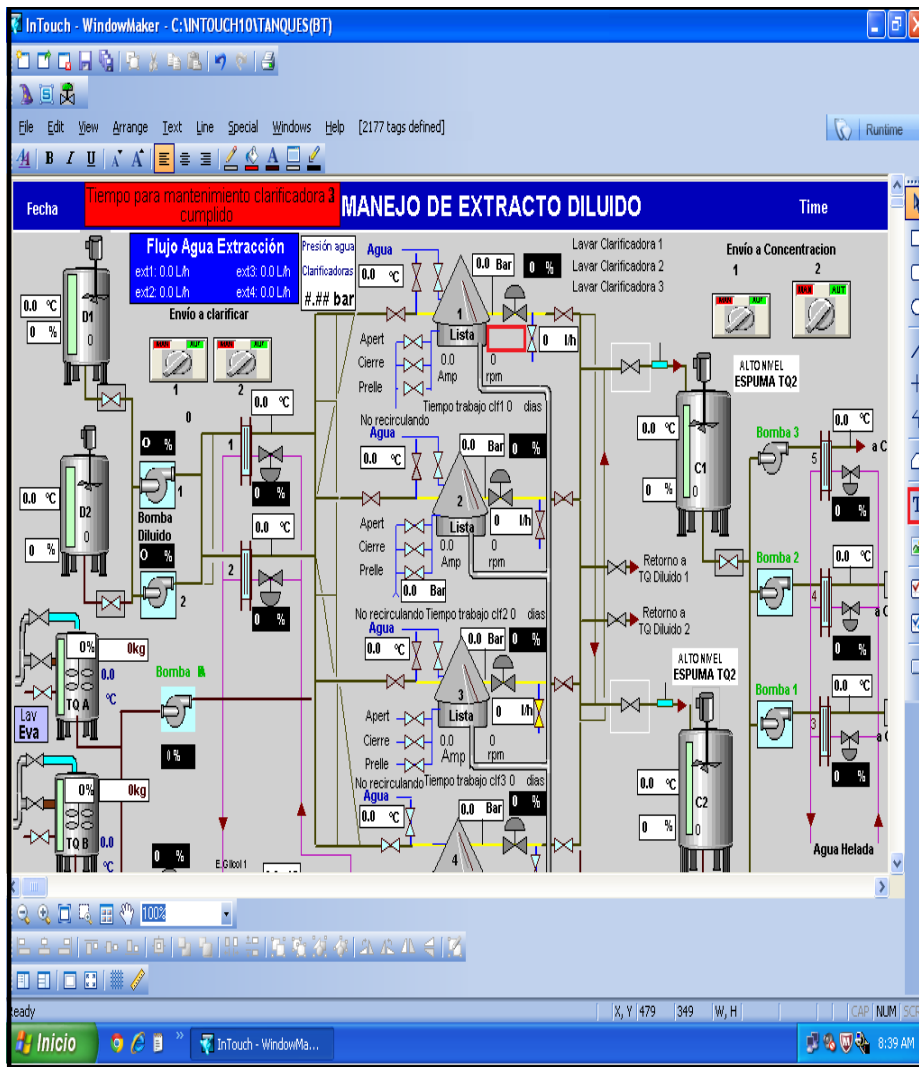
Figura 54. Grupo de Equipos



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

Luego de la última acción al dar clic en OK se abre la ventana de trabajo *WindowMaker*. En este espacio aparece todo lo relacionado con la aplicación en planta, solamente es necesario seleccionar en el lado izquierdo en los botones de edición la letra T para escribir en el campo que está en rojo dando clic sobre este al lado de la clarificadora 1; un campo indicará el valor "0.0" y otro las unidades de vibración, en este caso "mm/s". Figura 55.

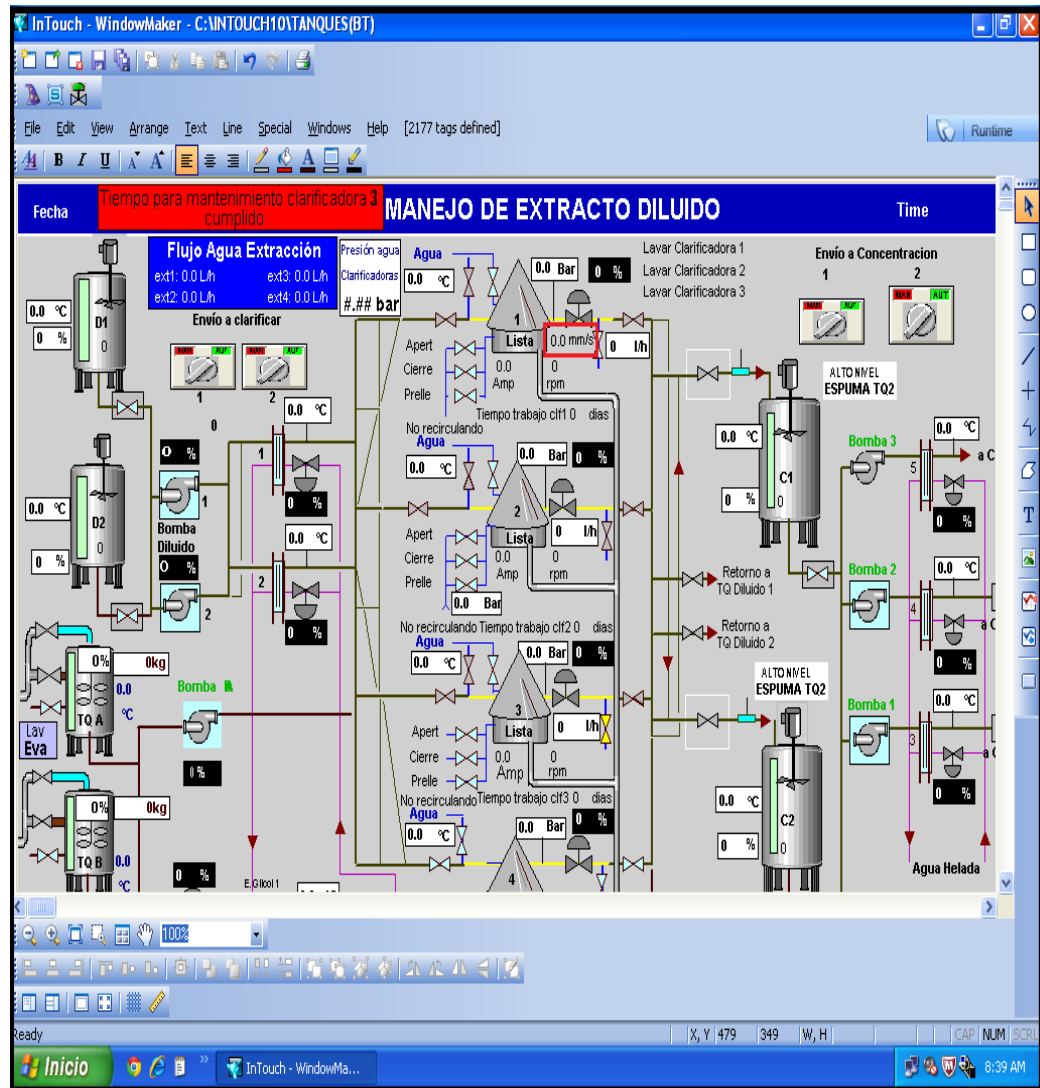
Figura 55. Ventana de trabajo



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

El resultado final de la leyenda se muestra en la Figura 56:

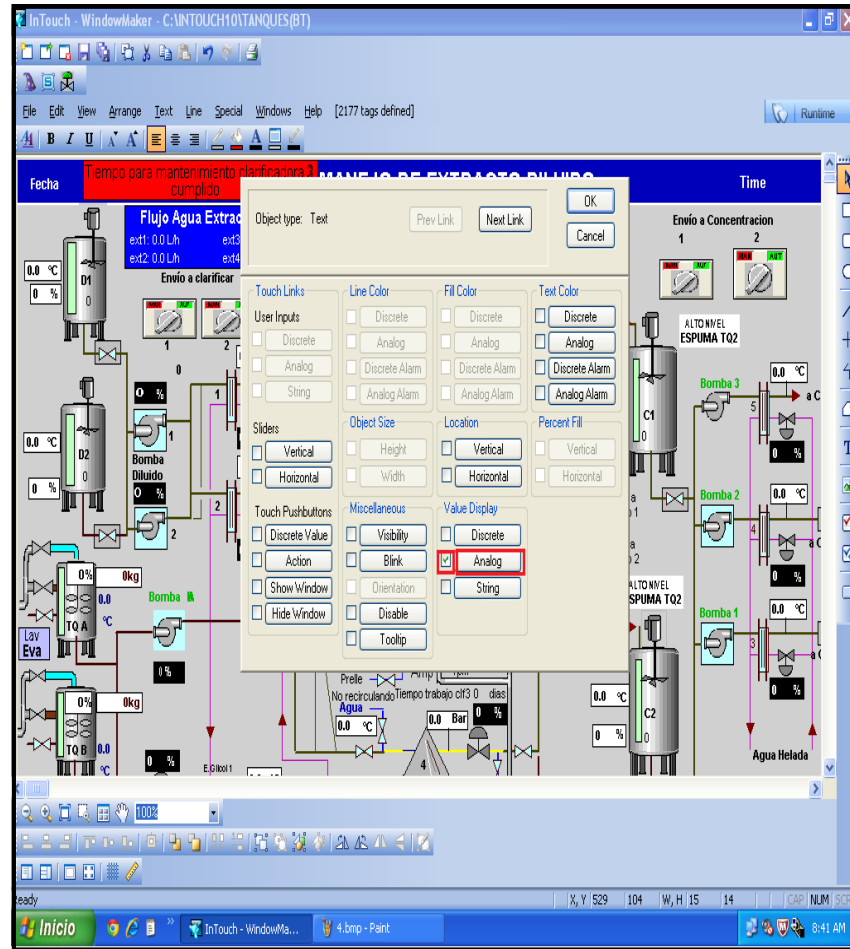
Figura 56. Valor de Vibración



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

Ya se tiene el nuevo campo con el valor “0.0” y las unidades “mm/s” pero es necesario configurar este nuevo espacio para que sea reconocido por el PLC y el valor del “0.0” tome el valor de la variable. Para iniciar la configuración hace falta dar doble *clik* sobre el valor “0.0”. A continuación como se muestra en la figura 58 se debe seleccionar el campo *value display* (indica que es una variable análoga) y se da *clik* en *Analog*.

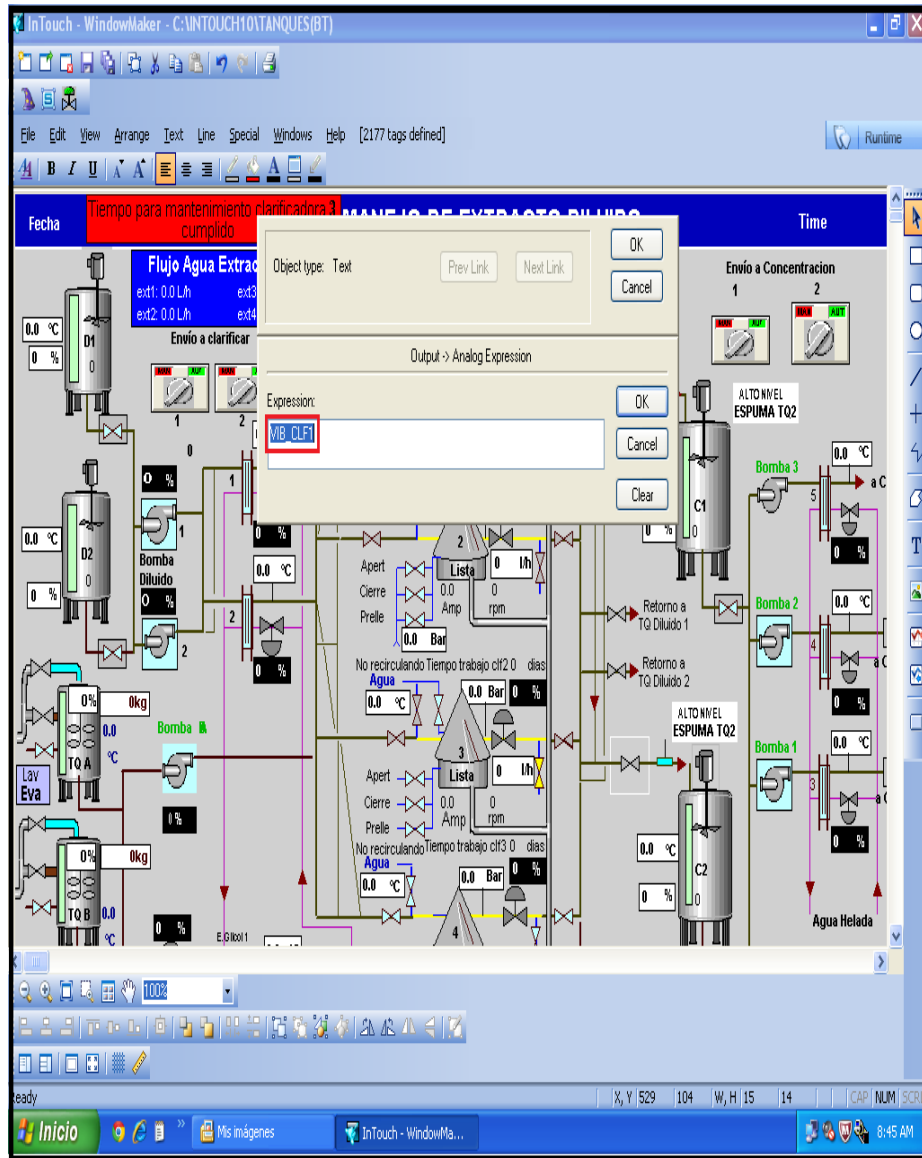
Figura 57. Configuración variable análoga



Fuente [PC INGE40.BUENCAFE.COM](http://PCINGE40.BUENCAFE.COM).

