

Implementación de un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de velocidades centrífugas de compresores

Oscar Aguillar¹ y Kenneth Rosillón²

¹Escuela de Tecnología Mecánica: mención Mantenimiento, Instituto Universitario de Tecnología Antonio José de Sucre, Av. La limpia, Sector Los olivos, Maracaibo, Venezuela
Correo: oscaraguillarrossell@gmail.com

²Escuela de Ingeniería en Mantenimiento Mecánico, Departamento de Ingeniería. Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño. Escuela de Tecnología Mecánica: mención Mantenimiento, Instituto Universitario de Tecnología Antonio José de Sucre, Av. La limpia, Sector Los olivos, Maracaibo, Venezuela
Correo: krosillonpsmmcbo@gmail.com

Recibido: 14-06-2016

Aceptado: 20-09-2016

Resumen

La presente Investigación tiene como objetivo la implementación de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de velocidades para un compresor centrífugo del Laboratorio de Conversión de la Universidad del Zulia. La finalidad del proyecto es determinar en el momento oportuno el deterioro de las piezas del equipo, para reducir la cantidad de mantenimiento correctivo que este y otros compresores sufren. La modalidad de esta investigación es experimental, de tipo descriptiva. La unidad de análisis fue el compresor centrífugo. Las técnicas utilizadas para obtener la información será la observación y se recurrirá a entrevistas no estructuradas como guías para recabar información acerca de los problemas que ahí ocurren, así como también obtuvimos información mediante un instrumento medidor y adquisidor de velocidades en tiempo real. Como parte de los resultados que obtuvimos, estos plantean un rediseño del sistema de potencia anexando más canales a las poleas. Las alarmas y las frecuencias de inspecciones fueron calculadas bajo análisis estadísticos para pronosticar los puntos de falla consiguiéndose así diseñar un plan de mantenimiento predictivo para las piezas cinemáticas del compresor, agregándole un plan de mantenimiento preventivo básico para conseguir una duración óptima de esta unidad compresora en el laboratorio.

Palabras claves: Mantenimiento predictivo, análisis de velocidades, compresores centrífugos.

Implementation of a predictive maintenance plan based on analysis of speed centrifugal compressor

Abstract

This research aims to implement a predictive maintenance plan based on analysis of speed centrifugal compressor for the Energy Conversion Laboratory at the University of Zulia. The purpose of the project is to determine in a timely deteriorating pieces of equipment to reduce the amount of this corrective maintenance and other compressors suffer. The method of this research is experimental, descriptive. The unit of analysis was the centrifugal

compressor. The techniques used to obtain information is the recourse to observation and unstructured interviews as guides to collect information about problems that occur there , as well as information obtained by a measuring instrument and acquirer speeds in real time. As part of the results we obtained, these pose a redesign of the power system more channels to attaching pulley. Alarms and frequency of inspections were calculated under statistical analysis to predict failure points thereby achieving design a predictive maintenance plan for the kinematic compressor parts, adding a plan of basic preventive maintenance to achieve optimal duration of this compressor unit in laboratory.

Keywords: Predictive, velocity analysis, centrifugal compressors

Introducción

El mantenimiento al igual que otras ciencias de la ingeniería, ha evolucionado a gran escala, con el paso del tiempo este cambio ha traído nuevas técnicas que se han adaptado al ritmo de vida de las empresas de clase mundial. El mantenimiento, consiste en prevenir fallas de un proceso continuo asegurando la disponibilidad planificada a un nivel de calidad estimado al menor costo dentro de las recomendaciones de garantía y uso de las normas de seguridad y medio ambiente aplicable.

El mantenimiento como un concepto actual no implica reparar la falla de un equipo tan pronto como se pueda sino mantener el equipo en operación a los niveles especificados. En consecuencia, su primera prioridad es prevenir fallas, de este modo reducir los riesgos de paradas imprevistas, por este medio toda empresa logra conservar operable todos y cada uno de sus equipo con el debido grado de eficiencia y eficacia.

Entre las nuevas técnicas se encuentra el mantenimiento predictivo por análisis de velocidades, que es un proceso de seguimiento de los niveles de velocidades en las partes rotativas de los equipos, para determinar el estado de los componentes de las máquinas y detectar fallas potenciales de ajuste o alineación, que puedan afectar los procesos de producción. En la actualidad es una herramienta muy usada para el mantenimiento de equipos y acompañado de otras técnicas predictivas resulta muy confiable.

El trabajo que se describe a continuación tiene como objetivo el análisis de velocidades en el compresor FACING01 ubicado en el Laboratorio de Conversión de Energía perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia, con la finalidad de establecer los parámetros para la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo que satisfaga las exigencias de dicha institución, para hacer el cumplimiento de esta investigación se presenta a continuación en tres (3) Fases: en la primer fase encontraremos el planteamiento del problema y los objetivos que se plantearon de la investigación, así mismo en la fase dos (2) se hará referencia a las bases teóricas, finalmente en la fase tres (3) hacemos referencia a los resultados obtenidos a lo largo de la investigación que darán respuesta cada uno de los objetivos planteados con anterioridad a su vez se presentaran las conclusiones para ser aplicadas en la respectiva institución en la cual se realizó el trabajo de investigación.

