

Desarrollo de un sistema para predecir fallos en destiladores MECO por deterioro de turbinas en una planta farmacéutica.

Juan Camilo Caicedo Vargas, ✉[Juancamilocaicedo3@gmail.com](mailto:Juancamilocaicedo3@gmail.com)

Trabajo de grado presentado para optar al título de Tecnólogo en Mecatrónica Industrial

Asesor: Juan Carlos García Arredondo



Institución Universitaria Antonio José Camacho

Facultad de Ingenierías

Tecnología en Mecatrónica Industrial

Cali - Colombia

2021

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Institución Universitaria Antonio José Camacho para optar al título de Tecnólogo en Mecatrónica.**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Santiago de Cali, 26 febrero 2022**

## **Dedicatoria**

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser gran el inspirador de este proyecto y brindarme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados, también va dedicado a mi madre por el apoyo que me brindo en mi proceso de formación en todos estos años, igualmente dedico este trabajo a mi novia por el gran apoyo que me brindo y su motivación en la realización de este proyecto, y también dedico este trabajo a mis compañeros de trabajo por haberme brindado el apoyo para poder realizarlo.

## **Agradecimientos**

Primeramente, gracias a la universidad por haberme permitido formarme en ella, gracias a todos los docentes que fueron participes de mi proceso que fueron los responsables de realizar sus aportes, que el día de hoy se ve reflejado en la culminación de mi paso por la universidad. Gracias a mis padres que fueron mis mayores promotores durante este proceso, también agradezco a mis compañeros de trabajo el cual me brindaron su apoyo en la realización de este proyecto, gracias a Dios que fue mi principal apoyo y motivador para cada día continuara en la carrera.

## Tabla de contenido.

<i>Resumen</i> .....	7
<i>Introducción</i> .....	8
1. <i>Planteamiento del problema</i> .....	9
2. <i>Antecedentes</i> .....	11
3. <i>Justificación</i> .....	22
4. <i>Objetivos</i> .....	24
4.1. <i>Objetivo general</i> .....	24
4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	24
5. <i>Marco teórico</i> .....	24
6. <i>Marco conceptual</i> .....	28
6.1. <i>Vibración</i> .....	28
6.2. <i>Destilación por compresión de vapor</i> .....	28
6.3. <i>Mantenimiento predictivo</i> .....	28
6.4. <i>SCADA</i> .....	29
7. <i>Metodología</i> .....	29
7.1. <i>Tipo de estudio</i> .....	29
7.2. <i>Fuentes y técnicas</i> .....	30
8. <i>Desarrollo</i> .....	30
8.1. <i>Implementación de un sistema de control en línea que permita detectar fuera de límites de las condiciones de operación del sistema de lubricación y vibración del equipo</i> .....	33
8.2. <i>Implementación de sistema de monitoreo en línea de la temperatura de aceite y valores de vibración de los destiladores</i> .....	36
8.3. <i>Plan de mantenimiento predictivo que permite corregir fallas tempranas en las turbinas</i> .....	45
9. <i>Discusión</i> .....	52
10. <i>Conclusiones</i> .....	53
11. <i>Recomendaciones</i> .....	54
12. <i>Referencias</i> .....	56

## Índice de figuras

<i>Figura 1. Diagrama típico de flujo.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2. Diagrama Ishikawa para encontrar la causa del problema. Fuente: elaboración propia. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3. GRAFCET parte 1 del sistema de control.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4. GRAFCET parte 2 del sistema de control.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5. GRAFCET parte 3 del sistema de control.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 6. GRAFCET parte 4 del sistema de control.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 8. Sensor Marca Banner Modelo QM30VT2, registros de tenencia (direcciones de registros con alias). ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 9. Sensor Marca Banner Modelo QM30VT2, cableado con colores para conexión física. Fuente:www.bannerengineering.com.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 10. Colocación adecuada en sitio del Sensor Marca Banner Modelo QM30VT2. . Fuente:www.bannerengineering.com .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 11. Sensor Banner instalado en el equipo. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 12. PLC MicroLogix 1400 .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 13. ControlLogix Allen Bradley.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14. Monitoreo en línea de las variables de temperatura y vibración (valores).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15. Valores de medición en línea de un destilador para vibración y temperatura. ..</i>	<i>42</i>
<i>Figura 16. Monitoreo en línea de las variables de temperatura y vibración (gráfica) .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 17. Gráfica de temperatura ampliada para los destiladores.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 18. Gráfica de vibración ampliada para los destiladores.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19. Reporte de inspeccion de vibracion en motor de un destilador .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 20. Reporte de inspeccion de vibracion en turbina de un destilador .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21. Grafica de temperatura en un destilador .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22. Grafica de vibracion en eje X de un destilador .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 23. Grafica de vibracion en eje Z en un destilador .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24. Programa de mantenimiento preventivo de la compañía.....</i>	<i>51</i>

## **Índice de tablas.**

<i>Tabla 1. Histórico de fallas en turbinas de destiladores MECO en los últimos 10 años: ...</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2. Definición de valores de alarma y disparo para control automático .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3. Definición de valores de alarma y disparo para control automático .....</i>	<i>45</i>

## **Resumen**

En el siguiente trabajo se pretende dar solución a una problemática presentada en una planta farmacéutica, específicamente en sus equipos de producción de agua destilada. Esta falla viene presentándose con frecuencia en los últimos años ocasionando sobrecostos de producción, por tal motivo se pretende desarrollar un sistema de monitoreo y control que permita detectar fallas tempranas en línea, utilizando un sensor que mide dos variables críticas del equipo, temperatura y vibración; estas señales se monitorean en línea utilizando un PLC conectado a un sistema SCADA donde se visualizan las señales y se establecen parámetros de alarma y control , con el fin de garantizar la toma de acciones preventivas y correctivas anticipadamente y evitar así, daños mayores en los equipos.

## **Abstract**

The following work aims to solve a problem presented in a pharmaceutical plant, specifically in its distilled water production equipment. This failure has been occurring frequently in recent years causing production cost overruns, for this reason it is intended to develop a monitoring and control system that allows detecting early failures online, using a sensor that measures two critical variables of the equipment, temperature and vibration; These signals are monitored online using a PLC connected to a SCADA system where the signals are displayed and alarm and control parameters are established, in order to guarantee the taking of preventive and corrective actions in advance and thus avoid major damage to the equipment. .

## **Introducción.**

En el presente trabajo se propone dar solución a una problemática presentada en los equipos de destilación de una planta farmacéutica los cuales son utilizados para generar agua destilada y distribuirla en sus diferentes procesos de producción.

En los últimos años se viene presentando un aumento en la frecuencia de fallas en las turbinas de los equipos, generando así reprocesos, paradas no programadas, aumento de los costos de reparación; afectando incluso la entrega de producto a los clientes.

Así las cosas, se pretende desarrollar un sistema de monitoreo y control en línea que permita detectar fallas tempranas en los equipos, lo que posibilitaría tomar acciones anticipadamente y realizar las correcciones respectivas con el fin de evitar que ocurra un daño mayor.

Para ello, se realizará un tratamiento del problema de investigación, en el cual se plantea el problema, se realiza la sistematización, se establecen en el objetivo general y específicos, posteriormente la metodología a aplicar y el marco teórico en el cual se soporta.

A continuación en el capítulo de resultados, se describe la manera como se desarrolla un sistema para verificar de manera rápida y precisa la subida de temperatura del aceite y el aumento de los valores de vibración en los destiladores; luego se realiza la programación estableciendo los límites de alerta y control con el fin de detectar tempranamente alguna anomalía en la operación del equipo; luego, con la ayuda del programa MAXIMO con el que cuenta la compañía, se establecen rutinas de mantenimiento preventivo con el fin de garantizar el cumplimiento del programa.

## **1. Planteamiento del problema.**

Los sistemas producción de agua en las plantas farmacéuticas son de vital importancia ya que representa uno de los sistemas más críticos. Existen varias calidades de agua que se utilizan en los diversos procesos de producción, dependiendo de la razón de ser de la empresa, es decir de los productos que fabrican o comercializan.

Para fabricar los productos que las empresas farmacéuticas producen a través del agua, es necesario realizar tratamiento de esta ya que el agua para fabricación posee una calidad diferente a la que se usa para consumo humano como lo es el agua potable.

El tratamiento de agua requiere una serie de etapas donde se realizan los diferentes procesos de filtración para producir un agua de calidad ya sea Purificada o Destilada.

El agua purificada se obtiene a través de un proceso de ósmosis inversa el cual utiliza unas membranas semipermeables donde se eliminan iones, moléculas y partículas provenientes del agua de alimentación. Esta calidad de agua es utilizada para la fabricación de productos cosméticos, medicinales de consumo y el agua para preparación de inyectables.

Por su parte, el agua destilada es agua en su máximo grado de pureza y es utilizada para producir inyectables, es decir productos que van a ser suministrados a los seres humanos o animales a través del sistema sanguíneo.

La producción de agua destilada se genera a través de un destilador, que es un equipo que realiza un proceso de evaporación del agua que ingresa por medio del calentamiento y posterior condensación del vapor generado; este vapor generado es el que se conoce como agua destilada o más comúnmente en la industria farmacéutica por sus siglas en inglés WFI

(Water For Injection).

Los destiladores que utilizan en la planta farmacéutica donde se realizará este trabajo de investigación serán marca MECO, los cuales producen agua destilada por compresión de vapor, que es un sistema que realiza un proceso de calentamiento del agua de alimentación proveniente a una temperatura ambiente y la lleva a su punto de ebullición al interior de un evaporador, este calentamiento es realizado por medio de un serpentín que en su interior está recirculando vapor. El evaporador, posee una serie de tubos por el que sube el vapor de agua hacia una recámara ubicada en la parte superior del equipo, en este punto se han eliminado todas las partículas que trae el agua como minerales, sólidos o microorganismos. El vapor generado por el proceso de ebullición es comprimido por una turbina y enviado a otra recámara en la parte inferior del equipo donde se encuentra una bomba centrífuga que bombea el agua por unos intercambiadores de calor para realizar el proceso de enfriamiento.

Durante el período 2019 – 2020, se han presentado fallas en las turbinas incrementando su frecuencia de aparición en estos equipos, pasando de un mantenimiento mayor a un año a realizar el mantenimiento en menos de 6 meses, lo cual ha generado paradas de producción. Esto implica pérdidas a nivel económico para la empresa ya que el reparar este tipo de fallas tiene un costo elevado porque los repuestos son importados, adicional los tiempos de reparación pueden oscilar entre 20 a 30 horas, contando con que los repuestos se encuentren en la planta; de no ser así los tiempos de parada se pueden prolongar hasta 3 días.

La parada de un equipo de estos implica una reprogramación de la producción, ocasionando tiempos muertos, vencimiento de materia prima, devolución de personal a la

casa e incumplimiento a los clientes por falta de producto.

## **2. Antecedentes.**

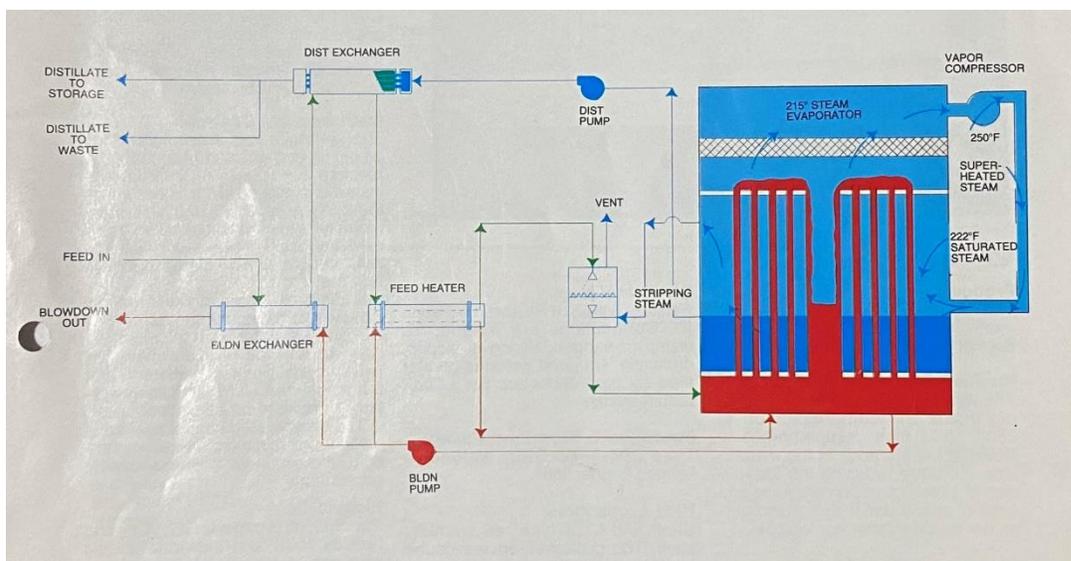
MechanicalEquipmentCompany, Inc. (MECO), es una compañía estadounidense fundada en 1928 con sede en Nueva Orleans, tiene más de noventa años de experiencia en construcción de equipos y sistemas de purificación de agua para proceso industriales, biofarmacéuticas, alimenticias y petroleras (MECO, 2021).