Cuando se da *clic* en *Analog* la aparece una ventana en la cual se ingresa mediante teclado el nombre dentro del campo *Expression* de la variable en este caso "VIB_CLF1" y se da doble clic sobre esta expresión para dar paso a su correspondiente configuración. Ver figura 58.

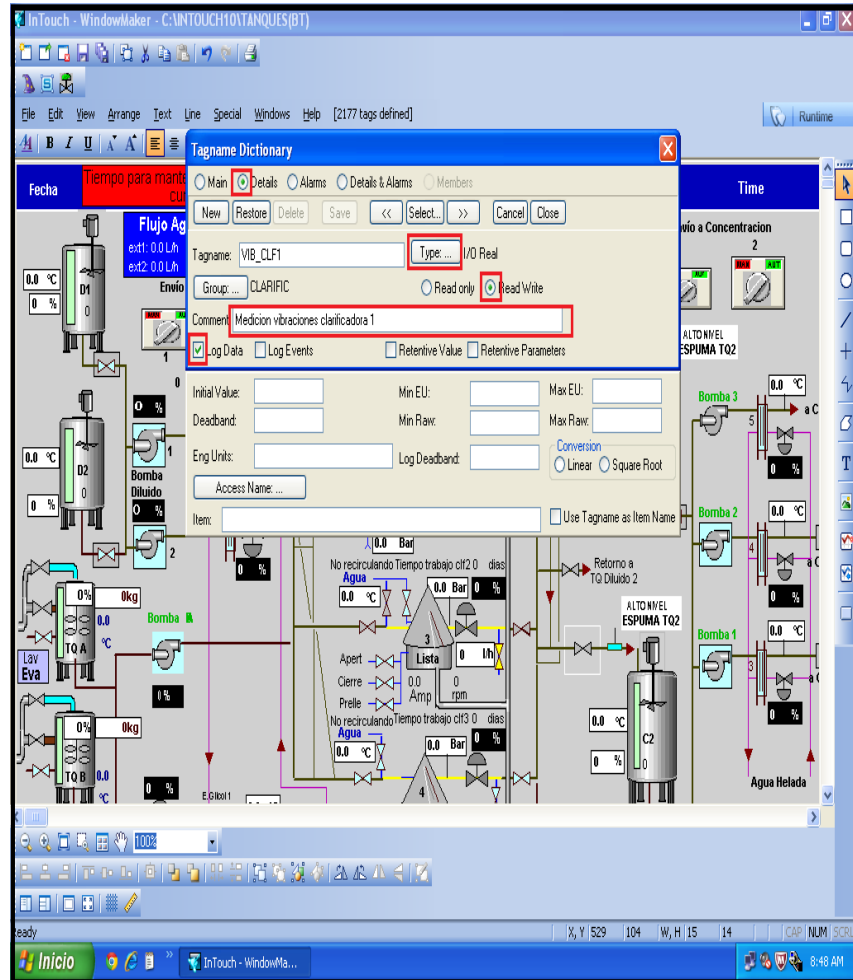
Figura 58. Asignación nombre de variable



Fuente PCINGE40.BUENCAFE.COM

Seguido de este paso se da apertura a una ventana llamada *TagName Dictionary* y en esta se deben ingresar otros datos como seleccionar detalles, lectura y escritura, en el comentario es necesario ingresar una descripción más completa del nombre de la variable “Medición Vibraciones Clarificadora 1” y por último se da clic sobre el botón *Type* entrada y salida real. Todos estos detalles se muestran en la figura 59.

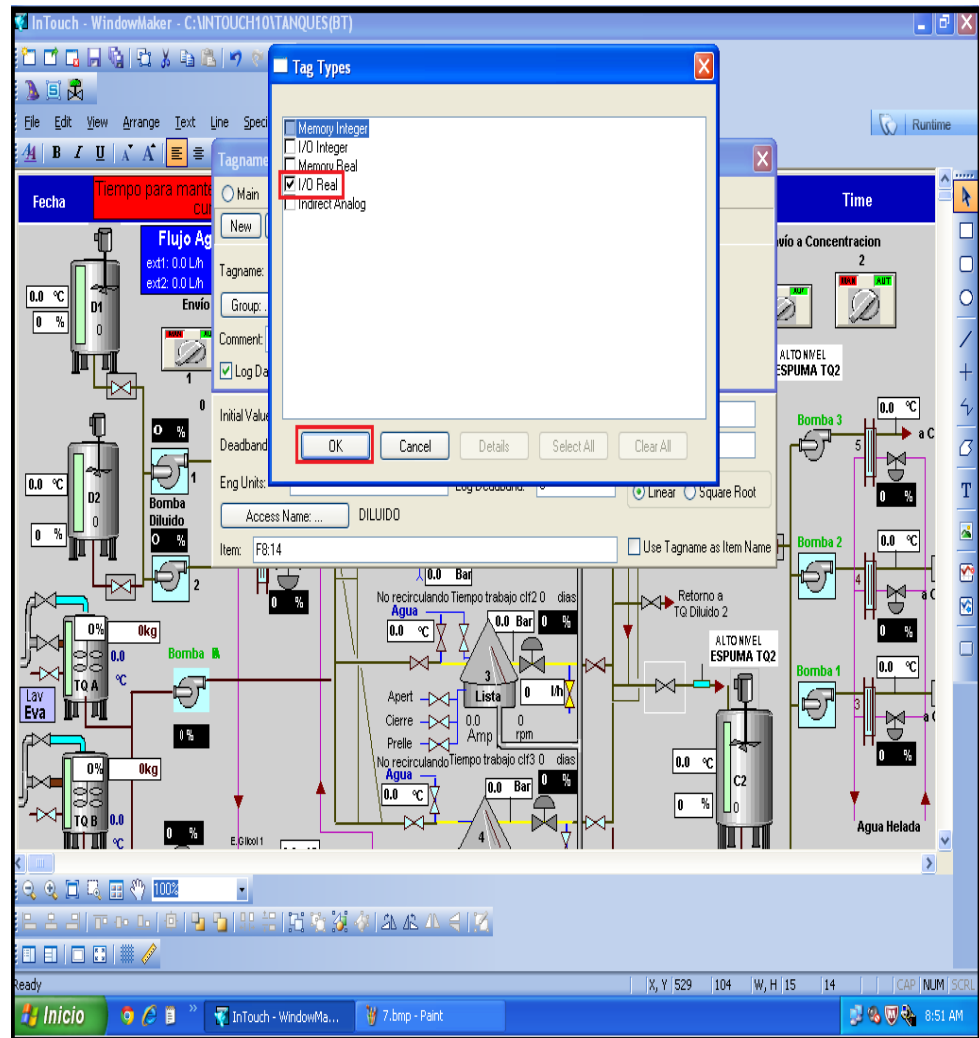
Figura 59. Configuración del Tagname



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

Al seleccionar el botón *Type* "I/O" que se muestra en la figura 59, se abre una ventana de diálogo donde se debe elegir la casilla que asigna esta variable a una entrada y salida real y luego se da *clic* en *OK*. En la siguiente figura se indica la selección de dicha variable.

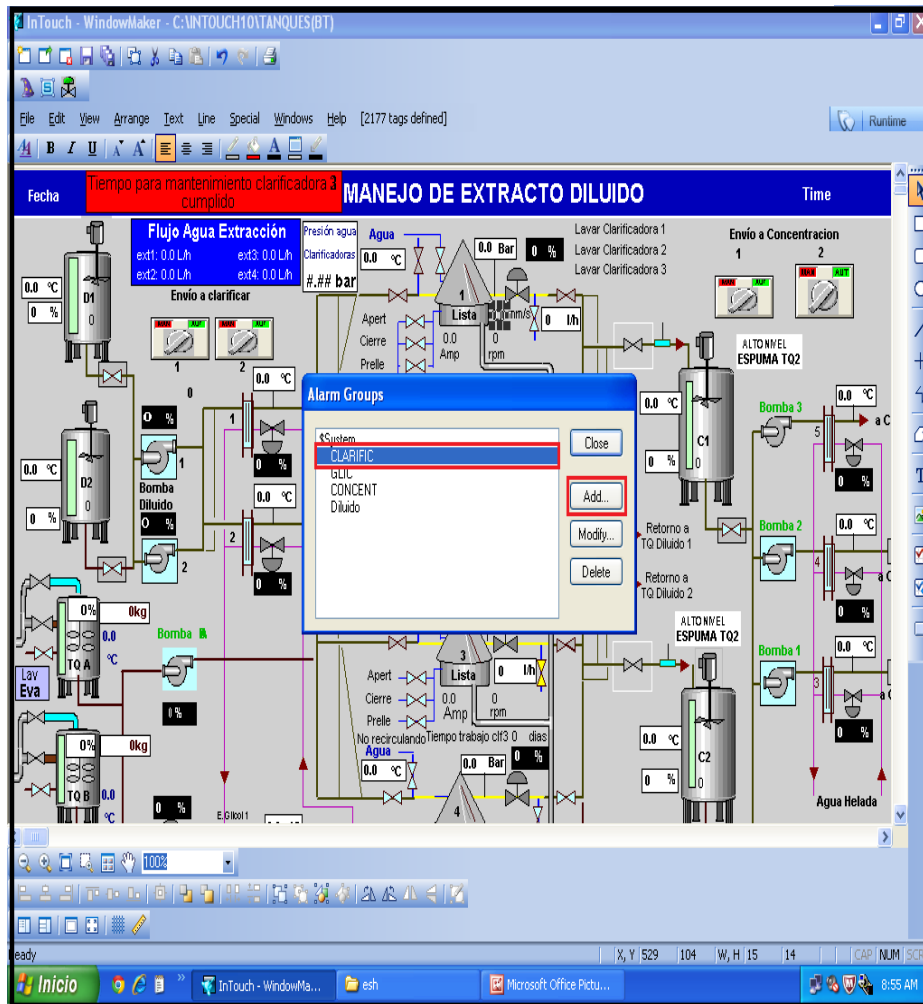
Figura 60. Selección de entrada y salida real



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

La acción anterior hace que se retorne a la figura **Figura 59: Configuración del Tagname** y se selecciona el botón *Group*. Aquí es necesario agregar el grupo llamado “CLARIFIC”. Figura 61.

Figura 61. Grupo de Alarmas

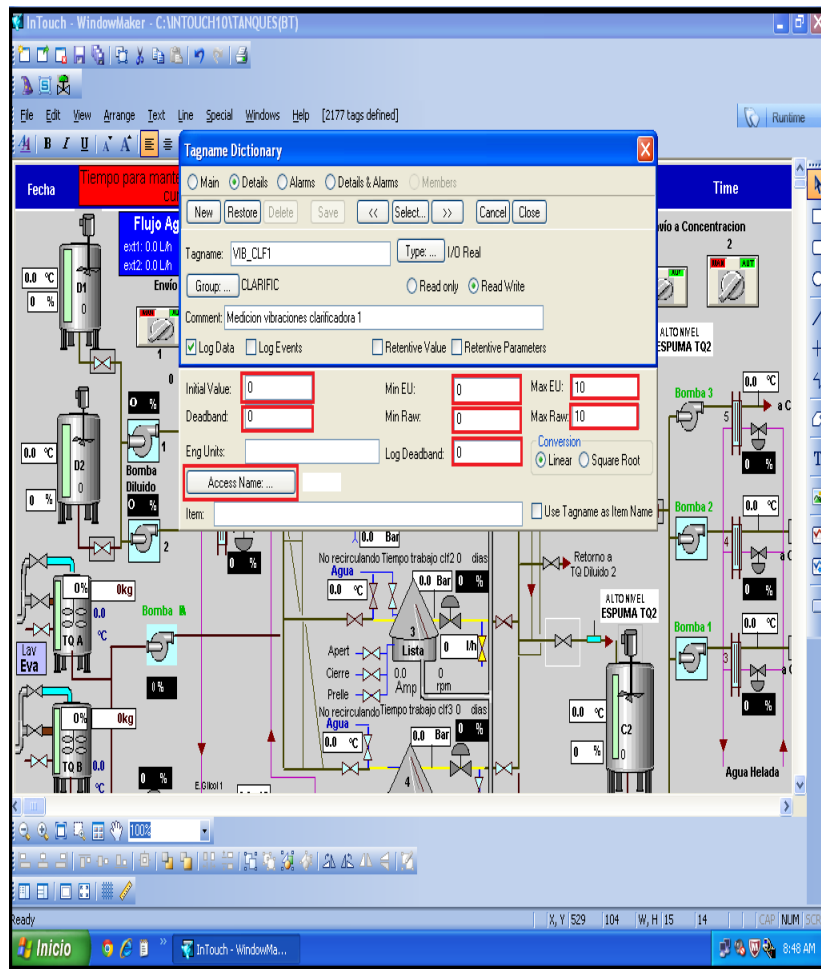


Fuente
INGE40.BUENCAFE.COM.