FASE I

Contextualización del Problema

Según Corro [1] El ser humano siempre ha buscado mejorar los instrumentos que utiliza para aprovechar los recursos dispuestos en el medio ambiente; realidad de la que no escapa la industria mecánica, innovando cada día las maquinarias de las cuales se sirve. Es por ello que a medida que avanza la ciencia y la tecnología se incorporan nuevas técnicas que representan un beneficio evidente en la creciente demanda del mercado global. Todas estas aplicaciones comparten requerimientos como: rendimiento eficiente, alta confiabilidad, durabilidad, y facilidad de mantenimiento, lo cual conlleva a explotar eficaz

y eficientemente la maquinaria instalada.

Los compresores centrífugos son equipos industriales de carácter rotativos que se usan para elevar la presión de un fluido en este caso aire de manera neumática con la finalidad de alimentar cualquier tipo de proceso o instrumento de medición en la misma. Existen muchos tipos de compresores, entre los más resaltantes están los centrífugos y los axiales. El centrífugo es el más comúnmente visto, donde el fluido se comprime perpendicular a su eje de rotación, mientras que el axial es cuando el flujo de aire se comprime en su mismo sentido.

Por su parte Rodríguez, M. [2] establece que la mayoría de los compresores en la industria juegan un papel importante, mientras unos sirven para impulsar a la generación de energía eléctrica por medio de una turbina, los restantes se utilizan para alimentar la instrumentación existente en cualquier industria a nivel mundial que posea su neumática asociada a los instrumentos de medición y control; por otra parte, en cuanto al mantenimiento, los planes preventivos y correctivos, con los que en un 40% de los casos su mantenimiento no es el más óptimo, saltando así de un mantenimiento preventivo a uno correctivo agregándole pérdidas monetarias, de operación y horas de trabajos no solo a los equipos e instrumentos, sino al personal que labora bajo la guía de estos instrumentos en cualquier empresa.

En la actualidad específicamente en la Universidad del Zulia en el laboratorio de turbomaquinas de la escuela de Ingeniería Mecánica, existe un compresor centrífugo de 7.5HP que es vital de examinar en sus síntomas presentes en los cuales son las fallas recurrentes, la gran cantidad de paradas que este sufre y determinar si dichos inconvenientes provienen de las erradas políticas de mantenimiento, que a nivel industrial se puede observar no solo en este tipo de compresores, sino en cualquier maquinaria de tipo industrial que se maneje con análisis de velocidad para todas sus partes en movimiento, por lo que hoy en día no existe un plan de mantenimiento tal, que satisfaga los requerimientos de los fabricantes. Si en la Universidad no se mejorara estas condiciones de fatiga en los distintos tipos de maquinaria el especial el compresor FACING01, se podrían tener accidentes fatales, por lo que es importante llevar al día los historiales de mantenimiento.

Por tal razón, surge un plan de total aplicación para pronosticar el punto futuro de falla como lo define Primera [3], que no es más que un mantenimiento predictivo, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse con base a un plan justo antes de que falle, utilizando la técnica de análisis de velocidad para verificar las condiciones rotativas de la máquina y el estado de desgaste en poleas y correas. Por lo antes expuesto, se propone el mantenimiento predictivo como solución a los problemas presentes en este equipo en el laboratorio de turbomaquinas en la Universidad del Zulia.

Ahora bien, se busca establecer una buena práctica de velocidad en los motores del compresor con el objetivo de suministrar información y adelantarse a tomar acciones, evitando la fricción y el desgaste que se encuentra siempre presente en los sistemas y en las máquinas; así el roce crea una pérdida de energía mecánica perjudicial para el mecanismo, que se traduce en un calentamiento de las piezas que estén en contacto, ocasionando desgaste, deformaciones y eventualmente adhesión.

FASE II

Fundamentos Teóricos

Mantenimiento predictivo

Según Perozo [4] A partir de 1966 con el fortalecimiento de las asociaciones nacionales de mantenimiento, creadas al final del período anterior y la sofisticación de los instrumentos de protección y medición, la ingeniería de mantenimiento, pasa a desarrollar criterios de predicción o previsión de fallas, visando la optimización de la actuación de los equipos de ejecución de mantenimiento. Esos criterios,

conocidos como mantenimiento predictivo, fueron asociados a métodos de planeamiento y control del mantenimiento.

Luego a principios de la década de 1990 apareció en la industria este tipo de mantenimiento, aunque todavía en la actualidad no es muy usado en muchos sectores. El sustento tecnológico de este mantenimiento consiste en la aplicación de algoritmos matemáticos agregados a las operaciones de diagnóstico, que juntos pueden brindar información referente a las condiciones del equipo. Tiene como objetivo disminuir las paradas por mantenimientos preventivos, y de esta manera minimizar los costes por mantenimiento y por no producción, es decir, disminuir los tiempos improductivos.

