



MAINTAINANCE FOCUSED ON RELIABILITY IN MOTOR-COMPRESSORS

MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN MOTOCOMPRESORES

Montalvo, A. * , **Aldana, R. **** , **López, A. **** , **Álvarez, E.J. **** ,
Aldana, F. ** , **Rivera, Y. **** .

* *Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Química,
Maestría en Ingeniería de la Calidad.
Lomas del Estadio S/N, Xalapa, Veracruz, México.
Teléfono y Fax: 52 228 8421700 ext, 11033.
E-mail: ingabmonro@gmail.com*

** *Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y
Eléctrica, Cuerpo Académico Ingeniería Transdisciplinar.
Lomas del Estadio S/N, Xalapa, Veracruz, México.
Teléfono y Fax: 52 228 8421757.
E-mail: raldana@uv.mx , andlopez@uv.mx, eralvarez@uv.mx ,
faldana@uv.mx, yrivera@uv.mx*

Abstract: The motor compressors raise the gas pressure after a fall in pressure and temperature generated during conditioning. The unscheduled stoppage raises costs, as it stops providing service and receiving income. For this study, 11 teams were analyzed, installed in 3 pumping plants, two criteria were used: frequent faults and critical faults, to determine which type of faults have the greatest impact on the operation of the motor compressors; Under the criterion of failures that generate more time out of service, critical failures were more relevant to improve the quality of the process. Three critical faults represented 51.3% of the corrective maintenance time, by preventing them through a maintenance plan based on reliability, the mean time between failures (MTF) was reduced and the pumping service was interrupted for less time.

Keywords: Faults, motor compressors, maintenance.





Resumen: Los motocompresores elevan la presión del gas después de una caída de presión y temperatura generada durante el acondicionamiento. El paro no programado eleva los costos, pues se deja de dar servicio y percibir ingresos. Para este estudio se analizaron 11 equipos, instalados en 3 plantas de bombeo, se usaron dos criterios: las fallas frecuentes y las fallas críticas, para determinar qué tipo de fallas tienen mayor impacto en la operación de los motocompresores; bajo el criterio de las fallas que generan más tiempo fuera de servicio, las fallas críticas resultaron más relevantes para mejorar la calidad del proceso. Tres fallas críticas representaron el 51.3% del tiempo de mantenimiento correctivo, al prevenirlas mediante un plan de mantenimiento basado en confiabilidad, se redujo el tiempo medio entre fallas (MTF) y el servicio de bombeo se interrumpió por menos tiempo.

Palabras clave: Fallas, motocompresores, mantenimiento.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio se realizó en 3 campos de una empresa que ofrece servicios de compresión de gas natural, donde operan 11 motocompresores recíprocos, que al fallar hacen que el Tiempo Medio entre Fallas (por sus siglas en inglés MTBF) se reduzca; durante el año 2015, fue un 627.88 horas, superior a la meta establecida para ese año de 560 horas, mientras que en 2016 el MTBF fue 632.05 horas, inferior a la meta para ese año de 720 horas, lo que implicó incumplir la meta de operación.

El tiempo medio entre fallas puede incrementarse mediante la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad, de conformidad con la norma ISO 14224.

2. MARCO TEÓRICO

El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) es el que transcurre entre la puesta en operación de un equipo y el momento en que falla, si es pequeño, los paros no programados son frecuentes y al realizar un estudio de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (por sus siglas RCM) se puede estimar la vida útil de los componentes de un equipo y, por lo tanto, controlar la frecuencia de fallas para elevar el MTBF.

2.1. Antecedentes

Se han estudiado las fallas de motocompresores; por ejemplo, Corvaro et al (2016) usó un análisis Confiabilidad-Disponibilidad-Mantenibilidad (por sus siglas en inglés RAM) para definir los periodos de ejecución del mantenimiento, priorizó el mantenimiento preventivo, para tener una disponibilidad mayor al 96%. En otra investigación Voiniov et al (2016) rediseñó las válvulas de pétalo de compresor, para incrementar su vida útil, incrementando el MTBF hasta en un 50%. En tanto, Townsend et al (2016), estudiaron la temperatura en los cojinetes de 14 motocompresores, cambiaron un sistema instrumentado de protección mecánico de temperatura por uno electrónico e inalámbrico, la confiabilidad del sistema mecánico fue 2.04% mientras que para el sistema electrónico fue 99.99%, que incrementó el MTBF de todo el equipo. Melo González et al (2009) estimó la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad, mediante una simulación tipo Monte Carlo, de un sistema de compresión de gas amargo durante, observó que la confiabilidad del sistema de compresión decrece a través del tiempo, determinó la variación de la tasa de fallas, la función de densidad de probabilidad de fallas, así como el tiempo promedio del mantenimiento de las fallas, mientras que la disponibilidad obtenida fue 99.95%, antes de la puesta en operación de los equipos.