MECO Actualmente es el fabricante líder de sistemas de destilación por compresión de vapor, cuenta con la línea de productos más amplia de sistemas estándar y personalizados con capacidades de producción que van desde 400 GPH [1,514 LPH] a 7,200 GPH [27,255 LPH]. Los sistemas de compresión de vapor MECO producen agua para inyección (WFI) que cumple y excede todos los requisitos de cGMP y de acuerdo con todas las farmacopeas reconocidas (MECO, 2021).

En su boletín número 121C, MechanicalEquipmentCompany (s.f.), explica de manera resumida el proceso de destilación por compresión de vapor, el cual consiste en acumular agua en un compartimiento donde es calentada por un serpentín con el fin de evaporar y hacer pasar ese vapor de agua por medio de un banco de tubos a través de una cámara en la parte superior. Este vapor pasa a través de un eliminador de neblina donde se elimina el exceso de agua. El vapor puro es extraído por un compresor, donde la energía impartida da como resultado una compresión de vapor con aumento de presión y temperatura. Este vapor comprimido de mayor energía se descarga en el evaporador por la parte externa de los tubos, donde cede la mayor parte de la energía extra (calor latente) al agua dentro de los tubos, esto hace que se genere mayor cantidad de vapor y el proceso se repite

continuamente. El condensado de agua generado (agua destilada) es extraído por la bomba del destilador y se descarga a través de un intercambiador de calor de dos corrientes. El exceso de agua de alimentación que no se evapora es extraído por otra bomba que a su vez es bombeada dentro de otro intercambiador y evacuada del sistema. Tanto el destilador como las purgas se enfrían y el agua de alimentación se precalienta antes de entrar al evaporador. Estos intercambiadores minimizan el consumo de energía del sistema y eliminan la necesidad de agua de enfriamiento adicional, el sistema tiene la característica de funcionar continuamente una vez se ha iniciado, solo depende de suministros de agua de alimentación, aire comprimido, vapor y energía durante el proceso.

Como se puede observar a continuación en la imagen, se detalla el proceso de destilación descrito anteriormente:



Nota: El gráfico representa el proceso de destilación por compresión de vapor. Tomado de boletín 121C (p.1), por Mechanical Equipment Company, INC (s.f.)

Figura 1. Diagrama típico de flujo.

Pensar que el agua es una sustancia pura no es del todo cierto, ya que encontrarla en este estado, sucede en raras ocasiones. El agua generalmente está compuesta por 5 contaminantes como se destaca a continuación (Betancourt y Rubio, 1994):

- Material particulado
- Iones de sales
- Materias orgánicas
- Gases disueltos no iónicos
- Gases disueltos ionizables

Para evitar que alguno de estos compuestos con los que viene el agua en su estado natural pueda contaminar el producto que es utilizada en las plantas farmacéuticas es necesario realizar un pretratamiento previo o tratamiento al agua fuente, que es el agua que llega de la municipalidad o extraída desde el interior de la tierra por pozos subterráneos.

Existen diversos tratamientos para mejorar la calidad del agua fuente, por ejemplo, el intercambio iónico o el de ósmosis reversible son métodos utilizados para extraer impurezas del agua y poder utilizarla en alguno de los procesos industriales. La destilación por su parte elimina todas las impurezas orgánicas e ionizadas y las bacterias a diferencia del intercambio iónico extrae las impurezas iónicas, la ósmosis inversa es efectiva un 90% en la eliminación de contaminantes. Debido a esto se ha optado como el método más efectivo de obtener agua pura la destilación. El agua que es producida por un equipo de destilación contiene un total de materias sólidas disueltas de menso de 1mg/litro y se ajusta a los requerimientos de la farmacopea de los Estados Unidos para poder utilizarla en productos inyectables. En la industria farmacéutica esta agua debe ser no solo estéril sino también libres de sustancias pirógenas (Betancourt y Rubio. 1994).

De acuerdo con Betancourt y Rubio (1994), la historia del agua destilada se remonta a finales del siglo XIX. En 1878 el Hospital General de Massachusetts tenía inconvenientes para producir agua destilada, en ese tiempo los destiladores se importaban desde Francia, se quebraban con facilidad debido a que estaban contruidos en vidrio y eran muy frágiles. Un plomero llamado Robert Barnstead era afamado por ser un ingenioso artesano, por tal motivo se le encomendó la construcción de un equipo que destilara agua y que fuera mecánico. El destilador funcionó muy bien y el hospital compró otro; más tarde la Compañía General Motors en cabeza del químico Arthur D. Little exigió que para sus laboratorios de investigación industrial se utilizara el destilador Barnstead.

Después de trabajar en un grupo encabezado por Edinson en la compañía General Electric, Barnstead perfeccionó una destiladora eléctrica y debido al auge de la electricidad, estos equipos se convirtieron en el aparto de norma para producir agua pura (Betancourt y Rubio. 1994).

### **El problema del agua como recurso:**

El agua para consumo humano, industrial o farmacéutico no se puede garantizar siempre, aunque vivamos en un planeta rodeado por este preciado recurso. De los 1.400 millones de kilómetros cúbicos del mundo de agua, sólo el 2,5 por ciento es dulce y de ese porcentaje, el 69 por ciento no es accesible fácilmente, ya que está encerrada en casquetes polares y glaciares de montaña o almacenada en acuíferos subterráneos demasiado profundos para aprovecharla con la tecnología actual (Sears, 2006).

El ciclo hidrológico global deposita alrededor de 113.000 kilómetros cúbicos (27.110,14 millas cúbicas) de agua en las masas terrestres de la tierra en forma de lluvia y nieve

durante un período de un año. Aproximadamente 72.000 kilómetros cúbicos (17.273,72 millas cúbicas) se evaporan de nuevo a la atmósfera (durante el mismo año). Algunos expertos en agua sugieren que el agua dulce renovable disponible en el mundo se encuentra entre 9.000 y 14.000 kilómetros cúbicos (2.159,21 y 3.358,78 millas cúbicas) por año, debido a esto, el problema real es renovar o reponer el suministro de agua dulce (Sears, 2006).

Algunos países áridos en el Medio Oriente registran sólo unos pocos milímetros de precipitación cada año. El Reino de Arabia Saudita depende del agua subterránea existente para satisfacer el 75 por ciento de sus necesidades de agua. Estas reservas subterráneas, que se llenaron hace miles de años, tienen una recarga anual insignificante. En el último siglo, California (un estado semiárido) ha experimentado un rápido crecimiento urbano y desarrollo agrícola. Se han aprovechado todas las fuentes de agua dulce existentes y la recarga anual es muy limitada (Sears, 2006).

Como lo afirma Sears (2006), mirar y aprender de la naturaleza puede ser una ayuda invaluable en la búsqueda de respuestas. En la naturaleza el ciclo hidrológico es impulsado por el sol y esa energía es gratuita. Similar a lo que ocurre en la tierra con el ciclo del agua, donde el sol hace que se evapore el agua y esta llegue a la atmósfera para luego por condensación, esta se precipite y caiga como agua lluvia sucede en el proceso de destilación, la diferencia es que en este caso el agua debe calentarse a 212° F (100 ° C), esto con el fin de poder generar grandes cantidades de agua pura.

### **Destilación por compresión de vapor:**

Durante el proceso de destilación por compresión de vapor, el agua de alimentación se calienta en el intercambiador de calor. El vapor corre en sentido contrario al agua que ingresa al equipo para eliminar todos los gases y líquidos volátiles. Cuando el agua llega a la cámara del evaporador, esta es calentada por un serpentín hasta que se produce ebullición, el vapor generado sube por una serie de tubos hasta la parte superior donde se canaliza a través de un deshumidificador hacia una cámara circular donde se hace girar a aproximadamente 9000 RPM por una turbina la cual está siendo movida por un motor, este se encuentra acoplado a la turbina por medio de un juego de poleas. Este fenómeno centrífugo comprime el vapor y hace que las gotas de agua generadas regresen al evaporador en otra cámara donde es bombeada hacia el exterior por medio de una bomba centrífuga. Los materiales de construcción para garantizar que esta agua permanezca en su estado más puro libre de contaminantes como: virus, bacterias, minerales, gases, radiación y sales, debe ser en acero inoxidable 316, 316L o superior (Sears, 2006).

La destilación por compresión de vapor no depende de filtros o productos químicos para limpiar el agua. Los componentes están hechos de acero inoxidable de alta calidad y el agua pura y fresca se separa del agua de alimentación impura mediante barreras sólidas de acero inoxidable. La presión más alta está en el lado del agua pura para proporcionar protección contra fugas; el agua solo puede pasar del lado de alta presión o agua pura al lado de baja presión o impuro. Una fuga resultaría en menos agua de producto, pero no impura. Este es un verdadero sistema a prueba de fallas (Sears, 2006).

Los costos de producir agua destilada a gran escala son altos ya que requieren equipos sofisticados con materiales de construcción especiales para las tuberías, instrumentación utilizada para monitoreo y control de variables y la turbina. Los motores utilizados son de alta eficiencia. Las piezas de reemplazo son importadas. A pesar de que el costo energético de producir agua destilada por medio de compresión de vapor es relativamente eficiente hasta el momento, ya que no actualmente no hay una tecnología que lo genere a un menor costo, los consumos de las otras utilities para producirla sí. El agua requiere tratamiento previo para poder ser destilada y evitar de que el equipo se incruste y pierda eficiencia, el vapor que es otro suministro, es costoso de producir ya que se necesita una caldera para generarlo y por último, el aire comprimido que se utiliza para operar los sistemas neumáticos del equipo energéticamente es más costoso que la energía eléctrica. Otros costos que deben ser tenidos en cuenta son los de mantenimiento y operación ya que las personas que operan y mantienen estos sistemas deben contar con formación adecuada (Sears, 2006).

### **Breve historia del mantenimiento:**

En el proceso industrial vivido a finales del siglo XIX, el mantenimiento ha evolucionado pasando por diferentes etapas. Cuando iniciaba la revolución industrial, las personas encargadas de operar las máquinas hacían las labores de mantenimiento cuando estas fallaban. Con el paso del tiempo y la evolución de la tecnología las reparaciones se volvieron más complejas y el tiempo de dedicación para realizar estas tareas era más repetitivo. Debido a ello se empezaron a crear los departamentos de mantenimiento y las personas que trabajaban ahí, tenían actividades diferenciadas a los operarios de producción. Las actividades de mantenimiento se basaban en la corrección de fallas que se presentaban

en los equipos (García, 2010).

Luego de la Primera y Segunda Guerra Mundial, los departamentos de mantenimiento buscaban no solo darles solución a las fallas presentadas sino, actuar en modo preventivo para tratar de que estas no se produzcan, es allí donde aparece el concepto de confiabilidad, que no es más que evitar las pérdidas por averías y sus costos asociados. Aparece entonces el mantenimiento preventivo, predictivo y proactivo (García, 2010).

En los años 80, aparece la nueva ola del TPM (Mantenimiento Productivo Total) introduciéndose la idea de que es más rentable volver al modelo inicial donde los operarios se ocupaban de algunas tareas de mantenimiento como ajustes de piezas y/o tornillos, limpiezas, cambios y adecuaciones pequeñas con el fin de tener cero averías (García, 2010).

### **Importancia del mantenimiento:**

García (2012), plantea las siguientes preguntas:

¿Por qué debemos gestionar el mantenimiento? ¿No es más fácil y barato acudir a reparar un equipo cuando se averíe y olvidarse de los planes de mantenimiento, estudio de fallas, sistemas de organización, que incrementan notablemente la mano de obra indirecta? (p.3).

Según García (2012), realizar una gestión de mantenimiento es necesario por las siguientes razones:

- Con la competencia que viven actualmente las empresas, es indispensable bajara costos, optimizando el uso de la mano de obra y el consumo racional de materiales.
- La innovación de técnicas en mantenimiento como TPM, RCM, GMO,

mantenimiento predictivo (análisis de vibraciones, detección de fugas por ultrasonido, estudios amperimétricos, termografías, etc.), es indispensable estudiarlas y ver la aplicación que pueda tener en la empresa.