De este modo el mantenimiento predictivo, es una técnica para pronosticar el punto futuro de rotura o avería de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

De tal manera se deben realizar inspecciones periódicas a la maquinaria, generalmente con equipo de alta tecnología para determinar el estado en que se encuentran trabajando los elementos. Así se programan los puntos de la maquinaria que se quieren inspeccionar, rutas, y la frecuencia con que se deben monitorear. Esta información se almacena en sistemas de información que permiten realizar un seguimiento exacto de estado de funcionamiento de la máquina. En contraste con los tipos de mantenimiento arriba mencionados, el mantenimiento predictivo no solo se enfoca al elemento de máquina, sino también al ambiente en que este opera.

La organización para el mantenimiento predictivo consiste en medir diversos parámetros que muestran una relación predecible con el ciclo de vida del componente. Algunos ejemplos de dichos parámetros son: vibración de cojinetes, temperatura de las conexiones eléctricas, resistencias del aislamiento de la bobina de un motor, viscosidad en fluidos (especialmente en aceites y lubricantes).

Técnicas aplicadas para el mantenimiento predictivo

Basados en Espinosa [5] El cual indica la necesidad de intervención con base en el estado de equipamiento. La evaluación del estado se da a través de la medición, acompañamiento o monitoreo de parámetros.

Ultrasonido

El análisis por Ultrasonido Industrial (UT) se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, que se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material. El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz con ayuda de un aparato creado para ese fin.

Análisis por líquidos penetrantes

La inspección por Líquidos Penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados. En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente en la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante, mediante el uso de algún material absorbente (papel, trapo, etc.) y se aplica un revelador de color diferente al líquido penetrante, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades o aberturas superficiales y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

Análisis con partículas magnéticas

La inspección por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos. Se selecciona usualmente cuando se requiere una inspección más rápida que con los líquidos penetrantes. El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético o de polos cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético, es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, éste se deforma o produce polos. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie sujeta a inspección y que por acumulación producen las indicaciones donde exista distorsión en las líneas de flujo (fuga de campo) que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.

Análisis por radiografía industrial (rayos X)

La inspección por RI se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas, variaciones y/o fallas en la estructura interna o configuración física de un material el cual absorbe de forma diferenciada radiación penetrante. La Radiografía Industrial es uno de los métodos más antiguos y de mayor uso en la industria. Debido a esto, continuamente se realizan nuevos desarrollos que modifican las técnicas radiográficas aplicadas al estudio no sólo de materiales, sino también de partes y componentes; todo con el fin de hacer más confiables los resultados durante la aplicación de la técnica.

Análisis motores eléctricos

El objeto del análisis eléctrico como técnica de mantenimiento predictivo es el de realizar estudios eléctricos sobre aquellos equipos que pueden presentar averías de origen electro-mecánico. En función de la corriente de alimentación, trifásica o continua, del equipo (generalmente motores eléctricos) que se desea analizar, se pueden verificar las siguientes condiciones:

- Calidad de la alimentación
- Estado del circuito
- Estado del aislamiento
- Estado del estator
- Estado del rotor
- Excentricidades en el entre-hierro

El análisis de corriente de un motor eléctrico puede desempeñarse a modo de control de calidad, como herramienta de tendencia o como emisor de un diagnóstico inmediato del estado del mismo.

Análisis de aceites

El análisis de aceite consiste en una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar la condición de los lubricantes usados o los residuos presentes. Al estudiar los resultados del análisis de residuos, se puede elaborar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del equipo y sus componentes. Lo anterior, permite a los encargados del mantenimiento planificar las detenciones y reparaciones con tiempo de anticipación, reduciendo los costos y tiempos de detención involucrados.

Vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas, es un buen parámetro para poder determinar la condición de funcio-

namiento de una máquina o de los elementos que la componen. Todas las máquinas vibran y cada una tiene un patrón normal de funcionamiento. A través del análisis de vibraciones, se logra identificar un funcionamiento fuera del rango normal de vibración correspondiente a una falla potencial en los equipos e inclusive precisar la causa raíz de ese problema. El análisis de vibraciones es una herramienta fundamental en un programa de mantenimiento predictivo, permitiendo reducir costos de mantenimiento, paros inesperados, pérdidas de producción y aumentando la disponibilidad de los equipos.

Análisis cinemático

- El análisis de velocidades por puntos de contacto se realiza bajo el siguiente procedimiento:
- Se prepara la pieza a estudiar, preferiblemente los alabes de los motores en frío (sin carga).
- Se selecciona el alabe objeto de estudio, y se le coloca un cinta medidora de velocidad en cualquier alabe.
- Se enciende el equipo.
- Observar que la cinta medidora de velocidad sobresalga al giro continuo del rotor (motor), una vez conseguido y observado esto, apuntar el láser (digital) del medidor RPM perpendicular a la superficie o eje de giro.
- Tomar lecturas repetidas a lo largo del tiempo en cada ciclo de trabajo (siendo el ciclo de trabajo cuando enciende y apaga el motor producto de un presostato u otro elemento electrónico - eléctrico)
- Finalmente determinar el rendimiento velocidad Vs tiempo para el motor, mediante una serie de ensayos promediados a lo largo del tiempo de estudio.