PC

De nuevo en la figura **Figura 59: Configuración del Tagname** se ingresan los valores de configuración de la variable en la gráfica de registro; *initial value*: 0, mínimo *EU*: 0, máximo *EU*: 10, *deadband*: 0, mínimo *Raw*: 0, máximo *Raw*: 10, y *Log deadband*: 0. Luego se da *clic* en el botón *Acces Name* (Ver figura 63).

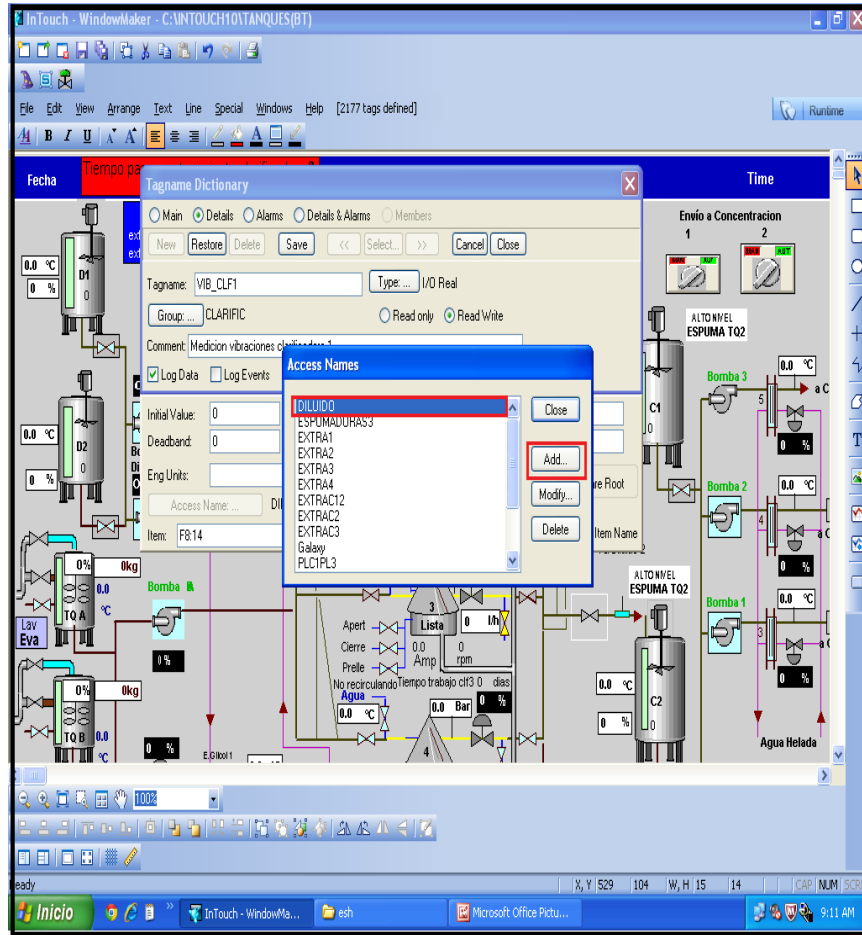
Figura 62. Configuración de la gráfica del registro



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

Presionando el botón *Acces Names* se selecciona Diluido y luego agregar. Figura 63.

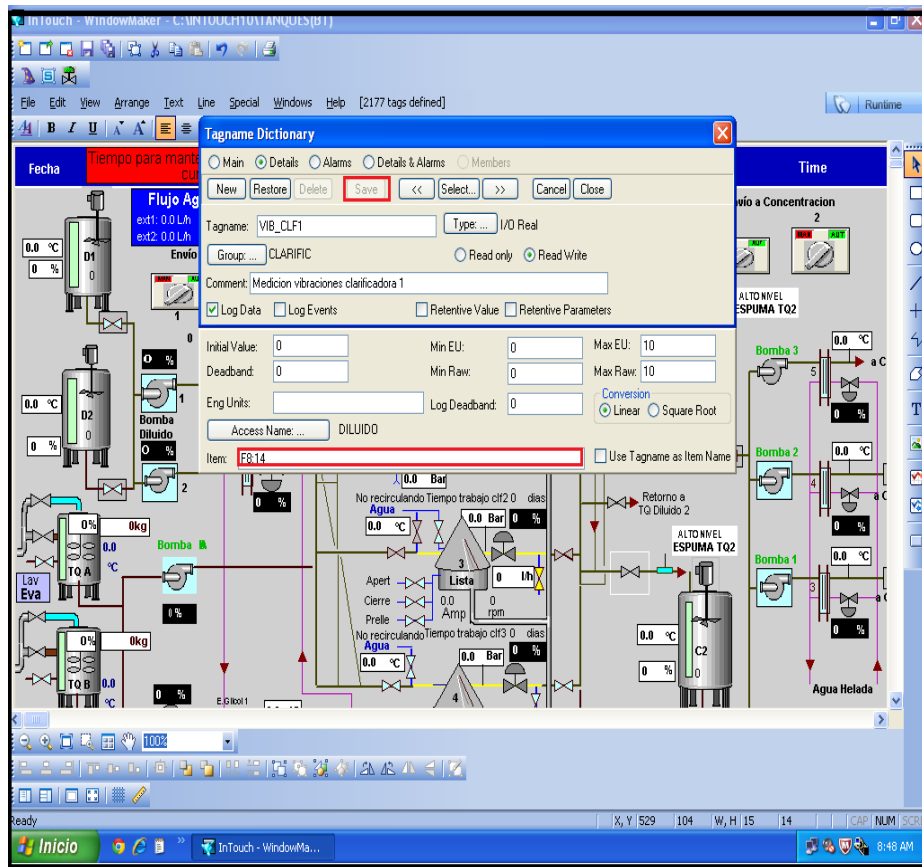
Figura 63. Asignación Acces Names



Fuente PC INGE40.BUENCAFE.COM.

Retornando nuevamente a la figura 63 Configuración de la gráfica del registro en el campo Ítem se ingresa el nombre de la variable en el PLC "F8:14" después de verificar disponibilidad de banderas en el mismo. Y seguido se presiona el botón Save. Con este paso queda concluida toda la configuración de la lectura, procesamiento y gráfica de la variable medida (Ver figura 64).

Figura 64. Configuración de Bandera



Fuente [PC INGE40.BUENCAFE.COM](http://PC.INGE40.BUENCAFE.COM).

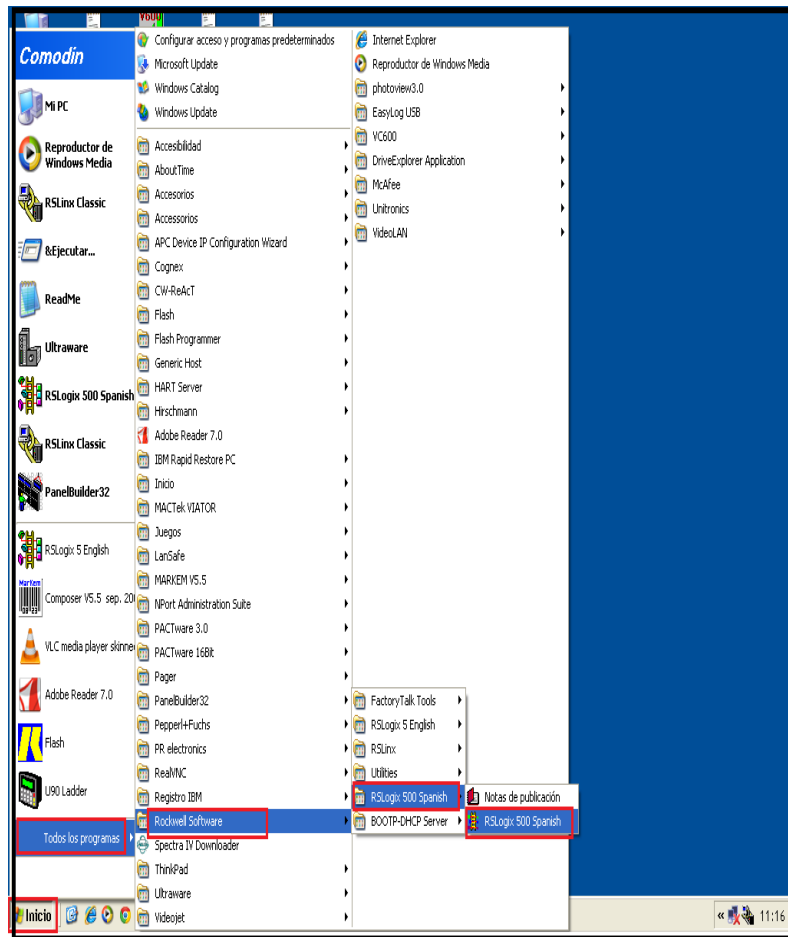
Toda la configuración anterior se realiza en un equipo licenciado para no hacerlo directamente en línea. Todo este proceso es guardado y posteriormente se cargará en el PC del cuarto de control operativo en planta, todo este procedimiento se hace a través de la red de sistemas de la organización.

5.3.1 Modificación de la programación ladder en el PLC.

En el tablero en planta donde se encuentra instalado el PLC Logix 500 es necesario conectar un PC portátil con nombre "Comodín" en línea para modificar el programa.

En el PC comodín se ingresa por inicio, todos los programas (Ver figura 65).

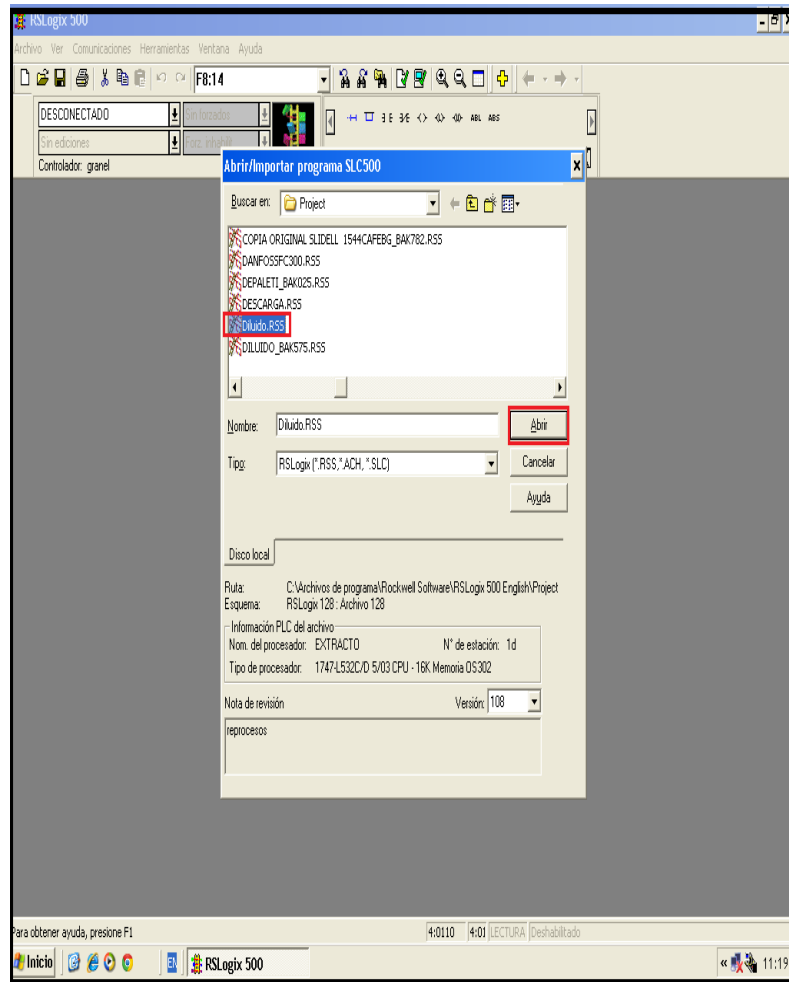
Figura 65. Ingreso RSLogix 500 Spanish



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

Una vez se está dentro del software se selecciona el *ladder* donde se debe realizar la edición del programa, en esta ocasión diluido.RSS y luego en el botón abrir como se indica en la figura 66.