2.2 Mantenimiento

Mantenimiento es el conjunto de actividades interrelacionadas, técnicas, administrativas y de supervisión, que tienen como finalidad mantener o reparar un equipo para que este opere o se encuentre en un estado que le permita realizar las funciones (International Organization For Standardization, 2016); en las normas ISO 14224 e ISO 22400 se reconoce dos tipos de mantenimiento, preventivo y correctivo.

El mantenimiento preventivo se lleva a cabo en un periodo programado y se consideran actividades determinadas, para disminuir la probabilidad de avería o el deterioro del equipo (International Organization For Standardization, 2016), se lleva a cabo en una suspensión prevista del proceso, para no afectar la producción, contando con presupuesto para este tipo de mantenimiento (Clará Díaz, Domínguez de la Paz y Pérez Medrano, 2013).

El mantenimiento correctivo se realiza posterior a la ocurrencia de la falla, para que pueda seguir con su operación normal requerida (International Organization For Standardization, 2016), se producen paros en el proceso productivo, reduciendo el tiempo operativo efectivo, también genera gastos por reparaciones no previstas, lo que con el paso del tiempo puede dar lugar a falta de recursos económicos para adquirir los repuestos necesarios o costear el mantenimiento de los equipos (Moubray, 2004).

2.3 Confiabilidad

Confiabilidad es la probabilidad de que un componente o sistema desempeñe, de manera satisfactoria, la función para la que fue creado, durante un periodo establecido y bajo condiciones de operación específicas (Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar, 2009).

3. METODOLOGÍA

Se organizó en tres fases, la primera fue el análisis de las fallas de los Motocompresores, conformada por 4 actividades (revisión del historial de fallas y horas de operación en la empresa, establecer el catálogo de fallas, creación de la base de datos de fallas y análisis causa-efecto de fallas) y permitió identificar la falla crítica de cada planta, así como la frecuencia con la que suceden; en la segunda fase se estableció el programa de mantenimiento para cada planta, al conocer la falla crítica y su frecuencia es posible anticiparse a la falla mediante el mantenimiento centrado en confiabilidad; y en la tercera fase, se aplicó el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad a las fallas que más impactan al proceso.

El tiempo medio entre fallas (MTBF) mes el promedio del tiempo que existe desde que un equipo empieza a operar hasta el momento t , en el que ocurre la falla (ver ecuación 1)

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n TBF_i}{FE+1} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde TBF_i (Tiempo de Operación Entre Fallas) es el total de tiempo operado entre dos eventos de falla consecutivos de un equipo reparado y FE (Evento de Falla) es el final de la capacidad de un equipo para realizar una función requerida.

El tiempo medio para reparar (MTTR) es el tiempo promedio necesario para restaurar un componente que ha fallado en una unidad de trabajo (International Organization for Standardization, 2014a). Se expresa en horas y se calcula para cada unidad de trabajo, con la ecuación 2.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n TTR_i}{FE+1} \quad \text{Ec. 2}$$





Donde **TTRi** (Tiempo de Reparación) es el intervalo de tiempo durante el cual un equipo está fuera de operación debido a una falla y **FE** (Evento de Falla) es la terminación de la capacidad de un equipo para realizar una función requerida.

La disponibilidad (**DISP**) es la capacidad de una unidad de trabajo para operar y se calcula en relación con la capacidad disponible (International Organization for Standardization, 2014b), se expresa en porcentaje y es llamado factor de capacidad, se calcula con la ecuación 3.

$$DISP = \frac{TO}{TPO} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde **TO** (Tiempo Operación) es el total de tiempo operado dentro del periodo que se requiere analizar y **TPO** (Tiempo Planeado de Operación) es el tiempo de operación, menos el tiempo de inactividad planificado.