FASE III

Condición de funcionamiento de los compresores

La condición operativa no es más que el estado en un punto temporal determinado del equipo, en base a la presente investigación como se mencionó en reiteradas oportunidades este compresor se utiliza tanto para el suministro de aire de proceso como de aire de instrumentos. Según la técnica metodológica de observación directa, los compresores actualmente presentan fallas debido a la ausencia de un mantenimiento; de acuerdo a las partes de los compresores describiremos a continuación el área neumática, mecánica y eléctrica respectivamente.

Puntos en los cuales serán medidas las velocidades producidas y las alarmas respectivas para gráficos de control

En esta etapa fueron determinados los puntos de medición en cada uno de los compresores, los puntos fueron marcados con el fin de realizar las mediciones siempre en el mismo lugar para lograr uniformidad en los resultados. Los puntos de medición fueron ubicados los más cercanos posible a cada polea de la máquina, por lo que fue necesario conocer la configuración interna y posiciones de las piezas presentes en cada compresor, dados en la Tabla 1.

Las mediciones fueron realizadas en cada punto en tres direcciones vertical (V), horizontal (H) y axial (A), y dependiendo de la configuración del equipo pueden existir, varios puntos de medición. En la Figura se muestra el esquema con 3 puntos de medición para el conjunto motor eléctrico-mecánico del compresor.

Tabla 1. Puntos de medición general para el sistema de transmisión

Puntos de Medición	
Polea conductora	Polea Conducida
<i>Punto</i> N° 1: Horizontal: (1H) Axial: (1A)	<i>Punto</i> N° 2: Horizontal: (2H) Axial: (2A)
Puntos de Medición	
Motor Eléctrico (Parte Posterior)	
<i>Punto</i> N° 3: Horizontal: (3H) Axial: (3A)	

Fuente: Propia (2014)

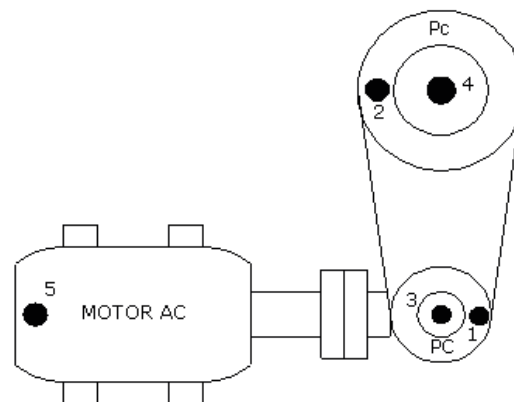


Figura 1. Puntos de medición. Fuente: Propia (2014).

Niveles de pre-alarma, alarma para cada uno de los compresores

Se determinaron los niveles de pre-alarma y de alarma de la velocidad lineal de las correas, así como también de la velocidad angular (RPM) permisibles de acuerdo al tipo, tamaño y potencia de las máquinas compresoras. Se utilizó un modelo aproximado de la norma ISO23-72 [6] puesto a que no existe norma que regule la velocidad en RPM como tal para establecer niveles de alarma para estudios de velocidad en poleas, mostrado en la Tabla 2.

Aunado a esto esta norma se tomara como indicador foco de comparación debido a que el supervisor del laboratorio no poseía ningún historial de velocidades, ni mucho menos niveles propios de alarma establecidos, que pudieran describir el comportamiento de los niveles de velocidad en los equipos a lo largo de su funcionamiento. También fueron determinados valores de pre-alarma y alarma en unidades de velocidad lineal (mm/s), estos fueron asignados con ayuda del Profesor Jefe del laboratorio de turbomaquinas y de textos especializados, debido a que no sedisponía de normas que asignarán valores de velocidad angular globales en unidades de revoluciones por minutos (RPM).



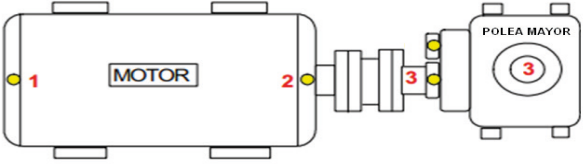
Tabla 2. Norma ISO-2372 [6]

45,00	NO PERMISIBLE	NO PERMISIBLE	NO PERMISIBLE	NO PERMISIBLE		
28,00						
18,00						
11,20						
7,10	LÍMITE	LÍMITE	LÍMITE	LÍMITE		
4,50				LÍMITE	LÍMITE	ADMISIBLE
2,20				LÍMITE	ADMISIBLE	ADMISIBLE
1,80	ADMISIBLE	ADMISIBLE	ADMISIBLE	ADMISIBLE		
1,12						
0,71	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL		
0,45						
0,28						
0,18						
Vel. (mm/s)	Máquinas Pequeñas (<15KW)	Máquinas Med. (15-75 KW) (300 KW, Soporte Especial)	Máquinas Grandes (base rígida) (>75KW)	Máquinas Grandes (alta velocidad) (>75KW)		

Fuente: ISO (2000).