- Debe haber una alineación desde los departamentos con los objetivos planteados por la dirección.
- La calidad, la seguridad y las relaciones con el medio ambiente tienen una importancia muy alta en estos momentos para las empresas y la sociedad.

Por ende, es de vital importancia la gestión del mantenimiento, ya que un programa establecido y alineado con las actividades y políticas de las empresas genera una cultura de oportunidades de mejora lo que disminuye los costos de producción evitando reparaciones costosas.

A continuación, se presentan una revisión bibliográfica acerca de la aplicación del mantenimiento predictivo y monitoreo en línea para determinar fallas tempranas en equipos:

Para comenzar se toma el estudio realizado por Álvarez (2019), donde presenta un desarrollo de investigación en la Central Hidroeléctrica Santa Teresa, donde el objetivo es demostrar que el mantenimiento predictivo a través del monitoreo y análisis de vibraciones a las turbinas tipo Francis bajo el criterio de la norma ISO 10816, provee confiabilidad y a su vez reducción de costos por fallas.

Como conclusión Álvarez (2019), demostró que luego de realizar el análisis económico que la instalación del equipo, al término de cuatro años representa una ganancia del más del 60 % de lo inicialmente invertido. Se estima que la instalación tendría una vida útil de no

menos de 10 años. La integración de un sistema de monitoreo continuo de las vibraciones daría confiabilidad del estado de las turbinas y propiciaría la reducción de costos de mantenimiento correctivo ya que precisaría el momento oportuno para una intervención de estas.

Un segundo trabajo de investigación desarrollado por Leyton (2018), en donde plantea elaborar e implementar un plan de mantenimiento predictivo de la línea de panes en la empresa Panificadora Bimbo S.A. que permita volver confiable al sistema de vapor y así poder reducir las pérdidas de hogazas de pan.

Los resultados obtenidos por Leyton (2018), al realizar la implementación obtuvo los resultados esperados, la referencia inicial eran los indicadores de mantenimiento, en los cuales se tuvo una reducción del 30% de las fallas en la línea de panes, evidenciando una mejora en el indicador IPFM volviendo confiable el sistema de vapor, igualmente se vio una mejora en los indicadores de producción aumentando de forma significativa la eficiencia.

En cuanto a la investigación realizada para la implementación de un analizador de vibraciones para el mantenimiento predictivo en sistemas mecánicos, Guerra (2020), eligió un sensor de aceleración analógico para medir las vibraciones producidas, se digitalizó la señal utilizando un circuito de señales analógicas a digitales para ser procesadas por un microcontrolador y poder visualizar la gráfica de las frecuencias en línea.

Guerra (2020), concluye que para los sistemas mecánicos es posible proporcionar un estudio de vibraciones a través de sensores y monitoreo en línea y se puede realizar un mantenimiento predictivo de acuerdo con los resultados obtenidos.

Por su parte González y Sánchez (2019), en su trabajo de investigación para diseñar e implementar un sistema automático para el control y monitoreo de una planta prototipo de refrigeración con compresores en paralelo, el cual incluye dispositivos electrónicos de automatización como sensores, PLC y HMI, lo que permite de manera rápida y confiable a controlar mejor la temperatura de los sistemas de refrigeración.

Como conclusión, González y Sánchez (2019) afirman que con la implementación de la interfaz HMI se tuvo la posibilidad de monitorear la presión y esta al sobrepasar el set point establecido activaba una alarma indicando el comportamiento anómalo de los compresores. Esto generó ahorros significativos ya que los compresores trabajaban de acuerdo a la demanda de producción, esto es muy valioso ya que un sistema de monitoreo en línea puede tener control de un proceso.

La empresa Degeremcia S.A. realiza monitoreo manual de la temperatura para sus procesos productivos, lo que causa pérdidas económicas y de calidad en los productos que comercializa. La inspección de fallas es realizada por personal operativo el cual también genera un costo de oportunidad ya que ese tiempo puede ser implementado en otras labores más productivas. Por tal motivo, instalaron un sistema diseñado por medio de hardware y software libre realizando medición en línea de la temperatura de la cámara de refrigeración y cuando se encuentra fuera de parámetros, este envía un mensaje para alertar de una posible falla del sistema (Mite, 2018).

Mite (2018), en su trabajo de investigación de un sistema de monitoreo de temperatura en cámaras de refrigeración para la empresa Degeremcia S.A. pudo concluir que comprobar que el rendimiento de un prototipo realizado en campo es similar a sistemas más complejos que pueden encontrarse en el mercado, obteniendo un costo mucho más económico y

adicional pudieron resolver el problema del monitoreo en línea de la temperatura para las cámaras de refrigeración.

Daneels&Salter (1999), en su conferencia realizada en Italia, explicaban las ventajas de un sistema de control de procesos y adquisición de datos, herramienta muy utilizada en la industria marcando en su momento una tendencia en sistemas de tecnología de la información, sistemas que son hoy en día vanguardistas en los procesos industriales. En este caso explican las ventajas de controlar los procesos a través de un SCADA (por sus siglas en inglés (Supervisory Control And Data Acquisition), el cual Como su nombre indica, no es un sistema de control total, sino que se centra en el nivel de supervisión. Como tal, es un paquete puramente de software que se coloca sobre el hardware con el que se interconecta, en general a través de controladores lógicos programables (PLC) u otros módulos de hardware comerciales.

### **3. Justificación.**

La planta farmacéutica donde se realizará el presente trabajo de investigación se dedica a la fabricación y venta de soluciones renales e intravenosas, productos que tienen altos estándares de calidad debido a su criticidad, ya que son utilizados para el tratamiento de enfermedades tales como hemofilia, enfermedades renales y afecciones crónicas agudas.

Un desabastecimiento de producto asociado con el fallo a los destiladores MECO puede producir un impacto negativo en sus clientes debido a que los tratamientos son necesarios para mantener la vida de los pacientes a los que atienden. Teniendo en cuenta lo anterior, se debe tener presente que es de vital importancia mantener los equipos en óptimas condiciones, para evitar paradas de producción las cuales acarrearán costos altos a la

operación de la compañía, desabastecimiento de productos como Solución Salina, Hemosoles, Solución Renal y Agua estéril, producidas en el área de soluciones que cuenta con cuatro líneas de llenado.

Adicional a esto el plan de producción referente a la disposición de personal necesario para el turno, se ve afectado, gracias a que los colaboradores deben quedarse sin trabajar hasta que se restablezca el sistema de generación de agua para inyección. Posterior a la reparación del fallo en la turbina el área de Calidad debe realizar el proceso de liberación química y microbiológica, esto implica utilizar personal adicional para cubrir esta necesidad, de igual forma se evidencia un incremento en los costos por los reactivos químicos y las placas microbiológicas utilizadas.

Los indicadores del área de Sala de Máquinas se ven afectados al momento de presentarse una falla de este tipo ya que impacta directamente el indicador de Litros producidos, el cual el año pasado estuvo disminuido en un 3% de cuarenta millones de litros, en los meses de junio a diciembre, versus la proyección de producción equivalente a dejar de producir un millón doscientos mil litros.

Teniendo en cuenta lo anterior es importante implementar un sistema que permita disminuir las paradas de producción asociadas a fallos presentados en los destiladores MECO por deterioro en las turbinas.

#### **4. Objetivos.**

##### **■ Objetivo general.**

Desarrollo de un sistema en línea para predecir fallos en destiladores de agua por deterioro en las turbinas.

##### **■ Objetivos específicos.**

- Implementar un sistema de monitoreo en línea de la temperatura de aceite de los destiladores.
- Implementar un sistema de control en línea que permita detectar fuera de límites de las condiciones de operación del sistema de lubricación y vibración del equipo.
- Desarrollar un plan de mantenimiento predictivo que permita corregir fallas tempranas en las turbinas.

#### **5. Marco teórico.**

El mantenimiento, tal como lo plantea García (2010), es un conjunto de técnicas que tienen el objetivo principal de conservar equipos e instalaciones con el mejor rendimiento y durante el mayor tiempo posible. Esta definición es compartida por Garrido (como se citó en Leyton, 2018), quien expone que el mantenimiento es un grupo de actividades que buscan la más alta disponibilidad de equipos e instalaciones, con el máximo rendimiento posible.

Por su parte, Daniel (como se citó en Leyton 2018) plantea que el objetivo del mantenimiento es conservar todos los bienes que afectan de manera directa o indirecta los servicios, en las mejores condiciones posibles con un adecuado nivel de confiabilidad,

calidad y al menor costo posible.

El mantenimiento, no solo implica mantener las maquinas en óptimas condiciones, es de igual forma, el encargado de velar por las instalaciones, dentro de las cuales encontramos la iluminación, redes de computación, sistemas de energía, agua, aire comprimido, aire acondicionado, calles internas, pisos, depósitos entre otros, por lo cual es de vital importancia que el personal se encuentre en capacitación constante con el objetivo de que siempre se encuentren actualizados (Daniel, 2005, como se citó en Leyton 2018).

Durante la segunda guerra mundial, surge el concepto de fiabilidad, por lo cual las áreas y/o departamentos de mantenimiento no solo se enfocaban en solucionar las fallas de los equipos, sino que se empezaron a evidenciarla importancia de prevenirlas y actuar en pro de que no se produjeran, buscando personal que se centraran en realizar actividades que previnieran la futura aparición de fallas (García, 2010).

Según lo expuesto por García (2010), en la década de los ochenta (80s), se introduce la idea, con el objetivo de disminuir los costes de mantenimiento indirectos, la necesidad de implementar un sistema rentable como el TPM o mantenimiento producto total, cuyo principal objetivo era conseguir que se presentaran cero averías, y en donde tareas que eran realizadas inicialmente por personal de mantenimiento pasan a ser realizadas por personal de producción. Las tareas que según este sistema realizarían el personal de producción son limpieza, lubricación, ajustes, reaprietes de pequeños tornillos y reparaciones pequeñas. Con esto el operario de producción iba a estar más involucrado con el cuidado de la máquina.

García (2010), expone que tradicionalmente han existido 5 tipos de mantenimiento. El

primero de estos hace referencia al mantenimiento correctivo, el cual hace referencia a un grupo de tareas designadas para corregir defectos que se van presentando en los equipos. En segundo lugar, se encuentra el mantenimiento preventivo, el cual tiene el objetivo de mantener el nivel de servicio determinado en los equipos, identificando los puntos vulnerables o de posibles fallas, para programar de manera oportuna las correcciones que sean necesarias. El tercer tipo de mantenimiento hace referencia al mantenimiento predictivo, el cual busca conocer e informar permanentemente sobre el estado y operatividad de instalaciones y maquinas, por lo cual es necesario identificar variables físicas cuya variación sean indicadores de problemas que puedan estar afectando al equipo o maquinaria (temperatura, vibración, consumo de energía, entre otras). El cuarto tipo de mantenimiento es el mantenimiento cero horas, en donde su principal tarea u objetivo es realizar una revisión de los equipos en intervalos programados previo a que aparezca un fallo; esta revisión implica dejar al equipo a cero horas de funcionamiento o como si esta estuviera nueva. El último tipo de mantenimiento es el mantenimiento en uso, el cual es un mantenimiento básico realizado por los mismos usuarios, siendo este la base del funcionamiento del TPM.

Autores como Guerra (2020) plantea que el mantenimiento predictivo tiene como principal objetivo conocer la condición de la máquina, determinando de esta manera que su operación sea más segura y eficiente. Por medio de este tipo de mantenimiento, se buscan obtener ahorros de coste sobre la rutina, teniendo como base el tiempo del mantenimiento preventivo, debido a que las tareas se realizarían únicamente cuando sea necesario.

Royo et al. (como se citó en Álvarez, 2019) afirma que:

“El programa de mantenimiento predictivo sigue una secuencia lógica desde que se

detecta un problema, se estudia, se encuentra su causa, y finalmente se decide la posibilidad de corregirlo en el momento oportuno con la máxima eficiencia. Esto puede definirse en los siguientes pasos: detección, análisis y corrección.” (P.4)

Por su parte White (como se citó en Álvarez, 2019), amplía la definición de mantenimiento predictivo, indicando que esta técnica se basa en percibir los síntomas de las maquinas y/o equipos a través de pruebas no destructivas, como lo es el análisis de aceite, desgaste de partículas, medición de temperatura y monitoreo de vibraciones.