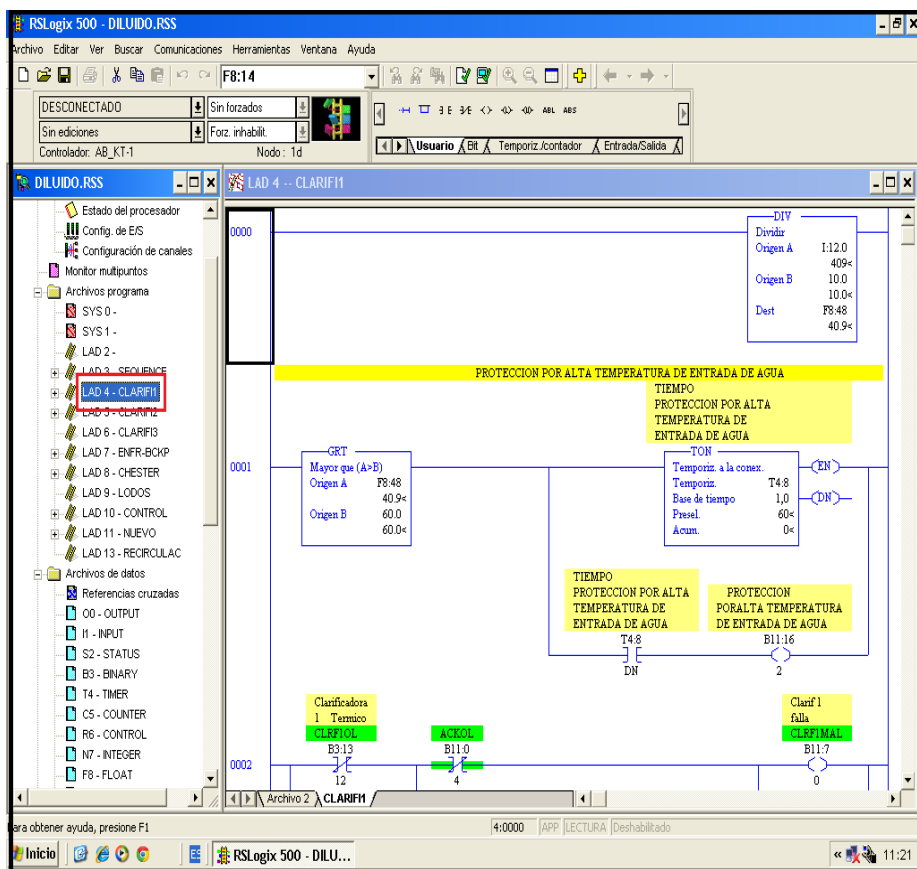
Figura 66. Importar Programa



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

Cuando el paso anterior se ejecuta inmediatamente se abre el programa importado y se selecciona el *ladder* de la clarificadora 1. Ver figura 67.

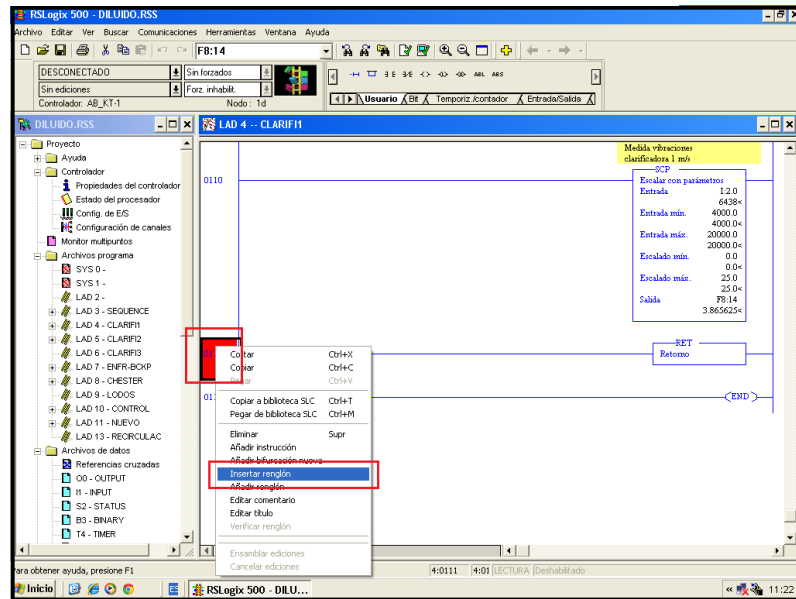
Figura 67. Programa Clarificadora 1



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

Al lado izquierdo de la líneas del *ladder* aparece el número del renglón, es necesario ir hasta el último y con *clic* derecho se inserta un nuevo renglón para ingresar los datos en cuanto a programación del sistema de medición de vibración como se muestra en la figura 69.

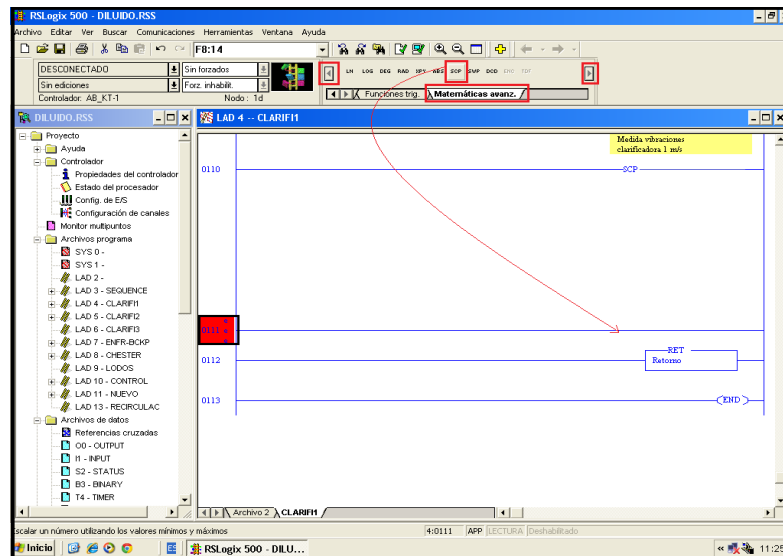
Figura 68. Insertar renglón en Ladder



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

El nuevo renglón es el número 0111 y con un clic sobre este su línea queda en modo de edición, en la parte superior derecha se busca funciones matemáticas avanzadas y se arrastra hasta el nuevo renglón un SCP “escalar con parámetros”. Este proceso se puede observar en la figura 69.

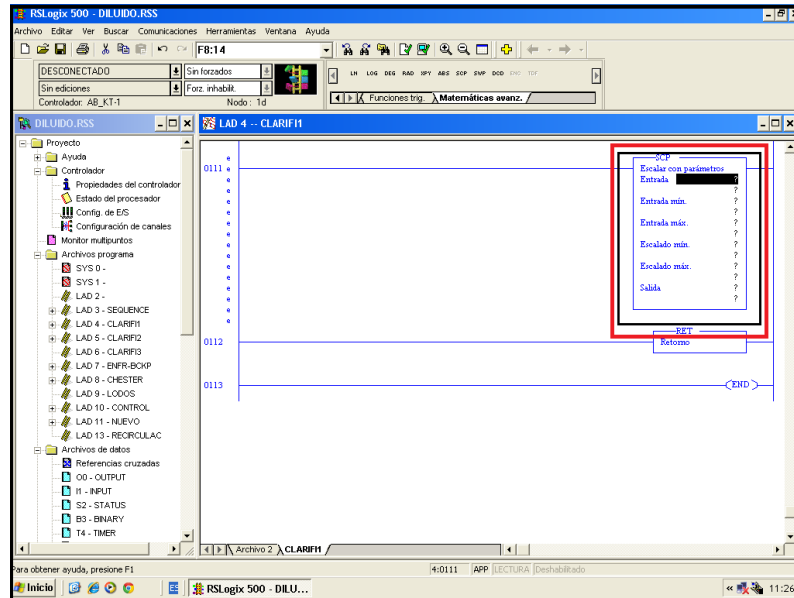
Figura 69. . Insertar SCP “Escalar con parámetros”



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

Al insertar el nuevo SCP en el nuevo renglón este contiene diferentes parámetros de configuración y suministrar la escalización a la variable; es necesario además, nombrar el SCP con “Medida de Vibración Clarificadora”. Los valores a ingresar son: en entrada= I:2.0 (Entrada física del PLC), entrada mínima= 4000 (valor mínimo entero que puede tomar la tarjeta, en este caso la entrada del sensor mínima serán 4mA), entrada máxima= 20000 (valor máximo entero que puede tomar la tarjeta, en este caso la entrada del sensor máximo serán 20mA), escalado mínimo= 0 (valor mínimo escalizado de la variable, en este caso el sensor medirá un valor mínimo de 0 mm/s), escalado máximo= 25 (valor máximo escalizado de la variable, en este caso el sensor medirá un valor máximo de 25 mm/s), en salida= F8:14. Ver figura 70.

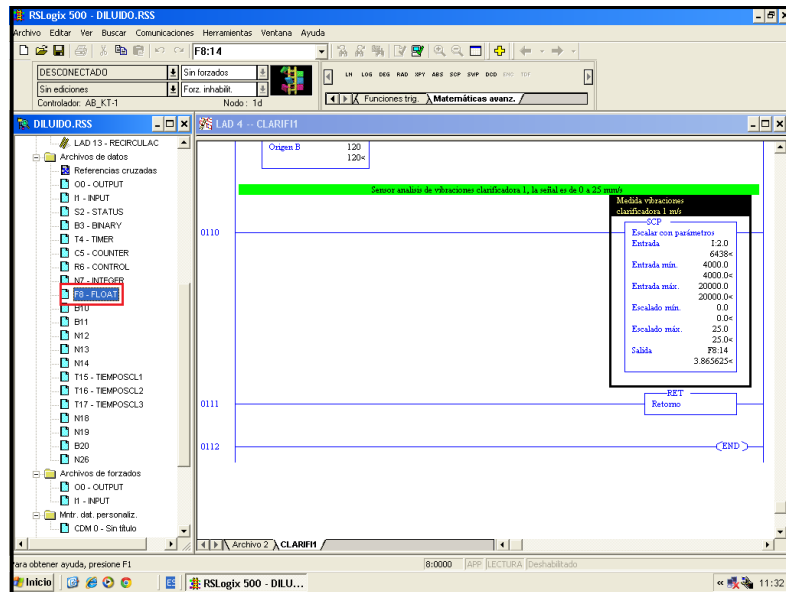
Figura 70. Parametrización del SCP



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

Luego de ingresar todos los valores correspondientes al SCP se observa el último valor de la bandera que es F8:14; este valor es insertado luego de verificar su disponibilidad en el PLC, esta disponibilidad, se consulta en la parte izquierda de la pantalla dando clic sobre FLOAT como se muestra en la figura 71.

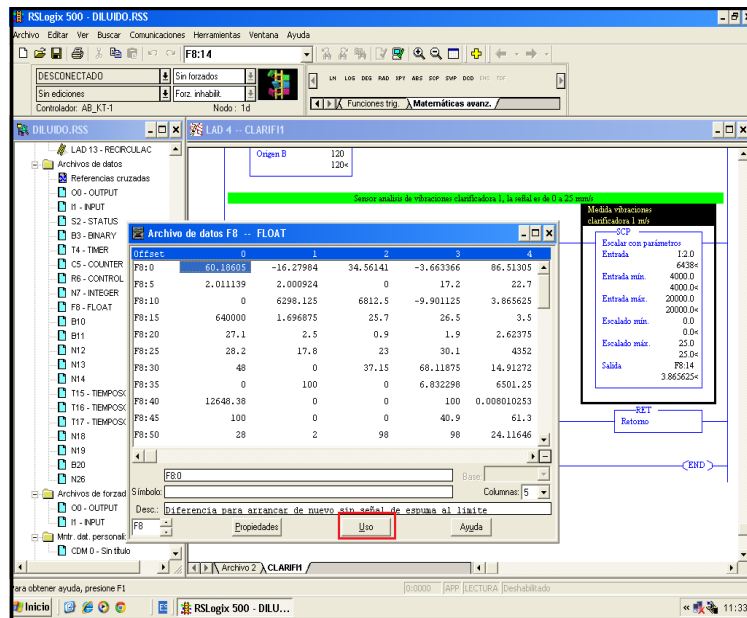
Figura 71. Disponibilidad de bandera



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

Al dar *clic* sobre *float* se abre una ventana “Archivo de datos F8” y se presiona el botón uso (Ver figura 72).