Ahora bien, basados en esta norma y como se mencionó anteriormente, por experiencia del supervisor y jefe del laboratorio, aunado a la experiencia vivida durante la investigación, a continuación se mostrarán los niveles de alarma pero en función de la velocidad angular (RPM) del compresor, para los distintos puntos de medición en los compresores existentes en la facultad de ingeniería, indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites de alarmas establecidos para el compresor

 Universidad del zulia Facultad de ingeniería escuela de ingeniería mecánica Lab. Turbomaquinas (facing)				Formato de captura de información (Niveles de alarmas-niveles de velocidad)	
Diagrama esquemático del equipos (Puntos de medición)			Nombre del equipo: compresor Número del equipo: facing01		
			Frecuencia de Monitoreo		
Diaria Quincenal Semanal Mensual Trimestral Semestral					
Puntos de Medición Compresor 1					
Puntos de medición	Unidades	Alarmas	Fallas	RPM de giro	
1	1	(1500-2300) RPM	(1450-2400)RPM	1800 RPM	
2	1	(400-1100) RPM	(350-1200)RPM	720 RPM	
3	1	(1350-2070) RPM	(1305-2160)RPM	1620 RPM	
Análisis en Tiempo de la velocidad – Ciclo 1					
Descripción	Punto 1 (Min)	Punto 2 (Min)		Punto 3 (Min)	
RPM Mínima	1500 RPM	400 RPM		1350 RPM	
RPM Promedio	1900 RPM	750 RPM		1710 RPM	
RPM Máxima	2300 RPM	1100 RPM		2070 RPM	
Nivel de Alarma	1450-2350 RPM	390-1150 RPM		1340-2100 RPM	
Nivel de Falla	2500 RPM	1300 RPM		2200 RPM	

Fuente: Propia (2014)

Frecuencias en las cuales serán monitoreados los compresores

Para comenzar evaluando en función de la severidad la frecuencia de fallas, entonces comencemos por determinar la mantenibilidad del compresor de aire, para luego determinar la confiabilidad y probabilidad de falla en general, pasando de un periodo infantil a uno de mortalidad, donde se analizaran las distintas fallas pero en especial las fallas relacionadas y sus tiempos con el sistema de transmisión de velocidades del conjunto motor electromecánico unidos por las poleas.

Mantenibilidad del compresor

$$\sum y_i = nAm + Bm \sum x_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned}\sum x_i y_i &= Am \sum x_i + Bm \sum x_i^2 \\ -3854,72 &= Am(1007,58) + Bm(373535) \\ Am &= -0,47 \quad Bm = 0,00904 \\ a &= -Bm = -0,00904 \\ U &= \frac{A}{a} = \frac{-0,47}{-0,00904} = 52\end{aligned}\tag{3}$$

Para un tiempo máximo de reparo de 480 horas que equivale a 3 meses de paro de equipo, entonces la probabilidad de que el equipo pueda ser reparado con un mantenimiento es de:

$$\begin{aligned}P(t) &= e^{-e^{a(t-u)}} \\ P(480) &= e^{-e^{(-0,00904)(480-52)}} = 0,9793 \approx 97,93\%\end{aligned}\tag{4}$$

Confiabilidad del compresor

De las ecuaciones 1 y 2 respectivamente se crean las ecuaciones 5 y 6 respectivamente y sustituye los valores aplicados a la confiabilidad del equipo se tiene:

$$\sum y_i = nAc + Bc \sum x_i\tag{5}$$

$$\sum x_i y_i = Ac \sum x_i + Bc \sum x_i^2\tag{6}$$

$$-57,14 = (102)Ac + Bc(578,21)$$

$$-235,08 = Ac(578,21) + Bc(3335,47)$$

$$Ac = -9,27 \quad Bc = 1,53$$

$$\alpha = e^{-Ac/Bc} = e^{-(-9,27)/1,53} = 427,87 \rightarrow \lambda = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{427,87} = 0,00233\text{s}^{-1}$$

$\beta = Bc = 1,53$ El compresor trabaja bajo un esquema diario de 8 horas mensualmente en días hábiles lo que equivale a un número de 160 horas, entonces la confiabilidad para ese tiempo de operación viene dada por:

$$R(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta}\tag{7}$$

$$R(160) = e^{-(160/427,87)^{1,53}} = 0,80 \approx 80\%$$

De acuerdo a las confiabilidades individuales de las piezas cinemáticas tenemos que:

1. Confiabilidad del Motor Mecánico= 56.6%
2. Confiabilidad del Motor Eléctrico=100%
3. Confiabilidad de las poleas=100%

a. Según el historial de fallas del motor mecánico (axial)

$$\lambda = \frac{\text{Numero de fallo}}{\text{Horas de Operacion de la unidad}} \quad (8)$$

Tiempo de operación: 3 meses que equivalen a 480 Horas

Tiempos de parada total: 127 horas

Número total de horas de operación de la unidad: 480 horas – 127 horas= 353 horas

$$\lambda = \frac{10 \text{ Fallas}}{353 \text{ horas operacion}} = 0.028 \text{ fallas / horas}$$