Finalmente, se debe tener en cuenta que existen variables que repercuten en el desempeño de los sistemas, la cuales se deben tener presentes en el proceso de mantenimiento. La primera de estas hace referencia a la fiabilidad la cual es la probabilidad de que instalaciones o equipos tenga un desempeño sin fallos, durante un periodo de tiempo determinado y bajo unas condiciones específicas. La disponibilidad, es la segunda variable a tener en cuenta, debido a que esta hace referencia a la proporción de tiempo durante la cual un equipo o maquinaria estuvo en condiciones de ser usado, por lo cual, se debe tener en cuenta la frecuencia de las fallas y el tiempo que se tomó para reanudar el servicio. Por su parte, la mantenibilidad hace referencia a la probabilidad de que una maquina o equipo pueda ser reparada con una condición específica en un periodo de tiempo, en otras palabras, es la facilidad que tiene una maquina o equipo para que se pueda realizar mantenimiento, esto va a depender del diseño, duración y costo. Finalmente tenemos el costo, el cual implica optimizar los procesos para mantener los precios bajos, teniendo en cuenta la seguridad y la calidad (Leyton, 2018).

## 6. Marco conceptual.

### ■ Vibración

Es la oscilación de un objeto con respecto a su posición de reposo. (Olarte, Botero y Cañon, 2010, pag 223).

### ■ Destilación por compresión de vapor

En la destilación por compresión de vapor, el agua de alimentación se calienta en el intercambiador de calor. El vapor corre en sentido contrario al agua que ingresa al equipo para eliminar todos los gases y líquidos volátiles. Cuando el agua llega a la cámara del evaporador, esta es calentada por un serpentín hasta que se produce ebullición, el vapor generado sube por una serie de tubos hasta la parte superior donde se canaliza a través de un deshumidificador hacia una cámara circular donde se hace girar a aproximadamente 9000 RPM por una turbina la cual está siendo movida por un motor, este se encuentra acoplado a la turbina por medio de un juego de poleas. Este fenómeno centrífugo comprime el vapor y hace que las gotas de agua generadas regresen al evaporador en otra cámara donde es bombeada hacia el exterior por medio de una bomba centrífuga (Sears, 2006).

### ■ Mantenimiento predictivo

“El mantenimiento predictivo consta de una serie de ensayos de carácter no destructivo orientados a realizar un seguimiento del funcionamiento de los equipos para detectar signos de advertencia que indiquen que alguna de sus partes no está trabajando de la manera correcta. A través de este tipo de mantenimiento, una vez detectadas las averías, se puede, de manera oportuna, programar las correspondientes reparaciones sin que se afecte el proceso de producción y prolongando con esto la vida

útil de las máquinas” (Olarte et al., 2010, pag 224).

## ■ SCADA

“SCADA es un acrónimo por Supervisory Control And Data Acquisition (control y adquisición de datos de supervisión). Los sistemas SCADA utilizan el computador y las tecnologías de comunicación para automatizar el monitoreo y control de procesos industriales. Estos sistemas son partes integrales de la mayoría de los ambientes industriales complejos o muy geográficamente dispersos ya que pueden recoger la información de una gran cantidad de fuentes muy rápidamente, y la presentan a un operador en una forma amigable. Los sistemas SCADA mejoran la eficacia del proceso de monitoreo y control proporcionando la información oportuna para poder tomar decisiones operacionales apropiadas.” (Chacon et al., 2001, Pag 6).

## 7. Metodología.

### ■ Tipo de estudio.

Teniendo en cuenta que se propone estudiar una problemática, se realizará una implementación y verificación basadas en investigaciones, estudios, tesis etc., el enfoque de investigación es exploratorio y experimental.

Dado que se pretende solucionar una problemática presentada de daño prematuro en las turbinas de los equipos que producen agua destilada para inyectables en el área de ingeniería de la planta de producción farmacéutica antes mencionada, , el propósito de esta investigación es aplicada ya que se caracteriza porque busca la

aplicación de los conocimientos adquiridos.

El enfoque de la investigación es explicativa experimental debido a los siguientes:

El nivel de conocimiento que se adquiere en esta investigación es explicativo ya que no sólo describe o se acerca a un problema, sino que intenta encontrar las causas de este.

De acuerdo con los medios utilizados para obtener los datos, la investigación se clasifica en experimental porque se obtiene la información de la actividad intencional realizada por el investigador. Se utilizan instrumentos de precisión y experimentación.

#### **■ Fuentes y técnicas.**

Para realizar esta investigación, las fuentes utilizadas son las secundarias ya que la mayoría de información extraída para obtener una solución son proyectos de investigación o tesis asociadas a la problemática presentada.

### **8. Desarrollo.**

Para la realización del proyecto y cumplir con los objetivos específicos, se hizo un análisis de la problemática presentada que se basaba en el daño de los rodamientos de las turbinas con una frecuencia menor al histórico establecido, ya que en los dos últimos 2 años se venía presentando falla constante en los equipos y

no se podía detectar a tiempo y programar su cambio, a continuación, se muestran los históricos de fallas en los equipos de destilación:

*Tabla 1.* Histórico de fallas en turbinas de destiladores MECO en los últimos 10 años:

AÑO	DESTILADOR A	DESTILADOR B	DESTILADOR C	DESTILADOR D
2010	2	1	1	1
2011	0	1	1	2
2012	1	1	1	0
2013	1	0	1	1
2014	1	2	1	1
2015	1	1	2	1
2016	1	1	0	1
2017	1	1	1	1
2018	1	1	1	1
<b>2019</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>2020</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
2021	1	1	1	1

Fuente: El autor, basado en datos internos recopilados en planta.

Con base en esta información se realizó un análisis de causa raíz para determinar la causa del problema y poder tomar acciones inmediatas para su solución, ya que operativamente los costos por reparaciones se venían aumentando.

A continuación, se muestra el análisis causa raíz utilizando como herramienta el diagrama de ISHIKAWA para determinar las posibles causas del problema:

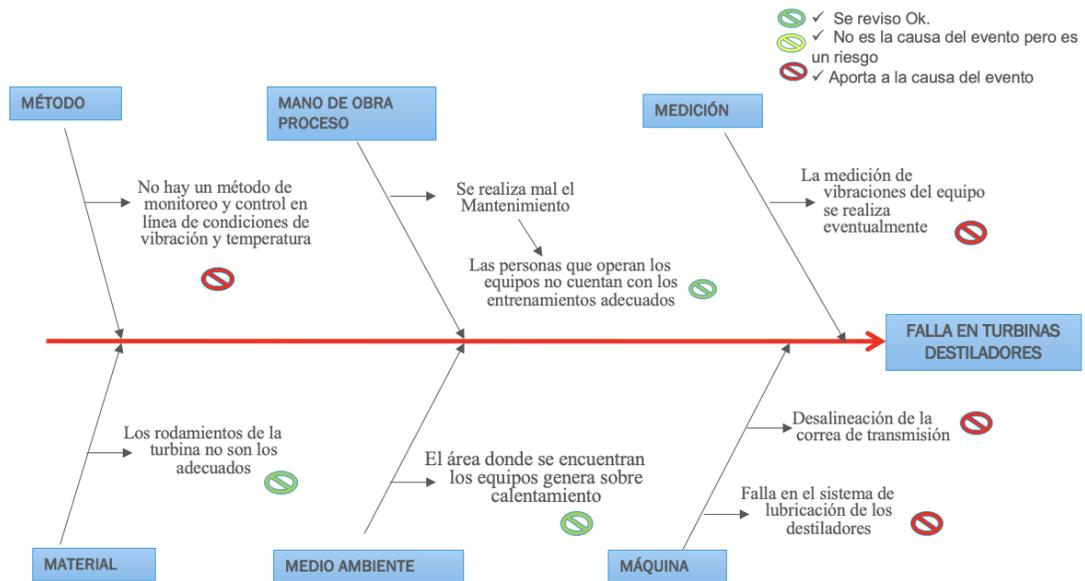


Figura 2. Diagrama Ishikawa para encontrar la causa del problema. Fuente: elaboración propia.

Como causas determinantes al problema se encontraron las siguientes:

- No hay un método de monitoreo y control en línea de condiciones de vibración y temperatura.
- La medición de vibraciones del equipo se realiza eventualmente.
- Desalineación de la correa de transmisión.
- Falla en el sistema de lubricación de los destiladores.

Como se puede observar, la desalineación de la correa de transmisión y la falla en el sistema de lubricación son fallas que originan un daño en los rodamientos de la turbina, pero estas fallas son causadas por otra por lo tanto no se tienen en cuenta como las más probables. Por su parte la medición eventual de las condiciones de vibración del equipo si puede dar un diagnóstico del estado de la alineación del equipo o si el rodamiento va a fallar dependiendo las frecuencias que registre el monitoreo periódico de vibraciones, lo que no se puede determinar es si el sistema

de lubricación presenta un daño. Para finalizar se estableció como causa probable que no existe un método establecido en la planta para verificar en línea de las condiciones de vibración y temperatura del equipo que son las dos causales que me pueden generar un daño en los rodamientos de las turbinas.

Para resolver el problema de la falla continua de los rodamientos de las turbinas de los destiladores MECO en la planta farmacéutica se realizó lo siguiente:

**■ Implementación de un sistema de control en línea que permita detectar fuera de límites de las condiciones de operación del sistema de lubricación y vibración del equipo.**

Para poder realizar el sistema de control en línea y poder detectar los fuera de límites de las condiciones de operación se procede a realizar la programación en el programa Rslogix 500 que es un software utilizado para configurar y programar los controladores Logix basados en PLCs Allen Bradley el cual trabaja bajo el sistema operativo Windows.

A continuación, se muestra el GRAFCET del sistema de control implementado en el PLC y visualizado desde el computador

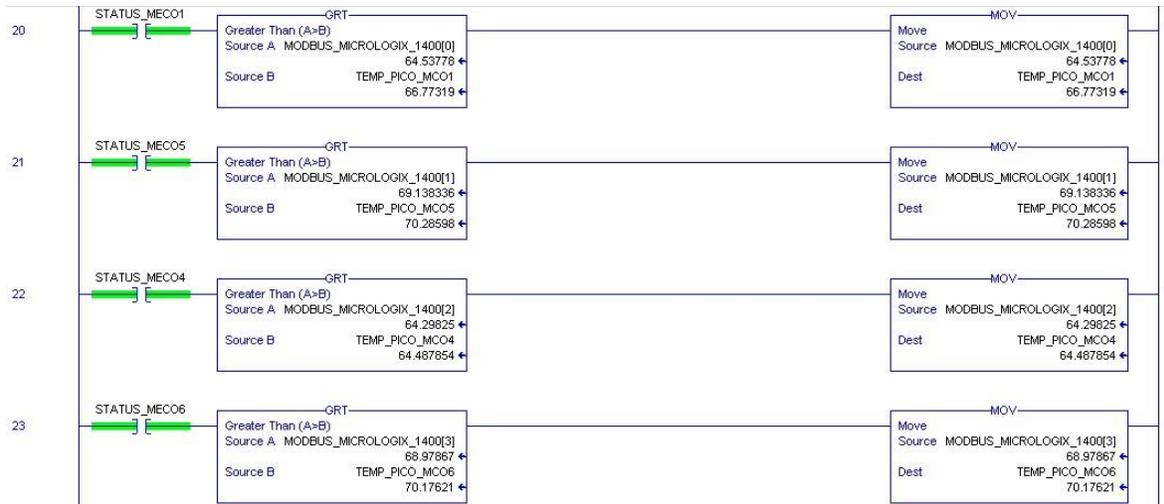


Figura 3. GRAFCET parte 1 del sistema de control.

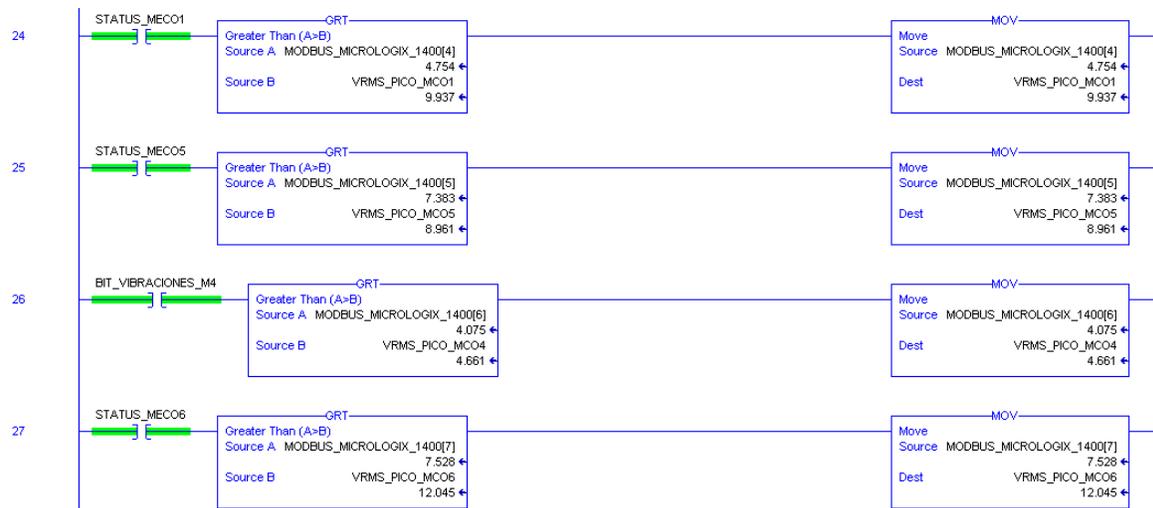


Figura 4. GRAFCET parte 2 del sistema de control.