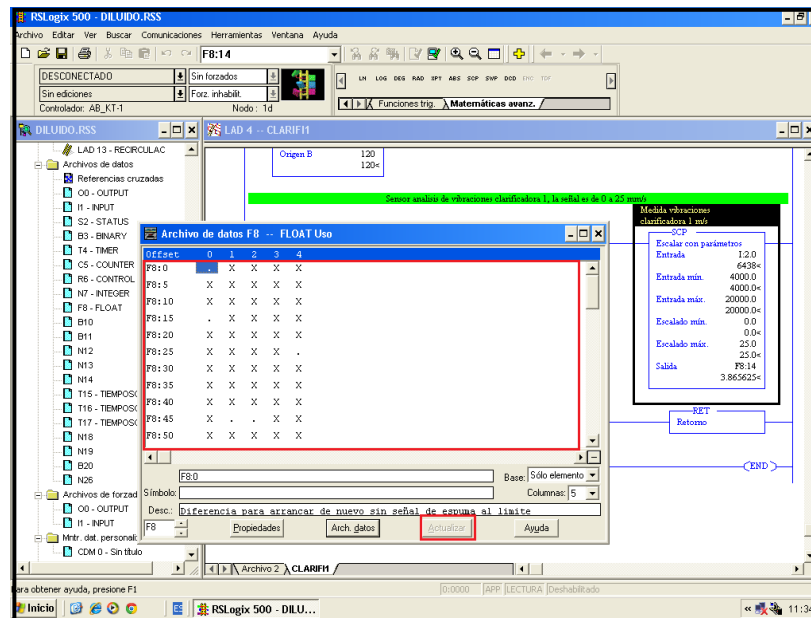
Figura 72. Archivo datos de bandera



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

En la figura que se muestra a continuación (Figura 73) los valores que tienen equis “X” están no disponibles y los que tienen punto “.” están sin usar y es aquí donde se dispone de la bandera F8:14 y seguido se oprime el botón actualizar.

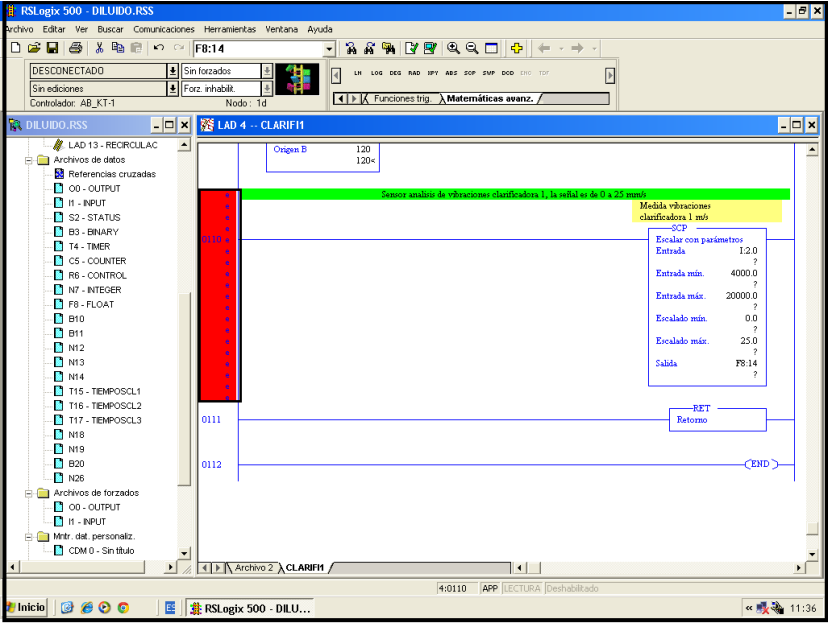
Figura 73. Selección de Bandera



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

El resultado final se muestra en la figura 74.

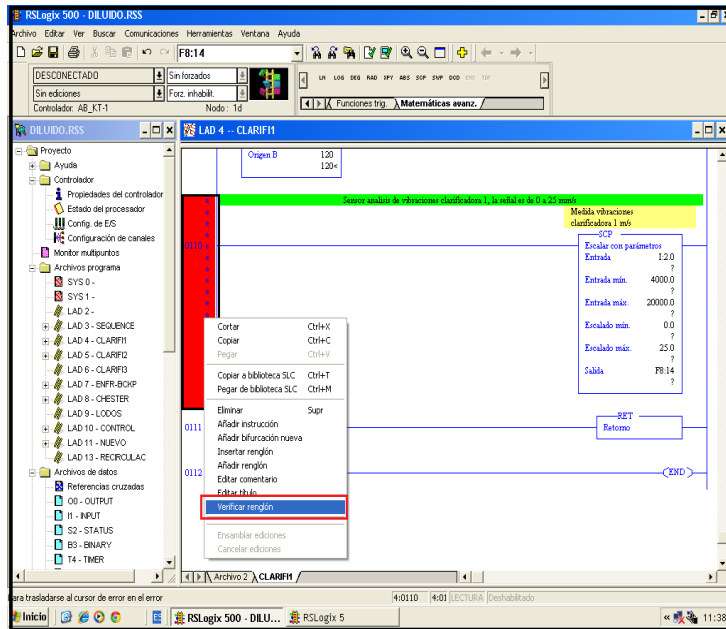
Figura 74. Datos insertados Escalado de la variable



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

Es recomendable verificar el nuevo renglón dando *click* derecho sobre este y seleccionar verificar renglón para evitar errores en este proceso (ver Figura 75).

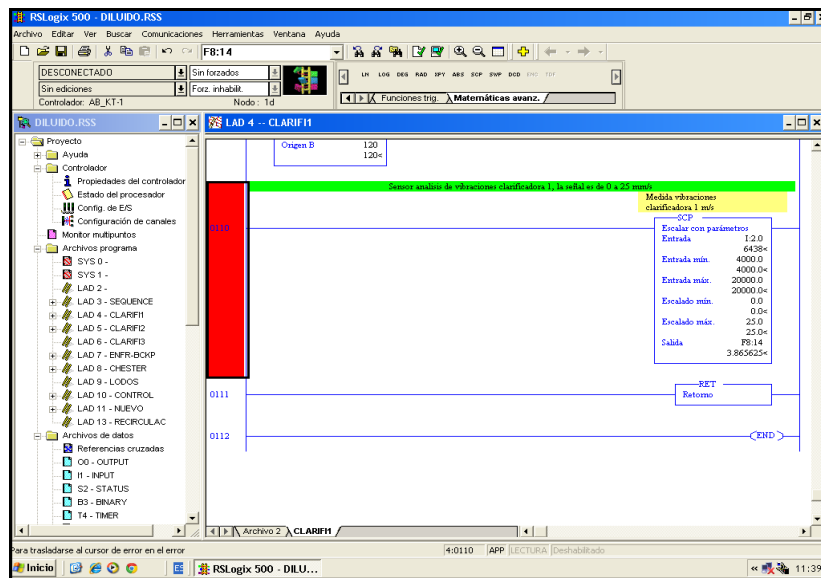
Figura 75. Verificación del renglón insertado



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

En la figura que se muestra a continuación se puede observar que el programa queda listo para correr.

Figura 76. Resultado final Escalamiento de la señal



Fuente PC COMODIN BUENCAFE.

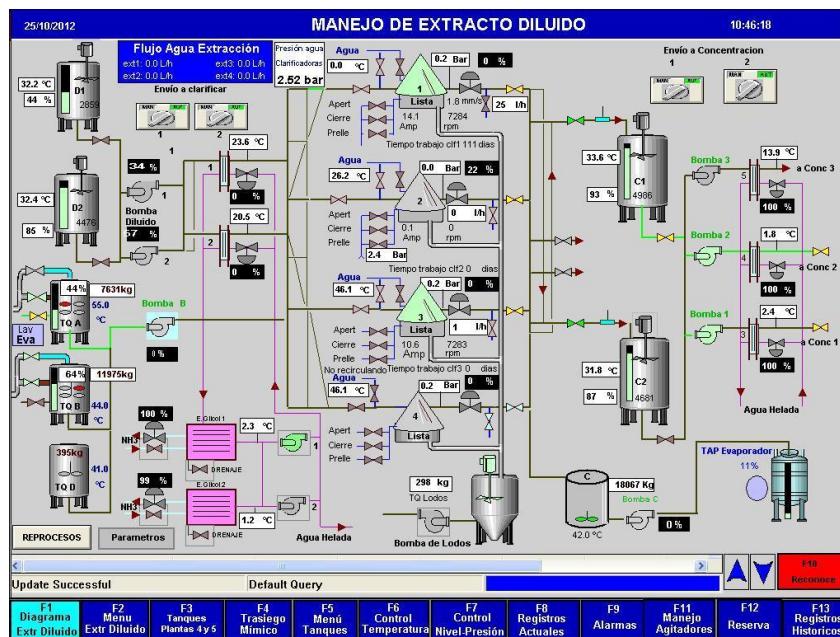
5.4 ANALISIS Y ESTUDIO DE LOS DATOS OBTENIDOS

Con el análisis y el estudio de los datos obtenidos durante las medidas efectuadas a la clarificadora 1 del área de extracto diluido, se realizó la evaluación de los datos entregados por los instrumentos de medición.

En la planta de Buencafé Liofilizado es indispensable mantener un monitoreo y un control continuo sobre todos los equipos que se encuentran en línea, es por eso, que todas las computadoras mantienen encendidos sus monitores o pantallas de visualización en los cuartos de control. El operario mantiene un contacto directo con estos monitores y puede navegar en ellos de una forma dinámica y agradable, todos los gráficos esquemáticos de las máquinas permanecen activos en un aplicativo de *In Touch*.

La figura 77 corresponde a los gráficos esquemáticos que se encuentran disponibles para los operarios en la sala de control del proceso “Concentración” en planta y se pueden observar diferentes procesos, entre ellos, la Clarificación que corresponde al Manejo de Extracto Diluido con sus respectivas variables.

Figura 77. Esquema manejo Extracto Diluido

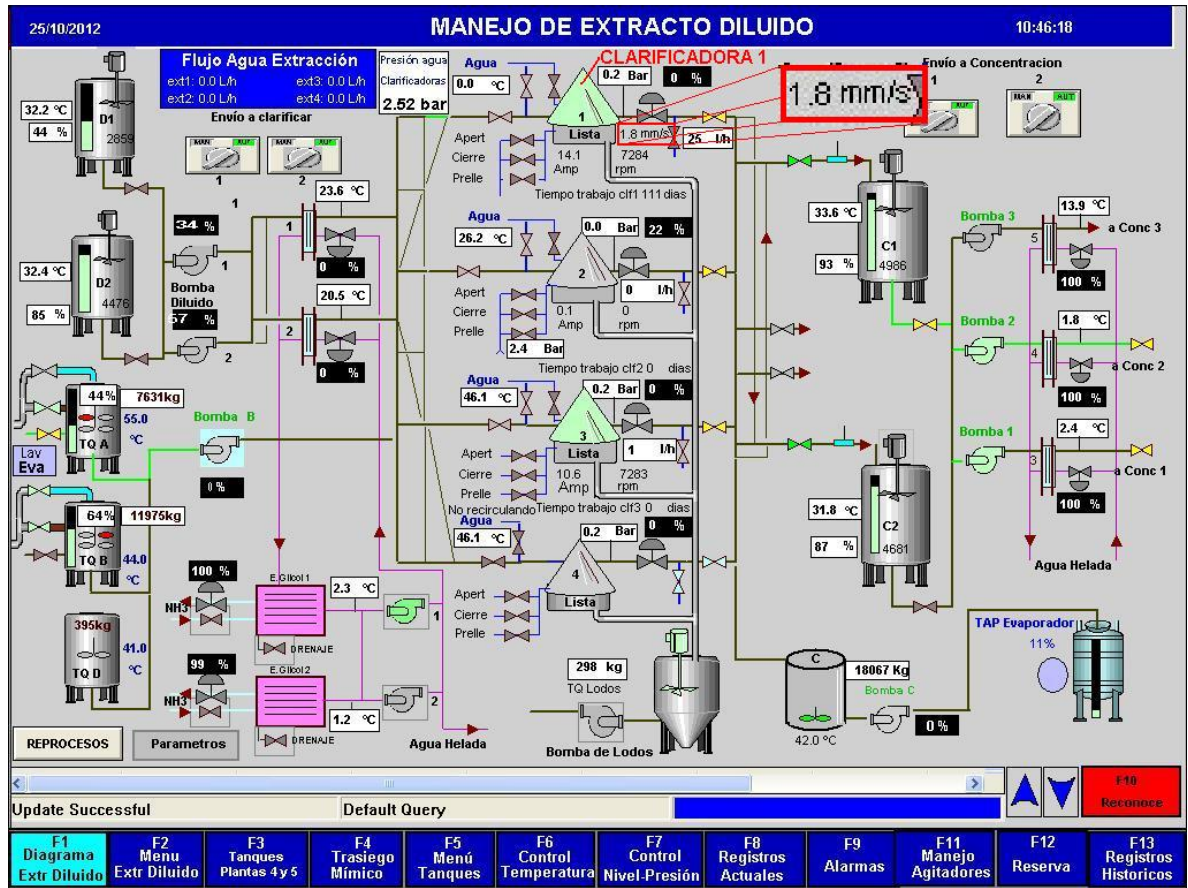


Fuente Software de supervisión *In Touch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

En la figura 78 se detallan las nuevas modificaciones realizadas en el esquema para mostrar el resultado final en la pantalla de visualización; en el recuadro en

rojo se observa el valor “1.8 mm/s” esta la cifra en velocidad de vibración en la que se encuentra la clarificadora en tiempo real. Es una nueva ayuda para técnicos y operarios para conocer el estado mecánico del equipo en ese momento.