De la misma manera se calcula para el motor eléctrico y las poleas respectivamente:

$$\lambda_{\text{Motor Electrico}} = 0.070 \text{ Fallas / hora}$$

$$\lambda_{\text{poleas}} = 1.14 \text{ Fallas / hora}$$

Basado en el análisis cinemático a los componentes rotativos del compresor, extrajimos las curvas de acuerdo a la respuesta que arrojó la herramienta de medición. Para ello se vaciaron los datos en el programa Excel desde el instrumento de medición como una adquisición de datos del mismo, en lo cual se midió la velocidad de acuerdo a las rutas y puntos de medición ya establecidos para arrojar resultados contundentes en un lapso de 60 minutos por tres (3) meses consecutivos, tiempo en el cual el presostato por protección apaga el compresor hasta que el tanque de almacenamiento ya previamente cargado se descargue conforme se vaya utilizando el aire para los distintos procesos del laboratorio de controles e instrumentación o a su vez para el mismo laboratorio de turbomaquinas.

Para poder determinar el intervalo de inspecciones para cada elemento conductor o conducido de velocidad, es necesario determinar la cantidad de modos de falla y la cual estará expresada en fallas por inspección. En líneas generales, se mostrara un promedio de todas las muestras tomadas, asumiendo como una media móvil de gráficos entre las pruebas realizadas en las distintas direcciones y los distintos sentidos.

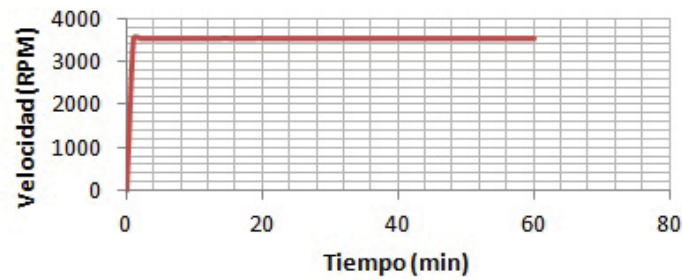


Figura 2. Análisis de velocidades de la polea conductora dirección radial (1), sentido vertical.
Fuente: Propia (2014).

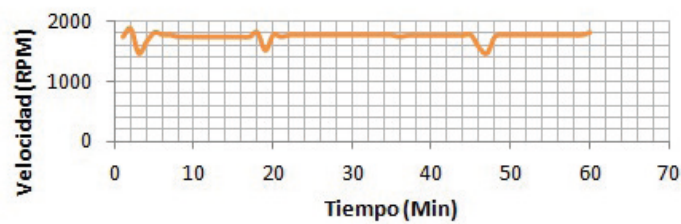


Figura 3. Análisis de velocidades de la polea conducida dirección radial (1), sentido vertical.
Fuente: Propia (2014).

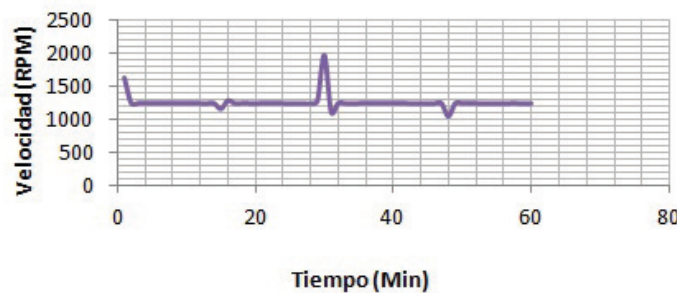


Figura 4. Análisis de velocidades del motor eléctrico dirección radial (3), sentido vertical.
Fuente: Propia (2014).

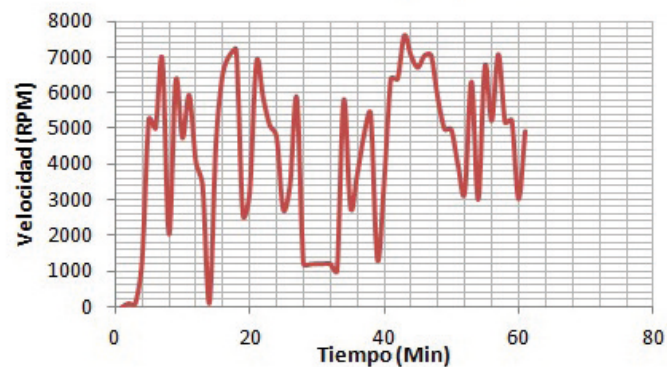


Figura 5. Análisis de velocidades de la polea conductora dirección axial (1), sentido horizontal.
Fuente: Propia (2014).

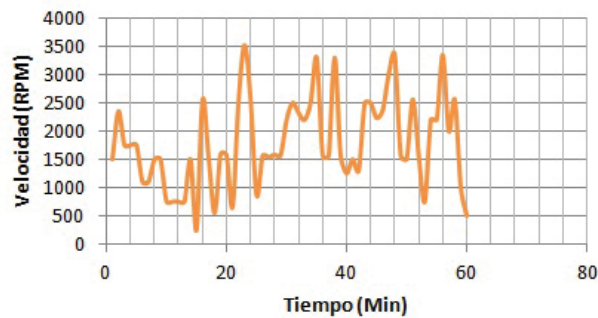


Figura 6. Análisis de velocidades de la polea conducida dirección axial (2), sentido horizontal.
Fuente: Propia (2014).