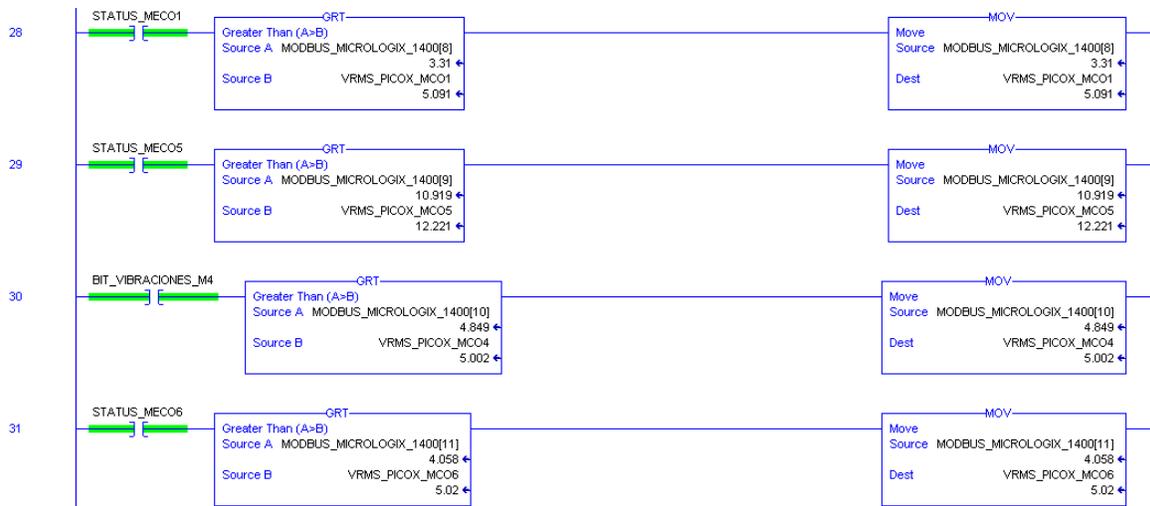


Figura 5. GRAFCET parte 3 del sistema de control.



Figura 6. GRAFCET parte 4 del sistema de control.

Esta programación permite obtener todos los datos recogidos por el sensor y funciona realizando un mapeo desde el sensor hasta el PLC (Micrologix 1400), llevando los datos hasta el PLC principal (Contrologix), se toma el dato de la temperatura y vibración; guarda el valor más alto, si durante el día no se supera

dicho valor el programa lo guarda y lo muestra al día siguiente como la temperatura o vibración más alta obtenida en el día anterior, el mismo proceso se hace para cada destilador.

### **■ Implementación de sistema de monitoreo en línea de la temperatura de aceite y valores de vibración de los destiladores**

Para implementar el sistema de monitoreo en línea de la temperatura de aceite de lubricación y los valores de vibración en los destiladores, se verificó en el mercado y se escogió el Sensor Banner QM30VT2 el cual entrega medición de temperatura y vibración en un solo paquete, facilitando así, las necesidades con un solo sensor ya que no se requiere tener dos sensores para la captura de las mediciones.

Además de eso, el sensor cuenta con detección de vibraciones de doble eje de hasta 4 kHz de ancho de banda, la medición de vibración y temperatura es de alta precisión, se conecta a u cualquier red Modbus lo que facilita la configuración e instalación, el dispositivo es pequeño lo que facilita la instalación.

El sensor es capaz de monitorear continuamente el estado de la máquina, este tipo de dispositivos detecta fallas tempranas de los rodamientos, desequilibrio o desalineación, lo que ayuda a identificar y predecir fallas en componentes rotativos como los son las turbinas. En la *Figura 3 se aprecia el sensor seleccionado a diferencia de los otros mostrados, por las justificaciones enunciadas anteriormente.*

## Models

Model	Housing Type	Connections and Cable	I/O
QM30VT2-SS-9M	316L Stainless Steel	9.1 m (30 ft) Flying Leads	Vibration and temperature via RS-485 Modbus
QM30VT2-SS-QP		150 mm (6 in) cable with a 5-pin M12 male quick disconnect (QD)	
QM30VT2	Aluminum	2.09 m (6.85 ft) cable with a 5-pin M12 male quick disconnect (QD)	
QM30VT2-QP		150 mm (6 in) cable with a 5-pin M12 male quick disconnect (QD)	

Figura 7. Modelo Sensor Marca Banner escogido para el monitoreo en línea.

Fuente: [www.bannerengineering.com](http://www.bannerengineering.com)

El software de configuración del sensor ofrece una manera fácil de administrar los parámetros del sensor, recuperar datos y mostrar visualmente los datos del sensor o de varios sensores diferentes. El software de configuración del sensor se ejecuta en cualquier computador que utilice el sistema operativo Windows.

Modbus Register Alias Address	Modbus Register Address	Description	I/O Range		Holding Register Representation	
			Min	Max	Min (dec)	Max (dec)
45201	42401	Z-Axis RMS Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45202	42403	Z-Axis RMS Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45203	40049	Temperature (°F) <sup>3</sup>	-327.68	327.67	-32768	32767
45204	40043	Temperature (°C) <sup>3</sup>	-327.68	327.67	-32768	32767
45205	42451	X-Axis RMS Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45206	42453	X-Axis RMS Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45207	42407	Z-Axis Peak Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45208	42457	X-Axis Peak Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45209	42405	Z-Axis Peak Velocity Component Frequency (Hz) <sup>4, 5</sup>	0	6553.5	0	65535
45210	42455	X-Axis Peak Velocity Component Frequency (Hz) <sup>4, 5</sup>	0	6553.5	0	65535
45211	42406	Z-Axis RMS Acceleration (G) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45212	42456	X-Axis RMS Acceleration (G) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45213	42409	Z-Axis Kurtosis <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45214	42459	X-Axis Kurtosis <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45215	42408	Z-Axis Crest Factor <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45216	42458	X-Axis Crest Factor <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45217	42402	Z-Axis Peak Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45218	42404	Z-Axis Peak Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45219	42452	X-Axis Peak Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45220	42454	X-Axis Peak Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45221	42410	Z-Axis High-Frequency RMS Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45222	42460	X-Axis High-Frequency RMS Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
	46101	Baud	0=9.6k, 1=19.2k (default), 2=38.4k			
	46102	Parity	0=none (default), 1=odd, 2=even			
	46103	Modbus Slave Address	1 (default) through 247			
	42601	Rotational Speed (RPM) (default = 1725 RPM) -- Used in vibration spectral band measurements	0	65535	0	65535
	42602	Rotational Speed (Hz) (default = 29 Hz) -- Used in vibration spectral band measurements	0	65535	0	65535

Figura 8. Sensor Marca Banner Modelo QM30VT2, registros de tenencia (direcciones de registros con alias). Fuente: [www.bannerengineering.com](http://www.bannerengineering.com)

Como se puede observar en la figura 4, las direcciones de registro con alias son configurables por el usuario. Los registros direccionados con alias se secuencian para leerse con una sola lectura de Modbus. De forma predeterminada, los datos se muestrean cada cinco segundos, tiene la opción de configurar una frecuencia de muestreo mínima de tres segundos, esta puede ser configurada si se necesita un valor diferente.

En la figura 5 se aprecian la codificación de colores de los cables para realizar la conexión física del sensor, este utiliza además de los colores una configuración numérica de cada uno. Este sensor está diseñado para usarse como esclavo Modbus. también puede conectarse a cualquier red Modbus RS-485, incluyendo Radios de datos MultiHop compatibles.

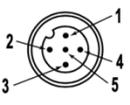
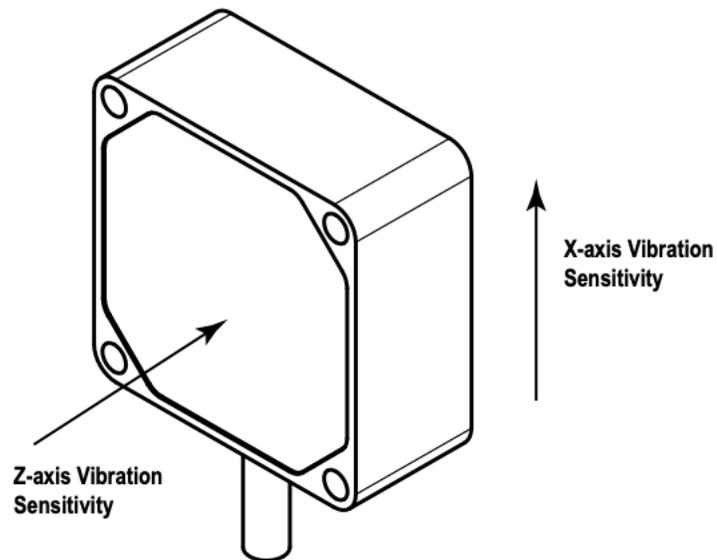
5-pin M12 Male Connector	Pin	Wire Color	Sensor Connection
	1	brown (bn)	Power IN (+): 10 to 30 V DC
	2	white (wh)	RS485 / D1 / B / +
	3	blue (bu)	Ground (-)
	4	black (bk)	RS485 / D0 / A / -
	5	gray (gy)	Not Used. When updating the firmware, you must ground pin 5 by connecting it to pin 3.

Figura 9. Sensor Marca Banner Modelo QM30VT2, cableado con colores para conexión física. Fuente:www.bannerengineering.com

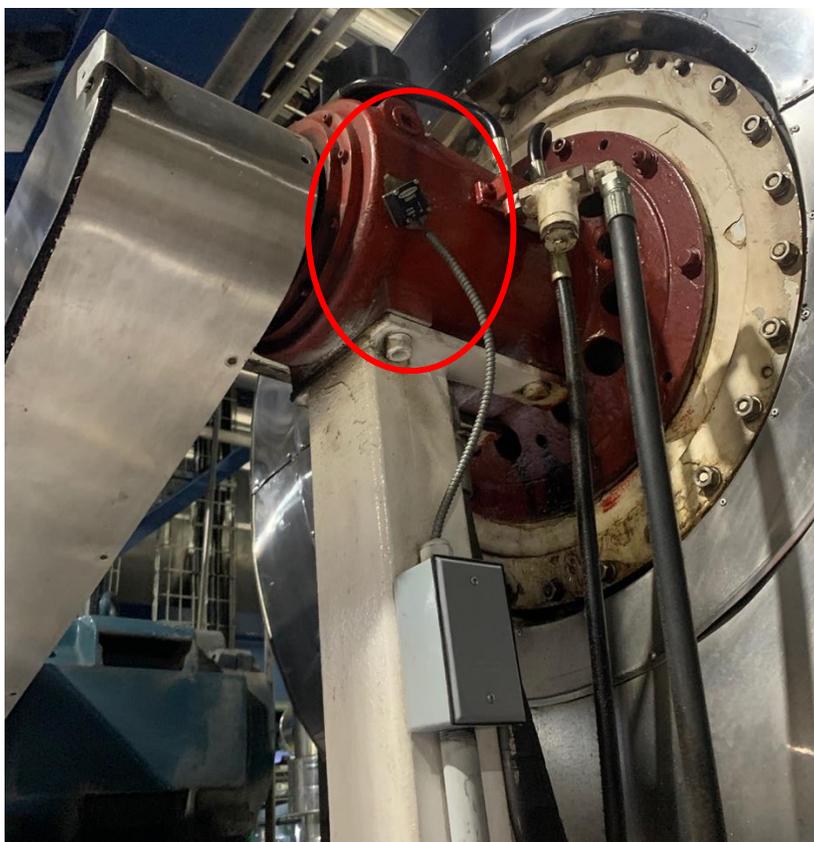
Como se observa en la figura 6, la instalación de los sensores de vibración, tienen una indicación de eje X y Z en la parte frontal del sensor. El eje Z va en un plano a través del sensor mientras que el eje X es paralelo al sensor. Por tal motivo y para tener mejores resultados de medición, el proveedor recomienda instalar el eje X en línea con el eje del motor axialmente, y el eje Z que entre o atravesase el motor radial.