Figura 78. Medida de la velocidad de vibración en la pantalla

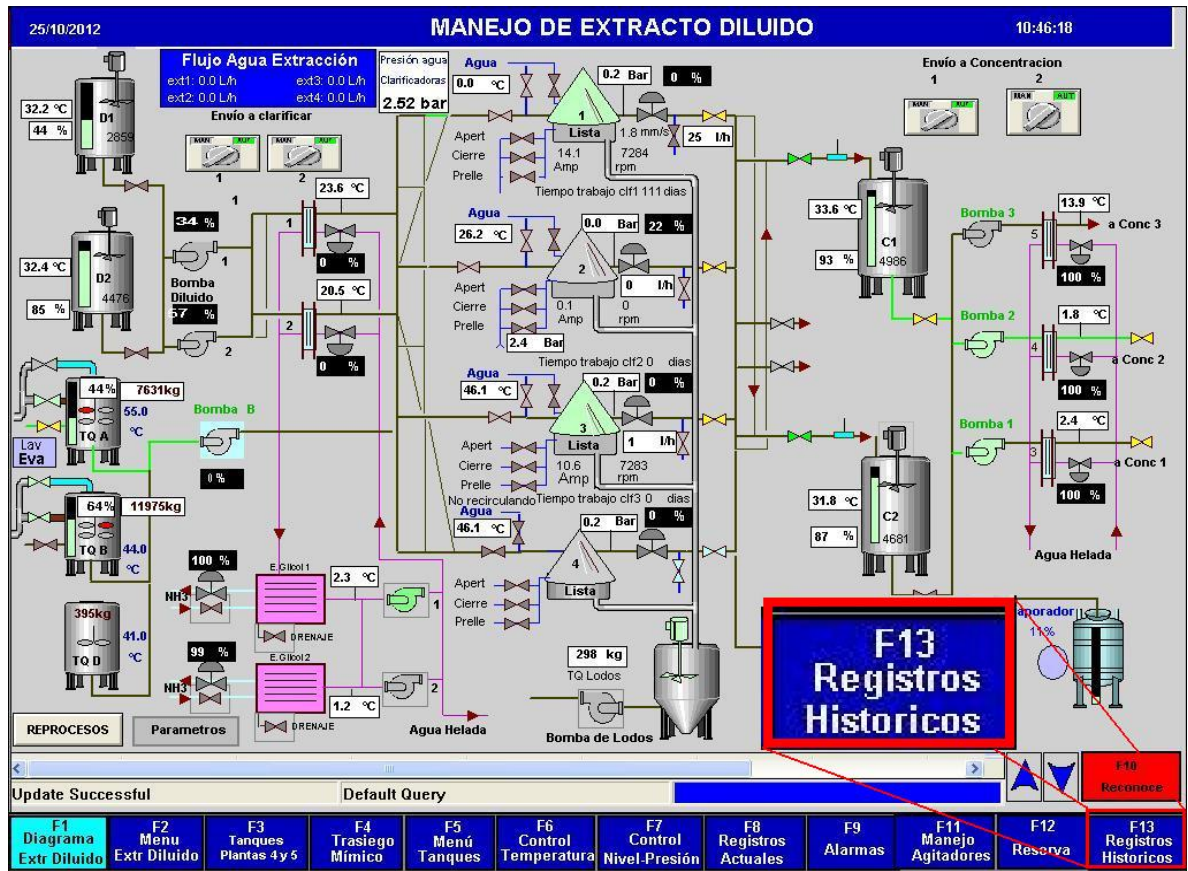


Fuente Software de supervisión *InTouch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

5.4.1 Visualización de gráficos en el software de supervisión en planta.

Para consultar los gráficos históricos de vibración en la clarificadora 1, es necesario acudir al menú de navegación en la parte inferior derecha y dar “clic izquierdo” en el *mouse* sobre el botón “Registros Históricos” como se muestra a continuación en la figura 79 en el recuadro rojo.

Figura 79. Botón para gráficos de registros históricos



Fuente Software de supervisión *In Touch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

Luego de dar “clic” en el botón de Registros Históricos el *software* abre la pantalla de gráficos históricos. En esta parte se muestran todas las variables que están configuradas para que sean visibles y tener una idea clara en cuanto a sus magnitudes y sus frecuencias. A continuación se explican en la figura 80 todos los componentes de esta pantalla de gráficos.

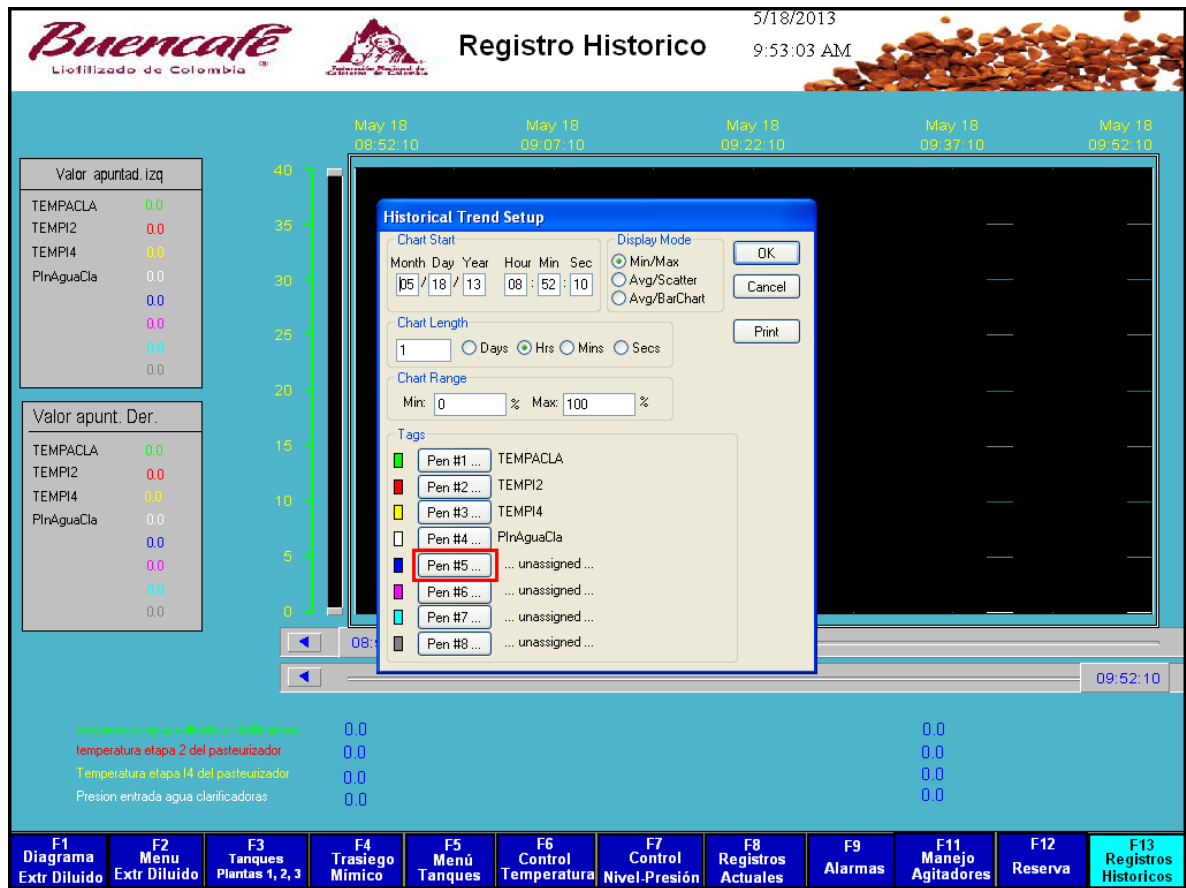
Figura 80. Partes pantalla de gráficos



Fuente Software de supervisión *In Touch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

En la pantalla de gráficos es necesario dar “clic” en la zona del recuadro rojo 1 en la figura 80 para dar apertura a los lápices disponibles que se pueden utilizar. Los lápices son las gráficas que el sistema dibujará automáticamente después de su selección. Luego de este paso se da inicio al siguiente cuadro de diálogo, y se debe elegir un “Pen” en este caso el “Pen #5” el cual está disponible, es posible además, cambiar los valores de tiempo que están en la parte superior de esta ventana, teniendo la posibilidad de tener día, mes y año en los cuales se desea consultar la variable y luego se debe *clickear* en “OK” para continuar al siguiente paso (ver figura 81).

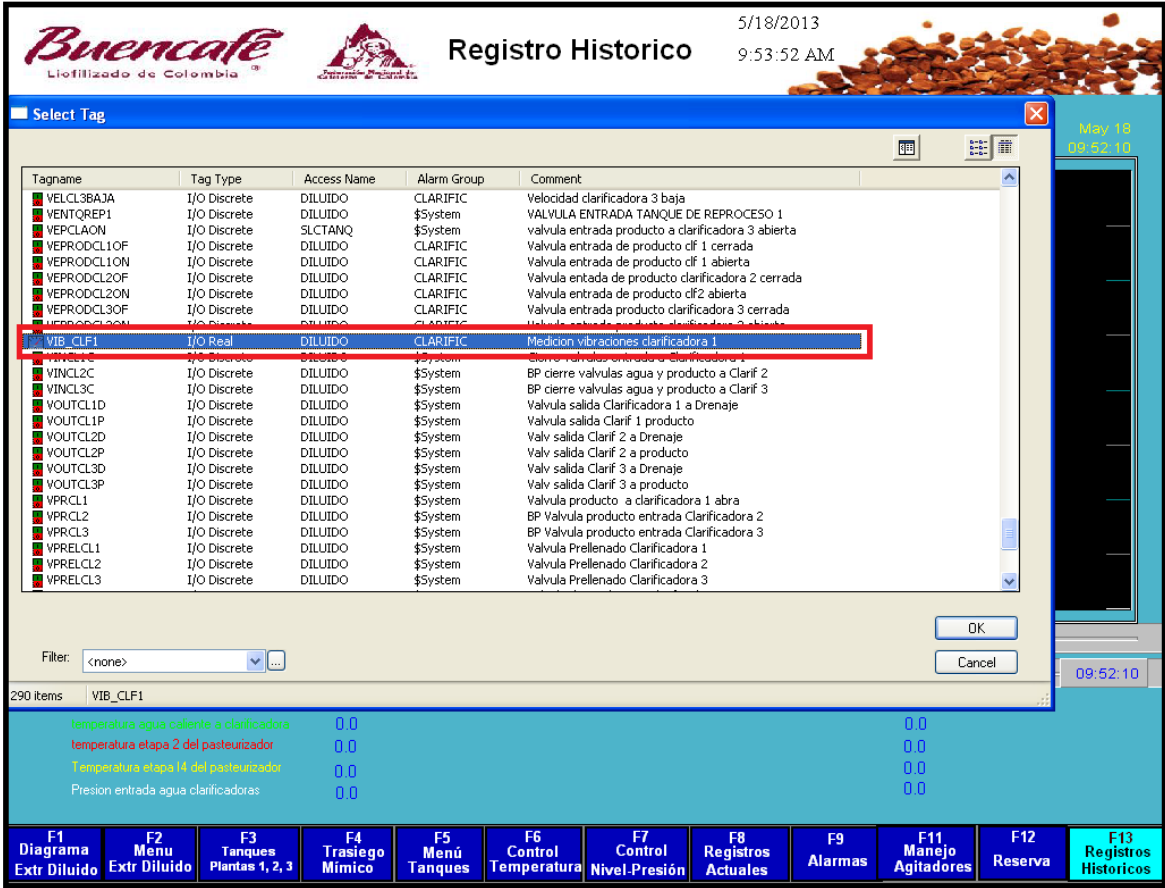
Figura 81. Selección del lápiz de gráfico



Fuente Software de supervisión *In Touch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

Una vez seleccionado el lápiz #5 y aceptado el cuadro de dialogo anterior, se activa otro cuadro con las respectivas variables que se pueden incorporar para su visualización en la zona de gráfica de variables. En este caso se elige “Medición vibraciones clarificadora 1” y se oprime OK (ver figura 82).