4. RESULTADOS

Los resultados se reportan en el mismo orden que la metodología, iniciando con el análisis de fallas.

4.1 Análisis de fallas

El análisis de las fallas en Motocompresores permitió identificar la falla crítica y el MTBF crítico en cada una de las tres plantas para diseñar el programa de mantenimiento para cada planta. Con base en el historial de fallas se determinó que, en promedio, ocurrió una falla cada 632.05 horas, que se tardó 5.95 horas, en promedio, en reparar cada falla, para tener una disponibilidad del 99.53% para el año 2016; esta confiabilidad fue superior al 96% (Corvaro et al, 2016) en su estudio de simulación de la aplicación de análisis confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad, a la operación de Motocompresores y similar a la simulación con Monte Carlo (Melo González et al, 2009) con 99.95%.

También se analizó la frecuencia anual de las fallas por cada estación de bombeo (ver tabla 1); en las estaciones A y C la falla más frecuente es “Sistema de control o tablero” (6 y 3 fallas, respectivamente), y en la estación B, el “Sistema motriz” (20 fallas).

Tabla 1. Frecuencia de fallas

Sistema objeto de la falla	Estación A	Estación B	Estación C
Sistema motriz	5	20	2
Sistema impulsado compresor	1		
Sistema de control o Tablero	6	3	3
Sistema de lubricación forzada	4	2	1
Sistema de lubricación	1	2	
Sistema de Gas combustible		1	
Sistema de encendido		1	
Sistemas auxiliares	1	2	
Sistema de seguridad		1	
Sistema drene de líquidos	2		
Sistema de enfriamiento		7	1
Proceso	3		
Otro		3	

Fuente. Autor

En cada una de las estaciones de bombeo se identificaron fallas críticas distintas, con base en la proporción del tiempo del mantenimiento correctivo dedicado a reparar (ver tabla 2). La falla crítica en la estación A, fue el “Proceso” (76.4%), en la estación B, el “Sistema impulsado compresor” (51.3%), y en la estación C, el “Sistema de control o tablero” (40.5%).





Tabla 2. Proporción del tiempo de mantenimiento correctivo dedicado a reparar las fallas

Sistema objeto de la falla	Estación A	Estación B	Estación C
Sistema motriz	5.1%	30.6%	35.7%
Sistema impulsado compresor	2%	51.3%	
Sistema de control o Tablero	5.6%	1.8%	40.5%
Sistema de lubricación forzada	4.2%	0.5%	7.1%
Sistema de lubricación	0.7%	0.9%	
Sistemas auxiliares	2.2%	2.2%	
Sistema de enfriamiento	3.7%	9.1%	9.5%
Proceso	76.4%	1%	

Fuente. Autor

Atender las fallas críticas incrementó el tiempo medio entre fallas, más que dedicarse a las fallas frecuentes. En la tabla 3 se muestra el tiempo medio entre fallas (MTBF) para la falla más crítica por cada estación de bombeo.

Tabla 3. Tiempo medio entre fallas (MTBF) para la falla más crítica

	Estación A	Estación B	Estación C
Horas operadas	4,433.3	8,493.8	5,030.8
Fallas críticas	2	2	1
MTBF de falla más crítica (horas)	2,216.7	4,246.9	5,030.8

Fuente. Autor

4.2 Programa de mantenimiento

Se diseñó un plan de mantenimiento donde la frecuencia de mantenimiento se debe realizar al 80% del tiempo medio para reparar la falla crítica, así en la estación A se debe realizar el mantenimiento de "Proceso" cada 74 días (o 1773.33 horas), en la estación B, el mantenimiento al "Sistema impulsado compresor" se recomienda realizarse cada 142 días (o 3397.50 horas) y en la estación C, el mantenimiento preventivo al "Sistema de control", se recomienda llevarlo a cabo cada 168 días (o 4024.66 horas).

4.3 Aplicación del plan de mantenimiento

Al aplicar el plan de mantenimiento las horas operadas se incrementaron en 0.5%, las horas de mantenimiento correctivo disminuyeron 52.64%, la cantidad de fallas se decrementó 11.84% (ver tabla 4).