*Figura 10. Colocación adecuada en sitio del Sensor Marca Banner Modelo QM30VT2. .*  
Fuente:www.bannerengineering.com

Para obtener los mejores resultados, el fabricante recomienda instalar el sensor lo más cerca posible a los rodamientos del motor. Si esto no es posible, instale el sensor en una superficie que esté en conexión rígida con vibración características del motor. El uso de una cubierta protectora u otra ubicación de montaje flexible puede dar como resultado una precisión reducida o una capacidad reducida para detectar ciertas características de vibración.

De acuerdo con esto, el sensor se instala de la siguiente manera:



*Figura 11. Sensor Banner instalado en el equipo.*

Luego de la escogencia del sensor y después de garantizar que cumple con las necesidades que se requieren para la obtención de los datos se procede a la implementación del PLC, para este caso se utilizó un Micrologix 1400 de Allen Bradley el cual es ideal para controlar sistemas simples y máquinas, adicionalmente en la compañía tienen estandarizados para sus procesos de automatización, PLCs de esta marca a nivel local e internacional, estos equipos cuentan con conexión Ethernet/IP para mensajería peer to peer, navegador web y capacidades de email; cuenta con un panel LCD incorporado para mejor interacción con el dispositivo. El controlador cuenta con 20 entradas 24 VDC 12 salidas relé, alimentación 110/220 VAC, el cual se conecta a un controllogix de la misma marca, a continuación, se observa el sistema instalado:



Figura 12. PLC MicroLogix 1400



Figura 13. ControlLogix Allen Bradley.

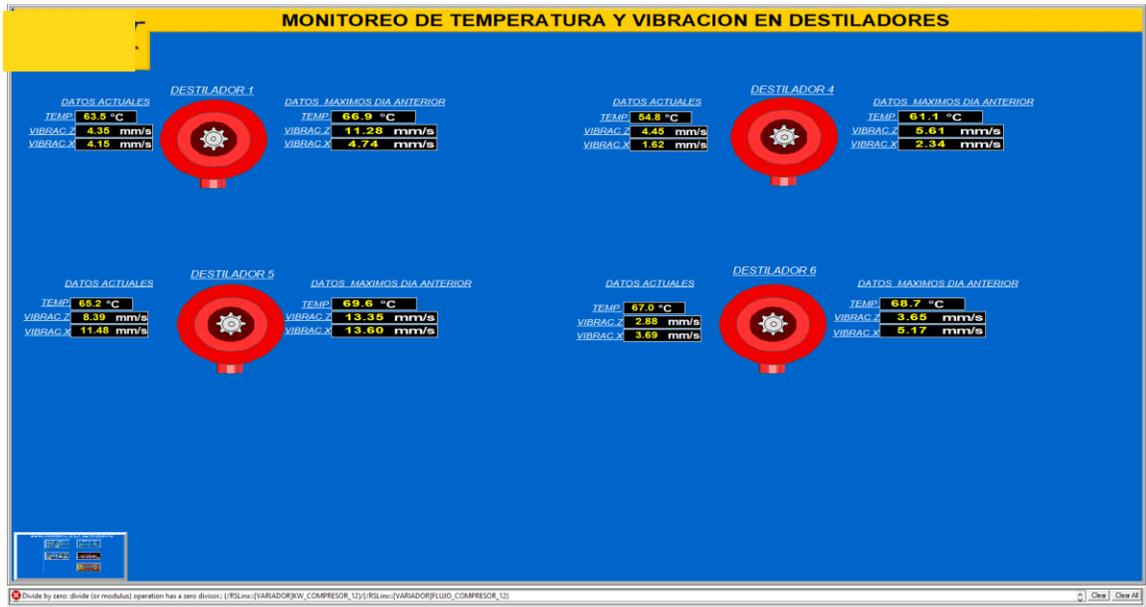


Figura 14. Monitoreo en línea de las variables de temperatura y vibración (valores)

En la figura 10, se muestra la pantalla de medición configurada en el SCADA donde se encuentra la medición en línea de cada uno de los destiladores y guardando los datos máximos del día anterior de cada uno para observar el comportamiento del equipo. En la figura 11, se muestra con mayor detalle el monitoreo de los datos medidos de uno de los destiladores, para este caso se tienen la temperatura en grados Celsius y la vibración alcanzada en cada eje por la turbina en un período de tiempo dado, en este caso milímetros por segundo (mm/s):



Figura 15. Valores de medición en línea de un destilador para vibración y temperatura.

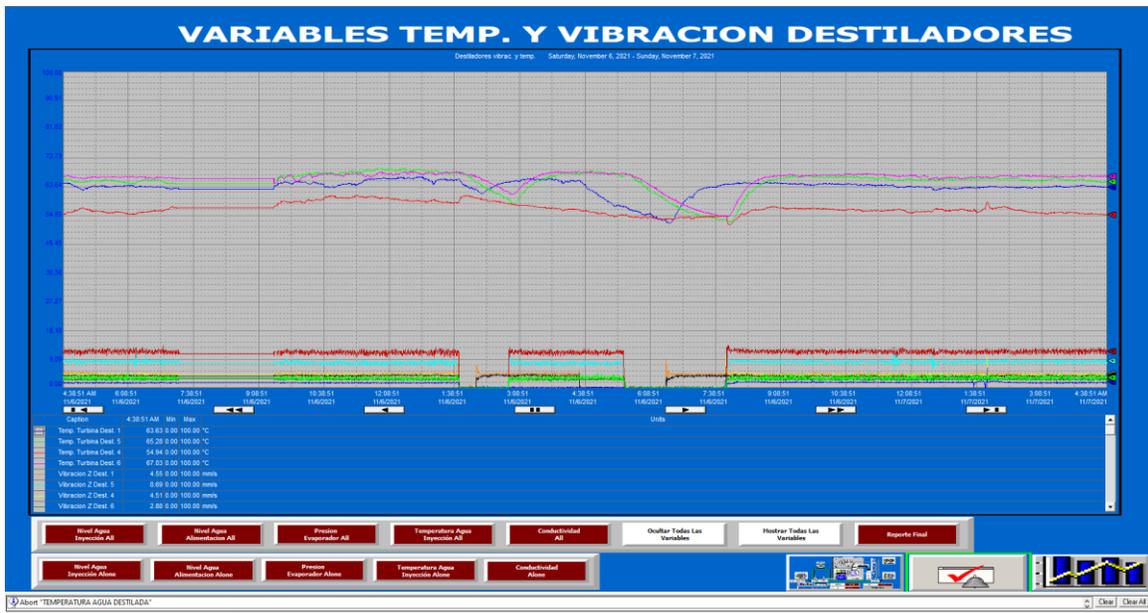


Figura 16. Monitoreo en línea de las variables de temperatura y vibración (gráfica)

Como puede observarse en la figura 12, se muestra la pantalla de medición configurada en el SCADA donde se encuentra la medición en línea de cada uno de los destiladores esta vez de forma gráfica para vibración y temperatura.

En la figura 12, se encuentran dos gráficas, la gráfica de la parte superior, muestra los valores de temperatura y los rizados en la parte inferior, muestran los valores de temperatura. Esta configuración fue realizada de esta manera para poder visualizar el comportamiento de las dos variables y poder visualizar cambios simultáneos.

En la figura 17, se muestra con mayor detalle la gráfica de temperatura de los datos medidos de los destiladores y en la figura 18 se observan las gráficas de vibración para cada uno de los destiladores. Para la gráfica de temperatura (figura 13), se asignan los siguientes colores a **cada equipo, destilador A color azul, destilador B color rojo, destilador C verde y destilador D fucsia:**

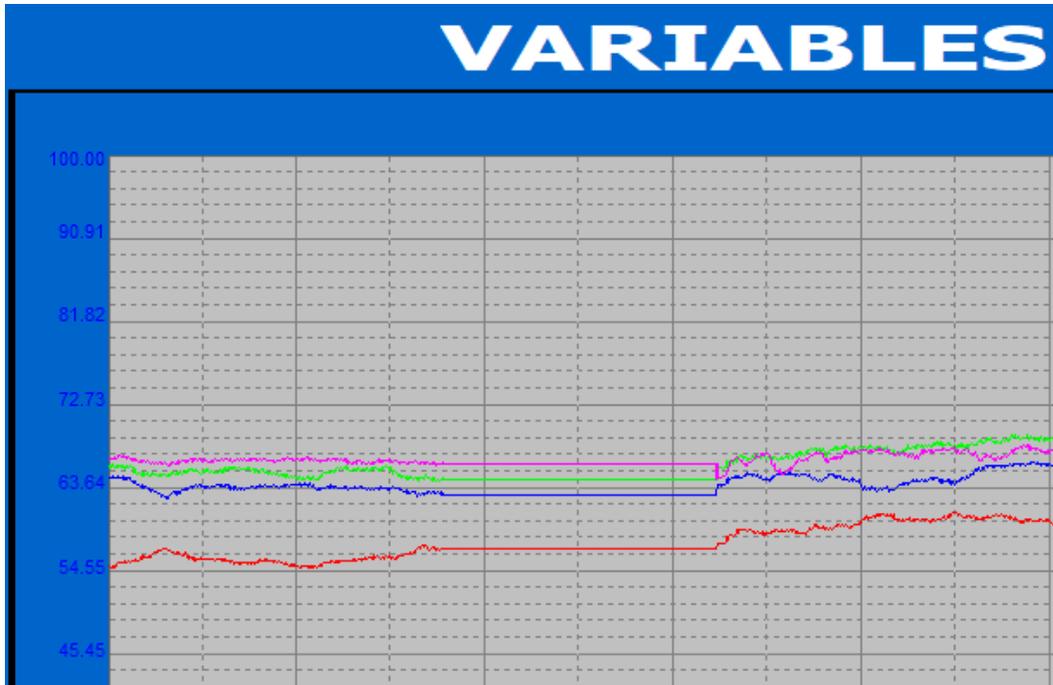


Figura 17. Gráfica de temperatura ampliada para los destiladores.

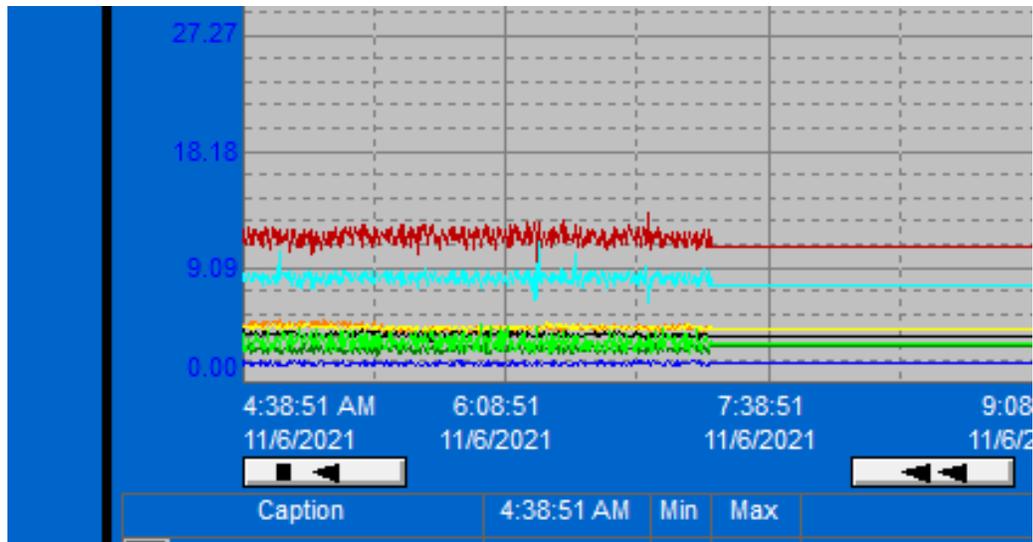


Figura 18. Gráfica de vibración ampliada para los destiladores.

Para la gráfica de vibración (figura 14), los colores asignados a cada equipo fueron los siguientes: destilador A eje X color amarillo, eje Z color negro; destilador B eje X color azul oscuro, eje Z color naranja; destilador C eje X color rojo, eje Z

color azul claro; y destilador D eje X color verde claro, eje Z color verde oscuro.

Como se puede observar, los valores de vibración y temperatura son muy constantes en el tiempo, el valor de cantidad se ve reflejado en el eje Y para las dos variables, se trae solo el valor numérico medido por el sensor para poder verlos gráficamente en el mismo eje ya que un valor sería para temperatura y el otro para distancia. En el eje X de la gráfica se lleva el valor de tiempo, en este caso ese el que lleva el PLC.