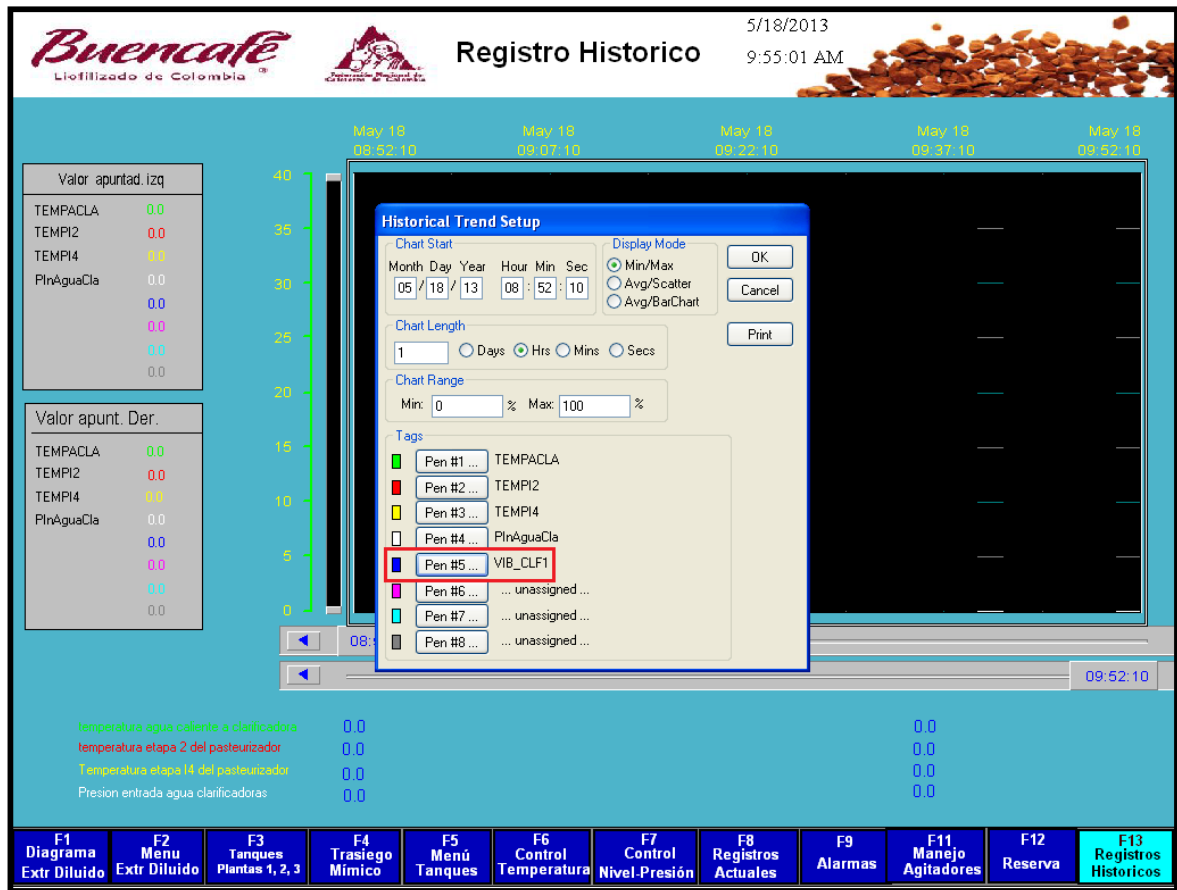
Figura 82. Selección de la variable



Fuente Software de supervisión *In Touch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

Si se observa detenidamente se tiene un nuevo “pen #5” con el nombre “VIB_CLF1” que corresponde al anteriormente elegido, además, la variable será dibujada de color azul (ver figura 83).

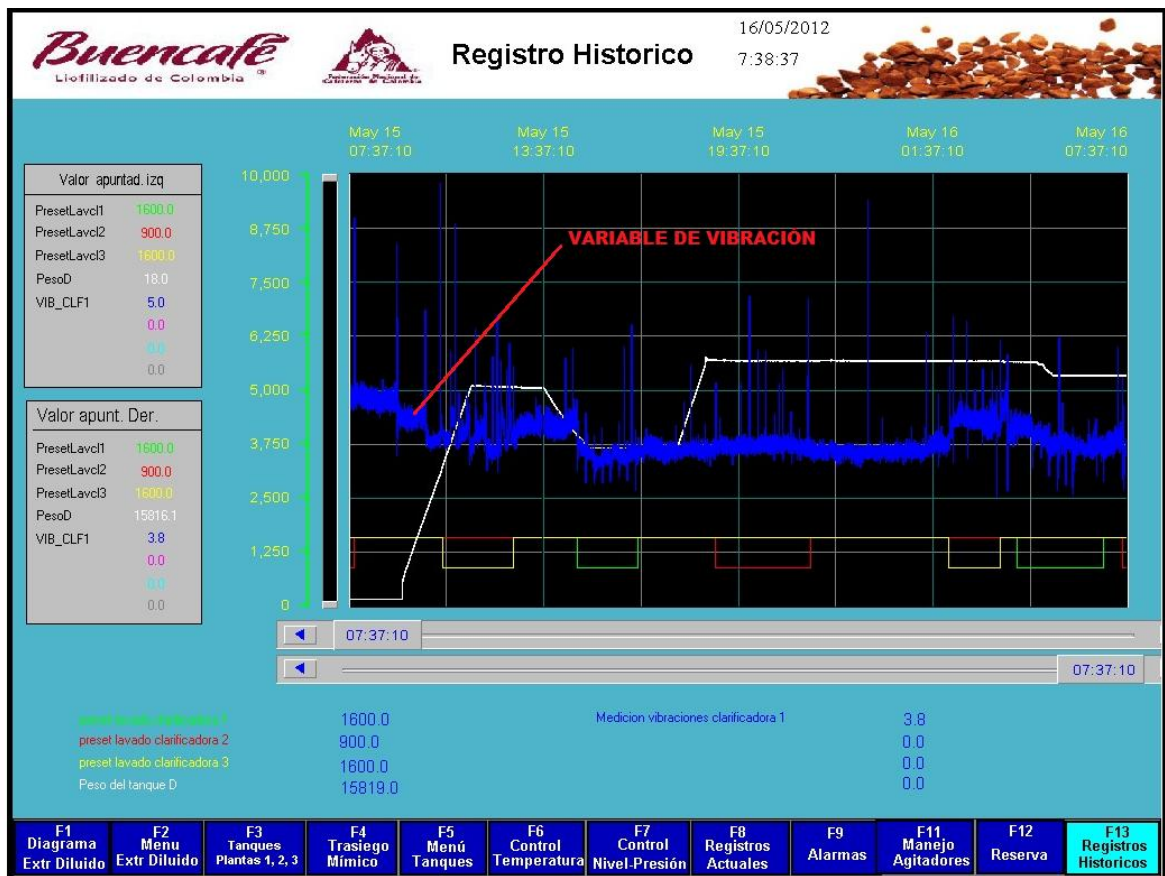
Figura 83. Lápiz para dibujar variable



Fuente Software de supervisión *In Touch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

Luego de aceptar oprimiendo OK aparece la gráfica completa con sus respectivos valores (ver figura 84).

Figura 84. Gráficos de Registros Históricos



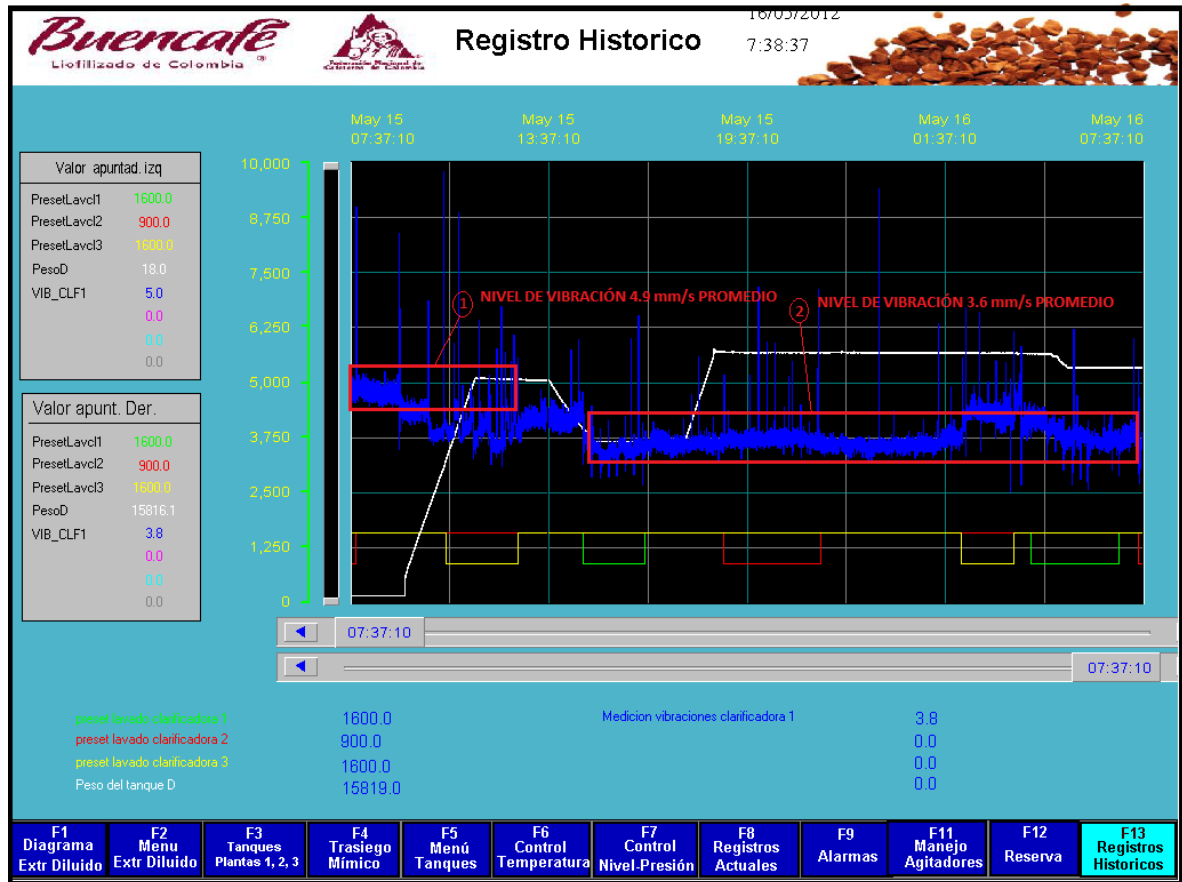
Fuente Software de supervisión *In Touch* Buencafé Liophilizado de Colombia.

5.4.2 Niveles de vibración en la clarificadora.

En una inspección rutinaria hecha por la parte técnica u operativa del equipo se pueden determinar ciertos estados de funcionamiento de la máquina y se puede establecer una alarma donde se puedan tomar las acciones pertinentes con respecto al nivel de vibración.

En la siguiente gráfica se tienen varios niveles de vibración, los cuales se caracterizarán de acuerdo a las tablas de severidad y a las respectivas normas y se analizarán.

Figura 85 Niveles de vibración

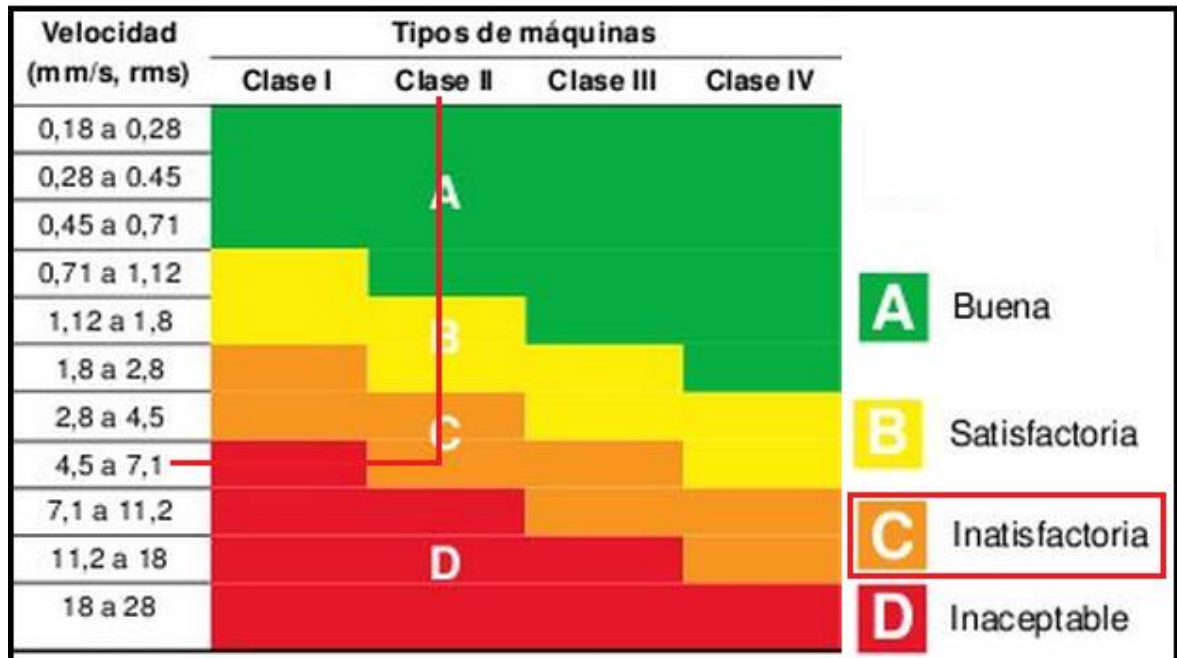


Fuente Software de supervisión *InTouch* Buencafé Liofilizado de Colombia.

En la figura anterior se pueden observar dos niveles de vibración; el 1 con un valor promedio de 4.9 mm/s y el 2 de 3.6 mm/s. Estos valores se pueden caracterizar siguiendo las normativas y las tablas de severidad. Si se analiza detenidamente el valor más alto y más representativo en este caso 4.9 mm/s, se puede conocer y determinar el estado de la máquina.