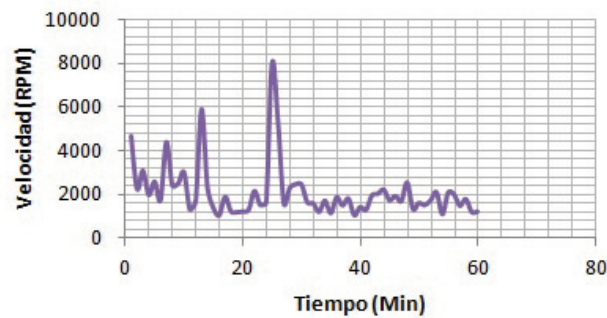


Figura 7. Análisis de velocidades de la polea conducida dirección radial (3), sentido vertical.
Fuente: Propia (2014).

Calculo de la frecuencia de inspecciones para evitar fallos

En referencia a los puntos de medición y a los sentidos de medición para el conjunto de velocidad entre las cuales están: polea conductora y conducida respectivamente, así como también el conjunto energético eléctricamente como lo es el motor de inducción trifásica y el mecánico de pistones teniendo así 2 pistones de compresión y expansión que le dan la fuerza de compresión al aire para su salida.

Punto numero 1 radial polea conductora

Fallas que pueden ser detectadas: 1 falla por pico.

$$= \frac{F_i}{\lambda} = \frac{1 \text{ falla por inspeccion}}{1.14 \text{ fallas / horas}} = 0.877 \frac{\text{horas}}{\text{inspeccion}} \quad (9)$$

$$C = \frac{C_i}{C_f} = \frac{\$10}{\$20000} = \frac{600Bs}{1200000 Bs} = 0.0005 \quad (10)$$

$$A = -\ln(1 - e^{-\lambda}) = -\ln(1 - e^{-1.14}) = 0.385 \quad (11)$$

$$I = C \times F \times A = 0.0005 \times 0.877 \times 0.385 = 0.000167 \text{ horas / inspeccion} \quad (12)$$

$$f = \frac{1}{0.000167 \text{ horas / inspecciones}} = 5971.0404 \text{ Horas / mes} \quad (13)$$

Teniendo en cuenta las relaciones de equivalencia entre días, meses y años, tenemos:

1 año → 12 meses

1 año → 8640 horas

1 mes → 30 días

$f \approx 8 \text{ meses}$

De la misma manera se procede con los demás puntos y rutas de medición para así obtener los siguientes resultados:

Tabla 4. Frecuencia de inspecciones en los puntos de medición.

Objeto de estudio	Punto de medición	Frecuencia
Polea conducida	2-radial	21 días
Motor Eléctrico	3-radial	Diario
Polea Conductor	1-axial	6 días
Polea Conducida	2-axial	30 minutos
Motor Eléctrico	3-axial	3 horas

Fuente: Propia (2014)

Plan de mantenimiento Preventivo-Predictivo

Plan de mantenimiento Preventivo

Objetivos del plan de mantenimiento preventivo

1. Mantener en óptimo funcionamiento la maquinaria, en este caso el compresor en el laboratorio de turbomaquina mediante una agenda de mantenimientos preventivos y tareas cotidianas.
2. Minimizar el número de paros en producción por falta de mantenimiento y reparaciones
3. Análisis, desarrollo e implementación de metodologías que puedan alargar el tiempo de vida de los compresores.

Alcance

Atender todas las necesidades de mantenimiento para los equipos del laboratorio que puedan ocasionar impactos en seguridad, producción y medio ambiente adaptándonos a las políticas vigentes de mantenimiento de la Universidad del Zulia, pero sin dejar de innovar y proponer nuevas estrategias.

Justificación

La implementación de este plan acarrea beneficios al laboratorio de turbomaquinas y en especial al de instrumentación y control ya que con un nuevo programa actualizado de actividades de mantenimiento preventivo, podremos garantizar la vida útil del compresor, y las practicas u otras actividades no se verían afectadas.

Tabla 5. Plan de Mantenimiento para el sistema mecanico-neumatico del compresor.

No.	Servicio	Ee	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
1	Filtro de aspiración	FS	X					
		OP						
2	Cambio de aceite	FS	X	X	X	X	X	X
		OP						
3	Limpieza Válvulas Antiretorno	FS	X			X		
		OP						
4	Control de uniones y tornillos	FS						
		OP	X			X		
5	Cambio de mangueras hidráulicas	FS	X					
		OP						
6	Cambio de mangueras neumáticas	FS	X					
		OP						
7	Calibración del Presostato	FS	X			X		
		OP						
8	Manómetros de presión	FS	X			X		
		OP						

Fuente: Propia (2014)

Tabla 6. Plan de Mantenimiento para el sistema eléctrico del compresor.