En la tabla 3, se pueden apreciar los valores de alerta y acción establecidos para cada uno de los equipos, donde gráficamente no han excedido los límites, manteniendo el sistema en control.

### **Plan de mantenimiento predictivo que permite corregir fallas tempranas en las turbinas.**

De acuerdo con el monitoreo en línea de los datos, se determinó realizar mantenimiento predictivo de acuerdo a los valores límite establecidos con el fin de tomar acciones antes de que ocurra un evento que amerite parar el equipo para reparación no programada, estos límites se definieron utilizando un porcentaje de acuerdo al último mantenimiento realizado a cada equipo y por recomendación del asesor se dejaron los siguientes valores:

Tabla 2. *Definición de valores de alarma y disparo para control automático*

<b>DEFINICIÓN DE VALORES DE ALARMA DE ACUERDO A VALORES INICIALES</b>		
	<b>Alarma</b>	<b>Disparo</b>
<b>PARA VIBRACIÓN Hz</b>	<b>35%</b>	<b>50%</b>
<b>PARA TEMPERATURA °C</b>	<b>8%</b>	<b>15%</b>

Fuente: El autor, basado en datos internos recopilados en planta.

Tabla 3. Definición de valores de alarma y disparo para control automático

		VALORES INICIALES	CONDICIÓN DE ALARMA	CONDICIÓN DE DISPARO
DESTILADOR A	EJE HORIZONTAL	9,2	12,42	13,8
	EJE VERTICAL	7,3	9,855	10,95
	TEMPERATURA °C	65	70	75
DESTILADOR B	EJE HORIZONTAL	5,85	7,8975	8,775
	EJE VERTICAL	5,85	7,8975	8,775
	TEMPERATURA °C	65	70	75
DESTILADOR C	EJE HORIZONTAL	7,3	9,855	10,95
	EJE VERTICAL	13	17,55	19,5
	TEMPERATURA °C	65	70	75
DESTILADOR D	EJE HORIZONTAL	5,07	6,8455	7,605
	EJE VERTICAL	3,61	4,8735	5,415
	TEMPERATURA °C	65	70	75

Fuente: El autor, basado en datos internos recopilados en planta.

Se desarrolló un programa de mantenimiento predictivo que permita corregir fallas

tempranas en las turbinas.

Tabla 4. Definición de fallas presentadas por cada variable

Falla por:	Causa:	Solución:
Vibración	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desajuste en anclaje de la turbina</li> <li>Desalineamiento en banda dentada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ajustar tornillos y soporteria</li> <li>Alinear banda dentada</li> </ul>
Lubricación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de aceite</li> <li>Deficiencia en el caudal de aceite</li> <li>Aceite contaminado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Completar el nivel de aceite</li> <li>Revisar operación de la bomba de aceite</li> <li>Realizar análisis de aceite</li> </ul>
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bloqueo del rotor por curvatura del eje</li> <li>Rodamientos frenados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar termografía</li> </ul>

El equipo está programado para emitir una alarma con el fin de que el operador de turno programe la reparación del equipo con producción; en este mantenimiento generalmente se aplican ajustes menores como alineación de banda o correa, verificación de niveles de aceite o ajuste en el sistema que soporta la turbina y el motor. También se realizará un análisis de vibración por parte de una firma contratista externa cada 4 meses, ellos no

enviaran un informe de cómo está el equipo respecto a esta variable.

Se anexa informe presentado por la firma contratista externa donde se puede observar una pequeña disminución por variaciones normales de operación del equipo. En el informe hay

5 tipos de prioridades dependiendo de cómo este el equipo las cuales son:

- Prioridad 1 – Atención Inmediata.
- Prioridad 2 – Atención Máximo en 2 semanas.
- Prioridad 3 – Atención en la siguiente parada programada (antes de 2 meses).
- Prioridad 4 – Monitorear el comportamiento en la siguiente medición.
- Prioridad 5 – Operar el equipo normalmente.

Se puede observar que el equipo se encuentra en prioridad 4 en el motor y la turbina donde se presentan pequeñas disminuciones normales por condiciones de operación.

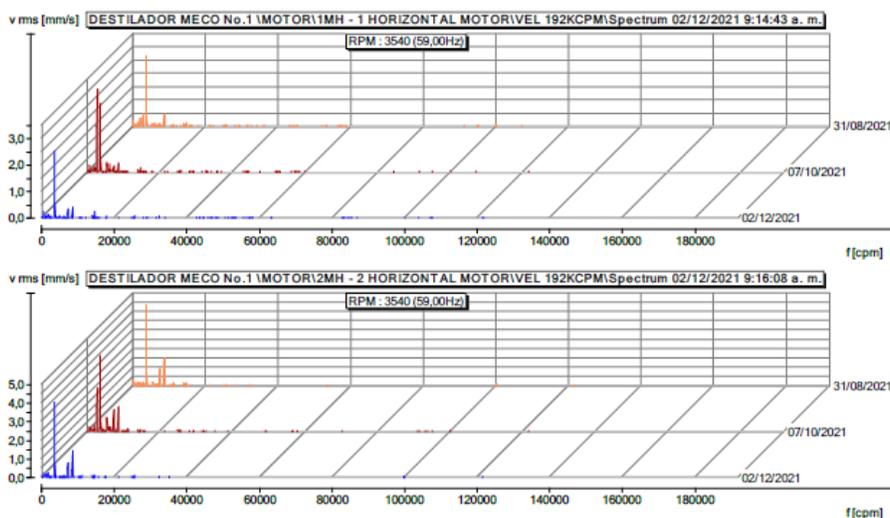
Se anexa tabla del plan de mantenimiento el cual se realiza cada 4 meses:

Tabla 5. *Tabla de plan de mantenimiento*

Plan de mantenimiento	Tiempo a realizar
Revisar operación de bomba de aceite	Cada 4 meses
Realizar tensión y alineación a banda	
Realizar análisis de vibración	
Revisar nivel de aceite	
Ajustar soporteria	

## REPORTE DE INSPECCIÓN

EQUIPO: DESTILADOR No.1	PRIORIDAD: 4
COMPONENTE: MOTOR	FECHA: Diciembre 02 de 2.021



### DIAGNÓSTICO:

- Se observa dismuncion en la amplitud de la 1xRPM del motor, por variaciones normales en las condiciones de operación.

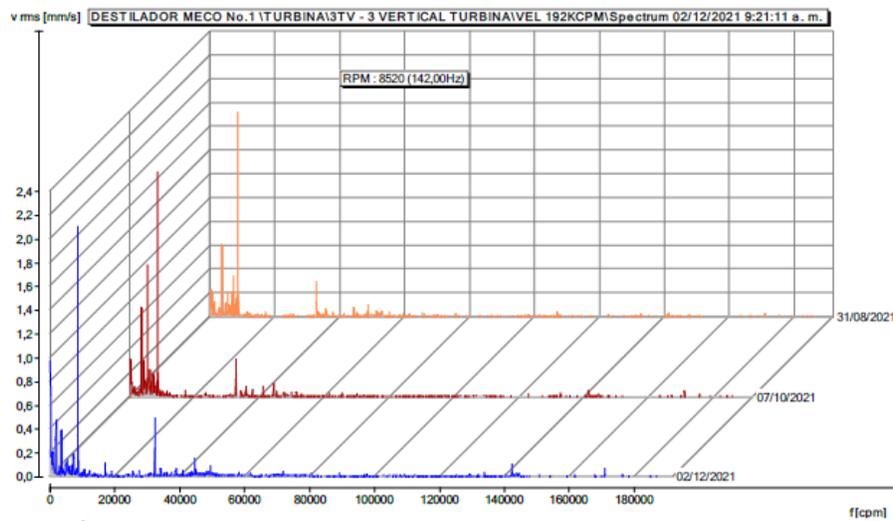
### RECOMENDACIONES:

- Monitorear en la siguiente medición.

Figura 19. Reporte de inspeccion de vibracion en motor de un destilador

## REPORTE DE INSPECCIÓN

EQUIPO: DESTILADOR No.1	PRIORIDAD: 4
COMPONENTE: TURBINA	FECHA: Diciembre 02 de 2.021



### DIAGNÓSTICO:

- Se observa disminución en la amplitud de la frecuencia 1xRPM. muestra una amplitud estable.

### RECOMENDACIONES:

- Monitorear en la siguiente medición.

Figura 20. Reporte de inspeccion de vibracion en turbina de un destilador

A modo de ejemplo se traen las gráficas de uno de los destiladores para corroborar que no hay fuera de limites