Teniendo en cuenta que el equipo es de 18.5 Kw con una velocidad promedio de trabajo de 7230 RPM, y una base flexible, según la tabla 2, dentro de la norma ISO 2372 de 1974 esta máquina se cataloga dentro de la clase II, ahora, según la figura 29 se obtiene el siguiente estado:

Figura 86. Estado de la Clarificadora según la norma ISO 2372

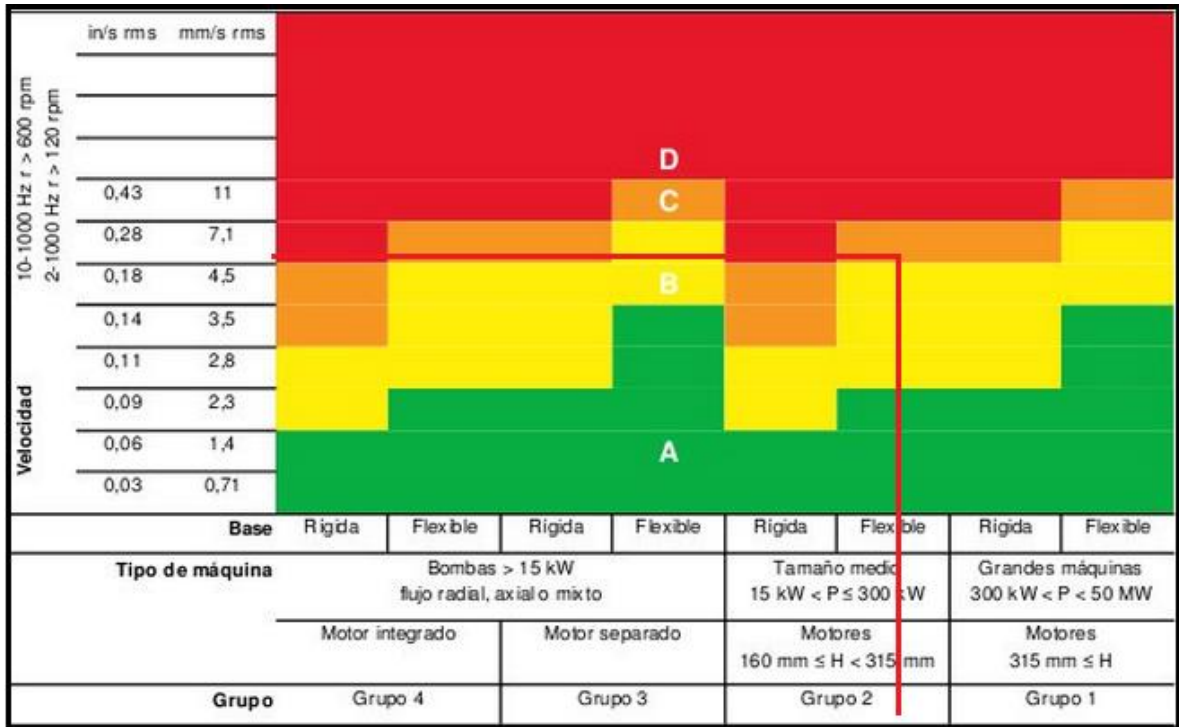


Fuente <http://www.sinais.es/normativa/rathbone.html>.

En la figura 86 se puede observar que la máquina se encuentra en un estado C “insatisfactorio” y que posiblemente sea necesario hacer una intervención técnica preventiva para evitar daños en esta.

Teniendo en cuenta que el equipo es de 18.5 Kw con una velocidad promedio de trabajo de 7230 RPM, y una base flexible, dentro de la norma ISO 10816 de 1995 esta máquina se cataloga dentro del grupo II, ahora, según la figura 30 se obtiene el siguiente estado:

Figura 87. Estado de la Clarificadora según la norma ISO 10816

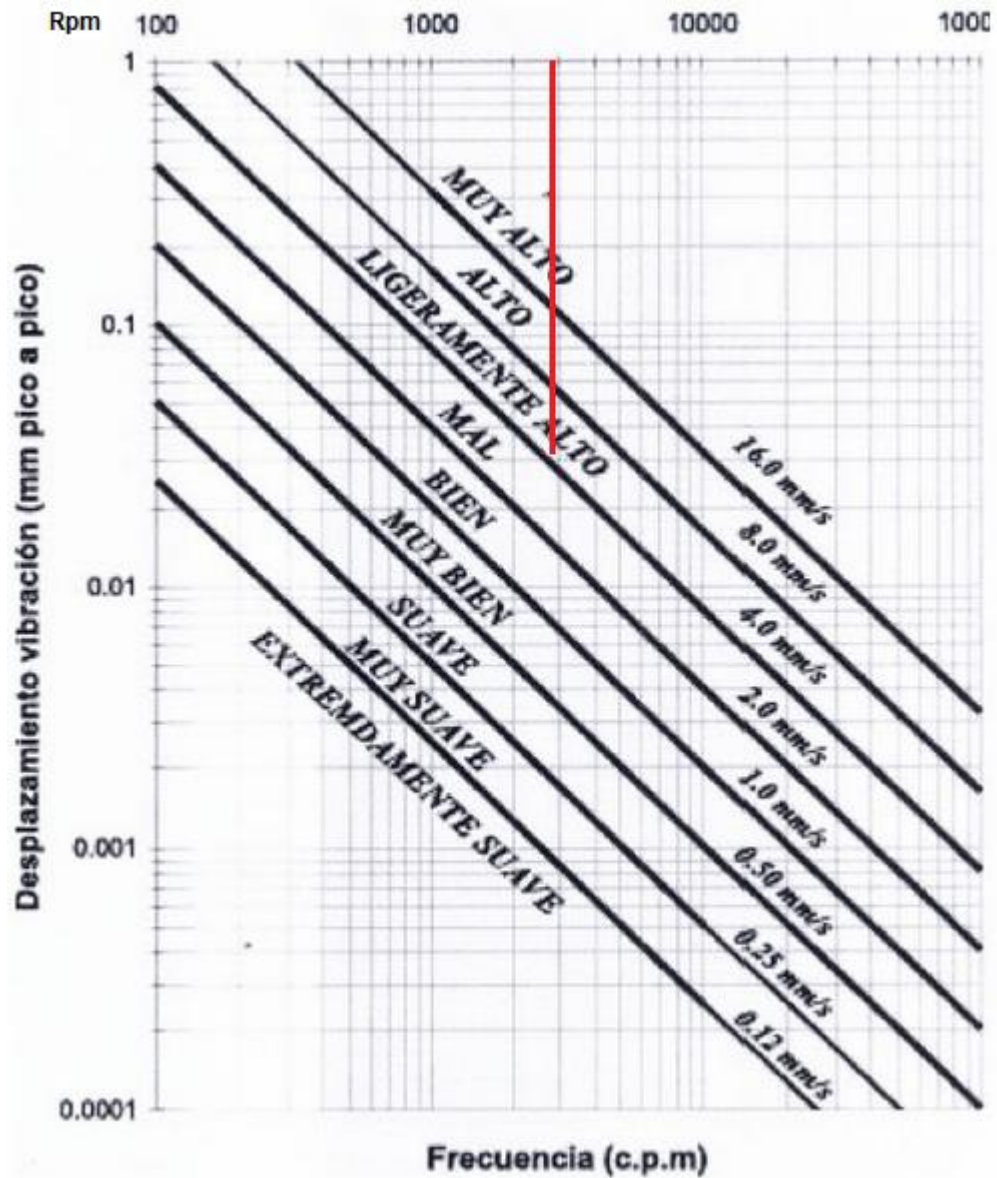


Fuente <http://www.sinais.es/normativa/rathbone.html>

En la figura 87 se puede observar que la máquina se encuentra en un estado C “máquinas cuya condición no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un periodo de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada, antes de que esta pare por sí sola”.

Si se utiliza otro método como la carta de Rathbone figura 17, el resultado es similar. La vibración en este caso es ligeramente alta.

Figura 88. Estado de la Clarificadora según *Rathbone*



Fuente <http://www.sinais.es/normativa/rathbone.html>.

Los ejemplos anteriores sirven como referencia para analizar y parametrizar los estados y los niveles de vibración la clarificadora y determinar las condiciones de funcionamiento y operación de la misma.

RECOMENDACIONES

- Para contribuir con un diagnóstico detallado acerca del estado de cada uno de los componentes, posibles síntomas de funcionamiento inadecuado, se recomienda un análisis espectral que se puede lograr con las funciones embebidas del *PLC*.
- En vista del funcionamiento de un solo sensor que envía la señal al PLC de un solo eje, sería de gran ayuda obtener señales tridimensionales con un par de sensores más que complementarían el análisis con una información integral.
- Dado el buen resultado y la aceptación de la aplicación este modelo predictivo basado en condición, sería de gran ayuda expandirlo a otros equipos críticos de Buencafé Liofilizado de Colombia.
- La tendencia en estos tiempos es la de manejar la toma, el procesamiento, el análisis de datos por medio de dispositivos portátiles, los cuales contienen sensores de aceleración, vibración, lámpara estroboscópica, panel de visualización, procesador, entre otros y todo esto es un solo conjunto, lo cual facilita todo el procesamiento de la vibración. La organización puede analizar la posibilidad de adquirir uno de estos equipos.
- Es indispensable una buena frecuencia en el seguimiento, toma y análisis de datos para que el sistema sea efectivo.
- Implementar un plan de mantenimiento predictivo basado en condición en la organización mediante hojas de ruta en el software SAP.
- Formar y capacitar el personal técnico y operativo para el seguimiento efectivo en este tipo de implementación.
- Se puede convertir en una desventaja la calibración del sensor, en cuanto a la comparación con un patrón de vibración.
- Establecer alarmas por PLC en cuanto a los niveles de vibración.

BIBLIOGRAFÍA

Agraz Industrial. División predictiva (2013). *Introducción al mantenimiento preventivo*. Artículo en línea. <http://www.predictivo-industrial.com>

Barajas P., O. M. (2013). *Vibraciones mecánicas – modelamiento matemático*. Artículo en línea. http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/vibracionesmecanicas

Blog informático. (2008). *Topología de red: malla, estrella, árbol, bus y anillo*. Artículo en línea. <http://www.bloginformatico.com/topologia-de-red.php>

Café Buendía (página oficial) (2013). *Página Oficial de Buencafé Liofilizado de Colombia*. Artículo en línea. www.buendia.com/buendia

DLI Engineering. (2013). *Parámetros de medición de vibración*. Artículo en línea. <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/parmetrosdemedicindevibracin.htm>

Efytimes. (2013). *Efytimes.com – If it's Technology It's Here*. Página de internet. <http://www.efytimes.com/e1/category.asp?mag=22>

Gallego Navarrete, D.; Pacheco Porras, R. & Romagosa Cabús, J. (2004). *Sistema SCADA*. Tesis de grado para optar al título de Ingenieros de sistemas. Escuela politécnica superior de Cataluña. Cataluña, España.

Ltd.productos3. (2007). *Proceso industrial – Centrífugas*. Artículo en línea. www.monografias.com/trabajos7/centri/centri.shtml

Metrix Experience Value. (2013). *Vibration- Condition Monitoring and Protection*. Artículo en línea. www.metrixvibration.com

Ramón F. & Mateo G. (2007). *Diferentes tipos de vibraciones mecánicas*. Artículo en línea. <http://www.monografias.com/trabajos/vibramec/vibramec.shtml>

National Instruments. (2013). *Esquema de adquisición de datos*. Artículo en línea. http://www.ni.com/academic/instructor/meche_dynamics_vibration.htm

S. A. (2013). *Analista de vibración – Nivel I*. Artículo en línea. <http://www.tav.net/transductores/medida-vibraciones-sensores.pdf>

S. A. (2013). *Protocolos de comunicaciones industriales*. Artículo en línea. <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/articulos/agosto-06.pdf>

S. A. (2013). *Redes de comunicación industriales*. Artículo en línea. <http://linux0.unsl.edu.ar/~rvilla/c3m10/tema13.pdf>

S. A. (2012). *Vibraciones mecánicas*. Artículo en línea. www.vibraciones.net23.net

Sinais Ingeniería. (2011). *Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operaciones entre 100 y 200 rev/s*. Artículo en línea. <http://sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/iso2372.html>

Sinais Ingeniería. (2012). *Transductores de desplazamiento*. Artículo en línea. www.sinaes.es/sensores/transductores_desplazamiento.html

SINAIS INGENIERÍA. (2013). CARTA DE RATHBONE. ARTÍCULO EN LÍNEA. [HTTP://WWW.SINAIS.ES/RECURSOS/CURSO-VIBRACIONES/NORMATIVA/RATHBONE.HTML](http://WWW.SINAIS.ES/RECURSOS/CURSO-VIBRACIONES/NORMATIVA/RATHBONE.HTML)

SFK. (2011). *Rodamientos resistentes a la vibración*. <http://www.skf.com/co/industry-solutions/construction/machines/road-rollers/steering-units.html>

VEGA. (2006). *Comunicación en automatización de procesos*. Artículo en línea. <http://www.vega.com/downloads/PR/ES/36235-ES.PDF>