No.	Servicio	E	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
9	Contactador	FS	X					
		OP						
10	Limpieza de líneas de aire	FS	X					
		OP						
11	Pulmon de almacenamiento	FS	X					
		OP						
12	Filtros de líneas	FS	X					
		OP						
13	Breaker principal	FS	X					
		OP						
14	Líneas eléctricas (cables)	FS	X		X		X	
		OP						
15	Puestas a Tierra	FS						
		OP		X				X

Fuente: Propia (2014)

Plan de mantenimiento Predictivo

Objetivos del plan de mantenimiento preventivo

Mantener en óptimo funcionamiento la maquinaria, en este caso el compresor en el laboratorio de turbomaquina mediante una agenda de inspecciones programadas con la finalidad de predecir ciertos fallos.

Minimizar el número de paros en producción por falta de mantenimiento y reparaciones correctivas o aplicación de malas políticas de mantenimiento preventivo.

Análisis, desarrollo e implementación de metodologías que puedan alargar el tiempo de vida de los compresores mediante la recolección de data historial de cada uno de los componentes cinemáticos del compresor.

Alcance

Atender todas las necesidades de mantenimiento para los equipos del laboratorio que puedan ocasionar impactos en seguridad, producción y medio ambiente adaptándonos a las nuevas políticas sobre las inspecciones predictivas de mantenimiento en la Universidad del Zulia, pero sin dejar de innovar y proponer nuevas estrategias en pro de mejoras continuas para el compresor.

Justificación

La implementación de este plan acarrea beneficios al laboratorio de turbomaquinas y en especial al de instrumentación y control ya que con un nuevo programa actualizado de inspecciones predictivas, se podrá garantizar la vida útil del compresor, y las practicas u otras actividades no se verían afectadas.

Conclusiones

De acuerdo a la investigación planteada, el análisis de velocidades implementado por un mantenimiento predictivo en compresores centrífugos fue realizado en un esquema de tiempo apretado pero exitoso, en la cual Se determinó por medio de las condiciones operativas que los compresores estaban urgidos de un plan de mantenimiento debido a la gran cantidad de fallas inesperadas y en lugares menos pensados.

Con referencia a la toma de dato perteneciente al procedimiento de elección de puntos y alarmas se escogieron los puntos de medición en los equipos de acuerdo a los elementos que los conforman y su configuración interna, tratando siempre de ubicarlos lo más cercanos a los elementos de velocidad de acuerdo a sus direcciones axiales y radiales de medición.

Se establecieron niveles de pre alarma y alarma a través de la norma ISO 2372, los cuales permitirán conocer el estado cinemático de los equipos al inicio del programa del mantenimiento aunado se eligieron intervalos personalizados de acuerdo a la experiencia vivida al momento de iniciar los experimentos, observando así el comportamiento durante ese lapso de tiempo de prueba.

Basados en los fundamentos teóricos, se establecieron los criterios de severidad, basado en las fallas y la confiabilidad de cada equipo, aunado a los gráficos de posibles fallas obtenidos por medio de la herramienta de medición de velocidad se establecieron frecuencias de monitoreo que van desde horas de estudio previo hasta un máximo de 8 meses continuos con la finalidad de prevenir la falla mediante la inspección predictiva.

Mediante la observación directa la mayor cantidad de fallas detectadas en el análisis se ubicaron

en los sistemas eléctricos y mecánicos, por lo que hay que tener sumo cuidado de todos los elementos que lo componen por lo que de acuerdo a los análisis de criticidad realizados, el motor eléctrico tiende a sufrir consecuencias catastróficas de no recibir un adecuado mantenimiento

Finalmente, se realizaron 2 planes seguidos; un plan de mantenimiento preventivo rutinario el cual es necesario para la preservación continua de los elementos aledaños a los componentes cinemáticos determinando así los tiempos de operación según el historial de fallas presentado. Seguidamente se realizó el plan de mantenimiento predictivo para los elementos anteriormente mencionados como productores o recibidores directos de velocidad, arrojando como resultado una intensa inspección y monitoreo de las condiciones de operación, esto debido a las condiciones de vejez en que se encuentran los compresores actualmente.

Referencias bibliograficas

1. Corro, Y., Compresor Centrifugo Trabajo Final [Documento en línea] Disponible: <http://es.scribd.com/doc/40648770/Compresor-Centrifugo-Trabajo-Final>. Revisión. Julio 2013 (2010).
2. Rodríguez M., (editorial Limusa), El mantenimiento industrial y aplicaciones. 1era edición. Revisión: Agosto 2013 (2008)
3. Perozo, (Editorial LUZ), EL mantenimiento Industrial. 2da edición. Revisión: septiembre 2013 (2004).
4. Espinosa, (Editorial Limusa), Fundamentos de Mantenimiento Predictivo y Aplicaciones. 1era edición. Revisión. Septiembre 2013 (2010).
5. Normas ISO, Norma 2372 Fundamentos de Velocidad y Vibración de Maquinas rotativas. Revisión. Noviembre 2013 (2000).