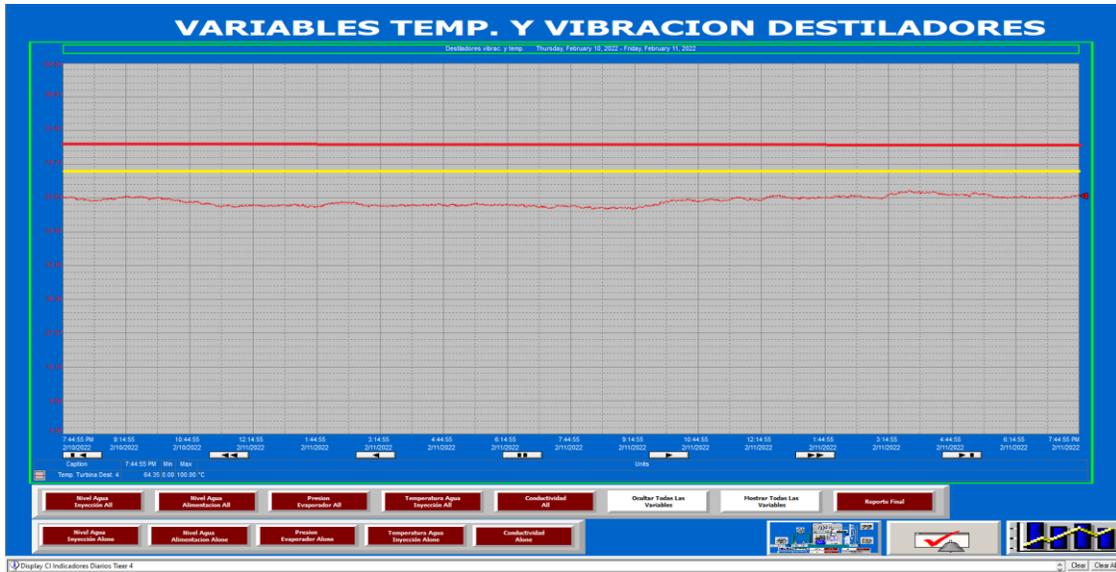


Figura 21. Grafica de temperatura en un destilador

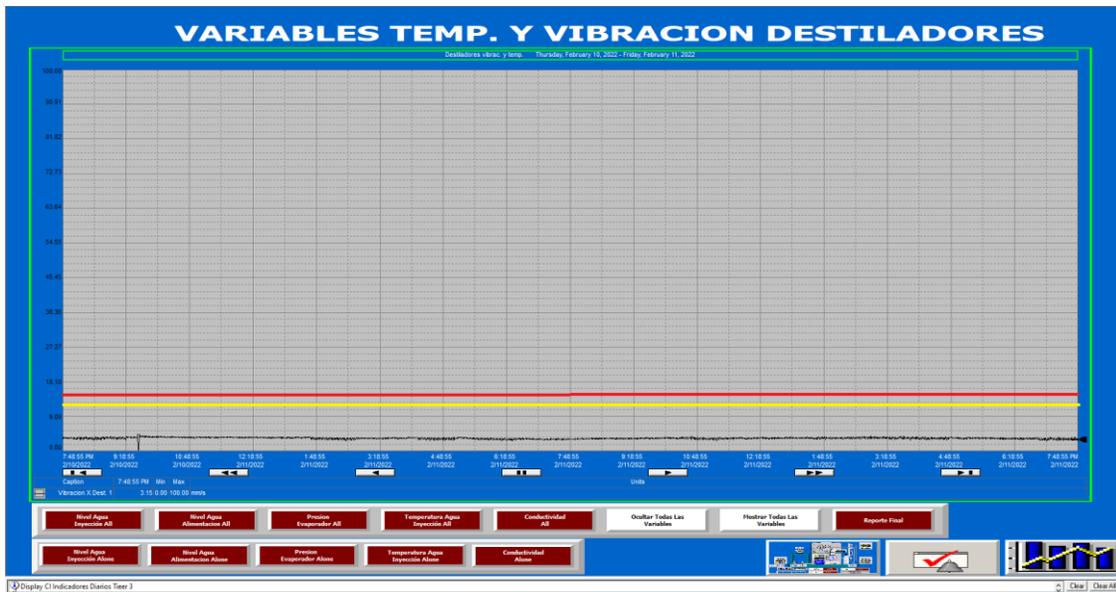


Figura 22. Grafica de vibracion en eje X de un destilador

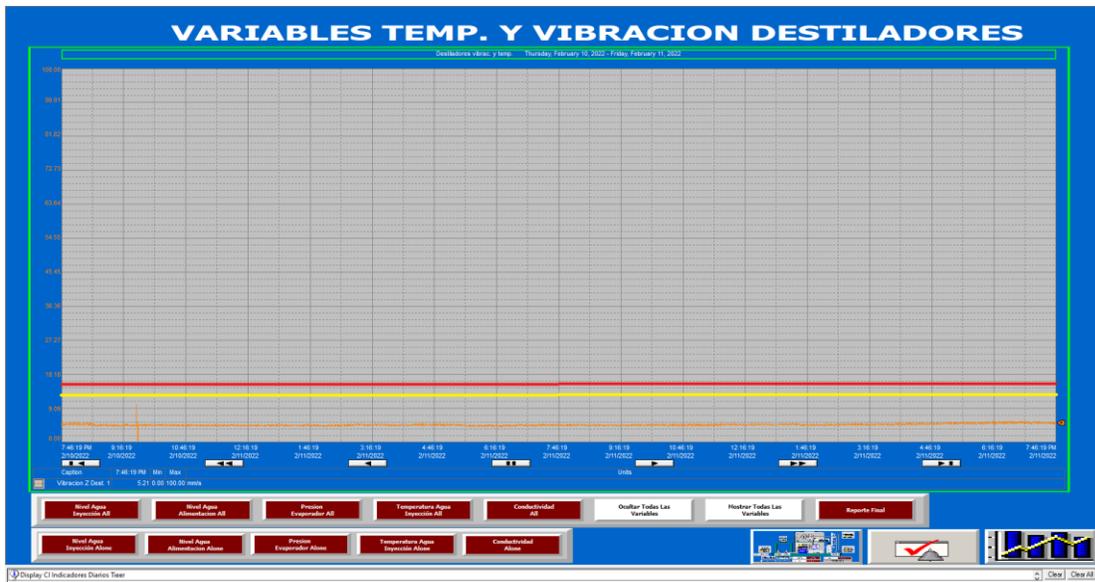


Figura 23. Grafica de vibracion en eje Z en un destilador

Adicional a ello, se realiza inclusión de ruta de vibración trimestral en el programa de mantenimiento de la compañía MAXIMO, con el fin de verificar con mayor detalle posibles fallas y obtener recomendaciones o retroalimentación de tiempos estimados de falla para a futuro realizar la programación del mantenimiento y evitar así tiempos perdidos.

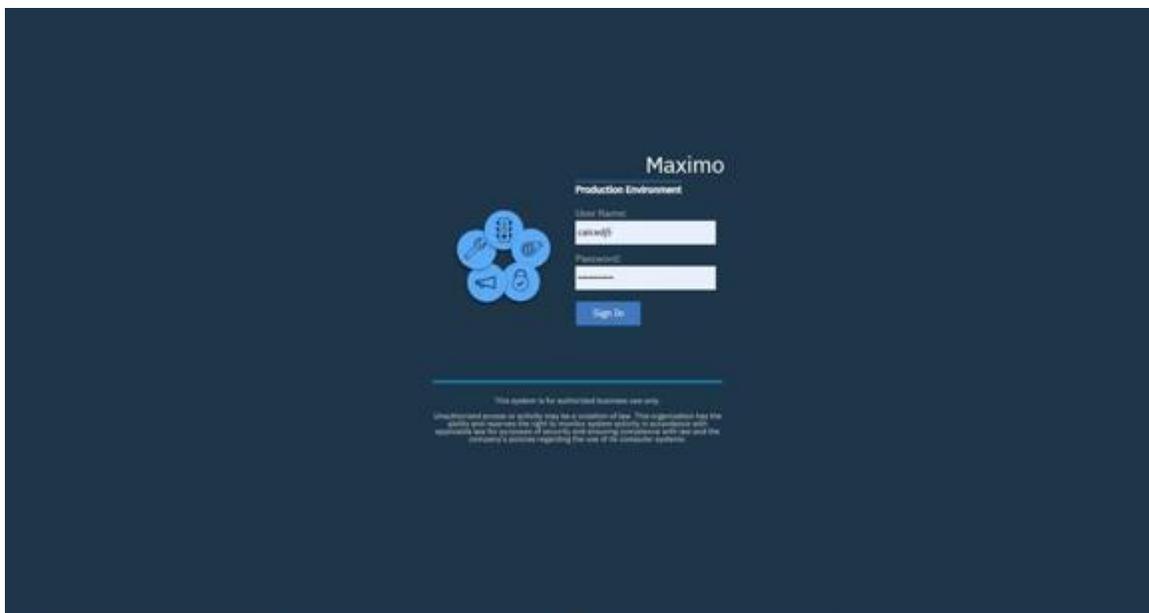


Figura 24. Programa de mantenimiento preventivo de la compañía.

## **9. Discusión.**

De acuerdo con el libro publicado por García titulado “Organización y gestión integral del mantenimiento” se pudo comprobar que una buena gestión de mantenimiento contribuye en la disminución de costos de operación en las empresas, lo que ayuda a estas sean más competitivas en el mercado ya que sus costos de operación pueden disminuir. Muchas veces los mantenimientos se ven como un gasto y no una inversión que bien aplicado, a futuro puede ser muy beneficiosa.

Un programa de mantenimiento alineado y ajustado con las políticas de la empresa le da una gran importancia a su gestión ayudando así a evitar reparaciones costosas.

Se pudo comprobar igualmente lo que se planteaba en el trabajo de Álvarez denominado “Mantenimiento predictivo a través de un sistema de monitoreo de vibraciones a turbinas tipo francis”, que el monitoreo en línea es de gran ayuda para equipos críticos y facilita la detección de fallas tempranas ayudando a disminuir los costos de reparaciones correctivas y dando un gran aporte a la confiabilidad de los equipos.

Adicional en el trabajo realizado por Guerra llamado “Diseño e implementación de un analizador de vibraciones para el mantenimiento predictivo en sistemas mecánicos”, se pudo constatar que a través de las mediciones de vibración se puede implementar un mantenimiento predictivo a los equipos.

## **10. Conclusiones.**

La aplicación del mantenimiento predictivo, tal y como se desarrolló en este proyecto, permite identificar fallas tempranas en la lubricación, desalineamiento, desbalanceo y desajuste de soportería que se puedan presentar en los equipos industriales de una forma rápida y eficaz, anteriormente, los equipos se intervenían cuando se escuchaba un ruido extraño o se veía un incremento en la corriente, esto no era garantía de predicción de una falla, más bien avisaba que el equipo debía ser intervenido para reparación.

Por medio de este proyecto se pudo comprobar que al realizar un mantenimiento predictivo se pueden programar las adecuaciones de las máquinas sin parar los procesos productivos porque se está realizando monitoreo en línea de los sistemas.

El monitoreo en línea de los equipos se puede realizar sin afectar los procesos de producción ya que estos se realizan en las condiciones normales de operación.

Los costos de mantenimiento predictivo son menores que los costos de mantenimiento correctivo, ya que se pueden hacer pequeños ajustes para colocar la máquina en óptimas condiciones, mientras que en el mantenimiento correctivo requiere como su nombre lo indican, solucionar un daño esto requiere para estos equipos compra de impellers, reparación de piezas mecánicas, balanceo de turbina y tiempos perdidos los cuales se asocian a costos de producción.

El desarrollo de un sistema de monitoreo y control en línea permite tomar acciones tempranas para evitar daños mayores en las máquinas, garantizando que

con una inversión menor se pueda evitar una reparación costosa.

Con la ayuda del reporte de inspección que nos suministra la empresa contratista externa se ha podido obtener una información más detallada de las condiciones del equipo respecto a la variable de vibración y así poder prevenir daños que se pueden presentar posteriormente.

A través de la aplicación del mantenimiento predictivo y el monitoreo y control en línea se asegura la confiabilidad de los equipos garantizando mayor tiempo para la operación de los equipos.

## **11. Recomendaciones.**

Es importante tener en cuenta que todas las máquinas tienen ciertos niveles de vibración así se encuentren en óptimas condiciones de operación, lo que sí es evidente es que cuando algún equipo presenta anomalías, sus niveles de vibración se van aumentando paulatinamente, esto es un indicador para realizar una revisión del equipo y colocarlo nuevamente en condiciones ideales para evitar daños futuros que impliquen una mayor inversión de reparación y reprocesos.

En los casos que se presentan subidas de vibración en los destiladores, se hace una revisión de su alineación, ajuste de soportería y ajuste de la banda garantizando así volver a sus valores ideales de operación.

Con la implementación de este sistema de monitoreo en línea de los parámetros de medición de vibración y temperatura, se puede garantizar la confiabilidad del

equipo, ya que anteriormente se intervenía el destilador ante ruidos anormales o subidas de temperatura, en estos casos la reparación era inminente y así se tomaran acciones pequeñas como alineación, ajuste de soportería, los destiladores no se podían llevar a sus condiciones ideales ya que los rodamientos habían sufrido daño, lo que implica la reparación completa de la turbina, siendo este control más fino en cuanto a detección.

Muy importante conocer la máquina a la cual se le va a realizar el seguimiento ya que de eso depende la ubicación de los sensores en el equipo para tener unas medidas confiables.

Adicional a ello es muy importante conocer la máquina, por ejemplo, los datos de la polea, la ubicación de los rodamientos y de qué tipo son, el tipo de bandas utilizadas las RPM a las que gira la turbina, con el fin de que este sistema implementado sea efectivo.

Estos sistemas pueden ser implementados a otros equipos que se encuentran en la planta, como los son, calderas, compresores, chillers, plantas de emergencia entre otros.

## 12. Referencias.

- Álvarez, J. (2019). *Mantenimiento predictivo a través de un sistema de monitoreo de vibraciones a turbinas tipo francis (8mw) acorde a la norma iso 10816, en la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Betancourt, A., Rubio, D. (1994). *Diseño y construcción de un Sistema para agua destilada en una planta para productos farmacéuticos.* Santiago de Cali: Corporación Universitaria Autónoma de Occidente.
- Chacon, D., Dijort, O., & Castrillo, J. (2001). *Supervisión y control de procesos.* 35. <http://ocw.upc.edu/sites/default/files/materials/15012628/40194-3452.pdf>
- Daneels, A. Salter, W. (1999). *What is scada?*.InternationI Conference on accelerator and large experimental physics control system. Trieste, Italia.
- García, S. (2010). *Organización y gestión integral del mantenimiento.* Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A.. Recuperado de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=PUovBdLi-oMC&oi=fnd&pg=PR13&dq=tipos+de+mantenimiento&ots=UfCa\\_stGXs&sig=8Mrfb3TSbCZycemiTzqBYwSORHo#v=onepage&q=tipos%20de%20mantenimiento&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=PUovBdLi-oMC&oi=fnd&pg=PR13&dq=tipos+de+mantenimiento&ots=UfCa_stGXs&sig=8Mrfb3TSbCZycemiTzqBYwSORHo#v=onepage&q=tipos%20de%20mantenimiento&f=false)
- González, J. y Sánchez, J. (2019). *Diseño e implementación de un sistema automático para el control y monitoreo de una planta prototipo de refrigeración con compresores en paralelo.* (tesis de pregrado). Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad.
- Guerra, R. (2020). *Diseño e implementación de un analizador de vibraciones para el mantenimiento predictivo en sistemas mecánicos.* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Leyton, L. (2018). *Plan de mantenimiento predictivo del sistema de vapor para reducción de pérdidas de hogazas en la línea de producción de panes- Panificadora Bimbo S.A..* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Callao, Perú.
- MechanicalEquipment INC. (2021). *Vapor CompressionDestillation.* Recuperado de: <https://www.meco.com>
- Mite, O. (2018). *Sistema de monitoreo de temperatura en cámaras de refrigeración para la empresa Degeremcia S.A.* (Tesis de pregrado). Universidad de

Guayaquil, Guayaquil Ecuador.

Olarte, W., Botero M. y Cañon B. (2010, agosto). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Universidad Tecnológica de Pereira*.

Recuperado de: <https://Dialnet-TecnicasDeMantenimientoPredictivoUtilizadasEnLaInd-4546591.pdf>

Sears, S. (2006). *Vapor Adding High Tech Compression Understanding to Distillation Nature's Process*. Water Conditioning & Purification.