Tabla 4. Comparación de indicadores atendiendo las fallas frecuentes VS fallas críticas

Indicador	Con fallas frecuentes	Con fallas críticas	Mejora porcentual
Horas operadas	48,036	48,274.09	0.50%
Horas de mantenimiento correctivo	452.33	214.24	- 52.54%
Horas disponibles	47,871.67	47,871.67	0%
Cantidad de fallas	76	67%	- 11.84%

Fuente. Autor

Los indicadores obtenidos a partir de la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad se resumen en la tabla 5. El tiempo medio entre fallas se incrementó





14% (720.51 horas), mientras el tiempo medio para reparar disminuyó 46.22% y la disponibilidad aumentó 0.25%.

Tabla 5. Indicadores de calidad con la aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad

	Sin mantenimiento centrado en confiabilidad	Con mantenimiento centrado en confiabilidad	Mejora porcentual
MTBF	632.05	720.51	14%
MTTR	5.95	3.20	-46.22
DISP	99.53%	99.78%	0.25

Fuente. Autor

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos al aplicar el plan de mantenimiento se observó que el MTBF aumentó, el MTTR disminuyó (46.22%) y la DISP aumentó (14%), se aprecia que concuerdan por los obtenidos por Berger y colaboradores (2012) al determinar que el uso del mantenimiento preventivo incrementó la disponibilidad 99.33%, así como el incremento de la disponibilidad del 87% al 87.5% y reducción del tiempo medio para reparar MTTR de 5.3 hrs a 4 hrs (Flores et al, 2010).

6. CONCLUSIONES

Existe una relación estrecha entre la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad y los indicadores, se comprobó que los indicadores MTBF, MTTR Y DISPONIBILIDAD fueron modificados de manera positiva. El

indicador de mayor importancia fue el MTBF, que aumentó; sin embargo, el MTTR disminuyó y la disponibilidad (DISP) también se incrementó; se concluyó que la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad mejora los indicadores MTBF, MTTR y DISP.

7. RECONOCIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCyT) por la beca de posgrado concedida al Ing. Abraham Montalvo para realizar estudios de Maestría en Ingeniería de la Calidad (MIC) y a la Universidad Veracruzana por brindar el apoyo para la realización de este estudio, a través de la Coordinación de la MIC.

8. REFERENCIAS

- Clará Díaz O, Domínguez de la Paz R y Pérez Medrano E. (2013). *Sistema de Gestión de mantenimiento productivo total para talleres automotrices del sector público*. Ciudad Universitaria, El Salvador.
- Corvaro F., Giacchetta G, Marchetti B., Recanati M. (2016). *Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618*, Petroleum, doi:10.1016/j.petlm.2016.09.002.
- Flores M, Torres J, Rodríguez J, Alcaraz A (2010). *Confiabilidad Operativa de Sistemas para Compresión de Gas y Generación Eléctrica en Complejos Petroleros*. Inf. Tecnol. V.21 n.3 La Serena 2010, pp 13-25. ISSN 0718-0764.
- Gutiérrez-Pulido H y De la Vara Salazar R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. México, DF. McGraw-Hill/Interamericana Editores, SA de CV.





- Melo-González R, Lara-Hernández C y Jacobo-Gordillo F. (2009). *Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación de Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería*. Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 24; núm. 2, julio-diciembre, 2009, pp. 93-104. ISSN 0186-6036. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C. Monterrey, México.
- Moubray J. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. RCM II. USA: Lillington, ISBN-13: 978-0750633581.
- Townsend J, Affan M, Szekerces J. (2016). *Updating temperature monitoring on reciprocating compressor connecting rods to improve reliability*. Engineering Science and Technology, an International Journal. Vol. 19, Issue 1, March 2016, pp 566-573.
- Voiniov K, Grigor A, Grigor K. (2016). *Compressor Reliability Improvement* in Procedia Engineering, Vol. 150, pp 448-452.

SITIOS WEB

- International Organization for Standardization (2016). ISO 14224:2016. Industrias del petróleo y gas natural – Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. <https://www.iso.org/standard/64076.html> (Consultado: 10 de diciembre de 2017).
- International Organization for Standardization (2014a). ISO 22400-2:2014. Manufacturing operations management – Key performance indicators <https://www.sis.se/api/document/preview/916920/> (Consultado: 1 de febrero de 2018).
- International Organization for Standardization (2014b). ISO 55001:2014. Asset management – Management systems – Requirements <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55001:ed-1:v1:es> (Consultado: 6 de febrero de 2018).

