

Análisis de los parámetros de Confiability, Disponibilidad y Mantenibilidad de la planta compresora de Jusepín 12

Vega-Mejía, Rubén^{1,2,*}; Velásquez, Asdrúbal¹; Ronceros, Cristhian^{3,1}; De La Cruz, Carlos¹

¹Universidad de Oriente (UDO), Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Maturín, Venezuela

²Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Barquisimeto, Venezuela.

³Universidad Tecnológica del Perú, Escuela de Ingeniería Industrial, Ica, Perú

Resumen: El propósito de esta investigación consistió en analizar los parámetros de mantenimiento de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM) de la planta compresora Jusepín 12 situada en el estado Monagas de Venezuela. En el inicio del estudio, se detectaron 991 fallas durante el periodo 2017-2019, de las cuales el 84,3 % se atribuyeron al sistema motor compresor, lo que representó un total de 17166,5 horas fuera de servicio de este sistema. Por lo tanto, la investigación se enfocó primordialmente en este sistema. Además, en el intervalo temporal previo y basándose en los tiempos entre fallos (TBF), ajustados a la distribución Weibull 3P, se registraron valores de confiabilidad del 43,75 %; 36,44 % y 37,81 %. Estos valores se sitúan en 95%, valor por debajo del Indicador Clave de Rendimiento (KPI) para sistemas motocompresores. Con respecto a la mantenibilidad, los valores de 71,85 %; 72,46 % y 71,42 % fueron considerados aceptables. Finalmente, la disponibilidad del sistema investigado fue del 79,4 %; 86,4 % y 84,8%; cifras que se sitúan por debajo del KPI establecido (94 %). Se concluyó que la disponibilidad obtenida se debe a una mejor mantenibilidad en comparación con la confiabilidad.

Palabras clave: Weibull 3P, sistemas moto-compresores, tiempo entre falla (TBF), indicador clave de rendimiento (KPI)

Analysis of the Reliability, Availability and Maintainability parameters of Jusepín 12 compressor plant

Abstract: The purpose of this research was to analyze the reliability, availability and maintainability (CDM) maintenance parameters of the Jusepín 12 compressor plant located in the Monagas state of Venezuela. At the beginning of the study, 991 failures were detected during the period 2017-2019, of which 84.3 % were attributed to the compressor motor system, which represented a total of 17166.5 hours out of service of this system. Therefore, the investigation focused primarily on this system. In addition, in the previous time interval and based on the times between failures (TBF), adjusted to the 3P Weibull distribution, reliability values of 43.75%, 36.44 % and 37.81% were recorded. These values are 95%, which is below the Key Performance Indicator (KPI) for motor compressor systems. Regarding the maintainability, the values of 71.85 %, 72.46 % and 71.42 % were considered acceptable. Finally, the availability of the system investigated was 79.4 %, 86.4 % and 84.8 %, figures that are below the established KPI (94 %). It was concluded that the availability obtained was due to a better maintainability compared to reliability.

Keywords: Weibull 3P, motor compressor systems, time between failures (TBF), key performance indicator (KPI)

1. INTRODUCCIÓN

La competitividad industrial a nivel mundial demanda la implementación de sistemas de producción automatizados capaces de funcionar de manera fluida y eficaz (Tsarouhas, 2020). En este contexto, la prioridad primordial para el departamento operativo de cualquier entidad es mantener la

producción en su capacidad máxima, como resultado de la competencia ininterrumpida que impone el actual ambiente empresarial (Gómez y González, 2015). Por consiguiente, en el contexto corporativo, la alta dirección ha identificado la necesidad de optimizar todos los sistemas que operan en las organizaciones (De Nicolo, 2015). Bajo este marco, el mantenimiento constituye uno de estos sistemas y, desde una

*rvegas@udo.edu.ve

Recibido: 29/08/2024

Aceptado: 15/01/2025

Publicado en línea: 28/02/2025

10.33333/rp.vol55n1.06

CC 4.0

perspectiva amplia, es una de las áreas que contribuye de manera significativa al incremento de la productividad organizacional, siempre que se analice en conjunto con la producción y la calidad (Ramos, 2012).

No obstante, con la creciente complejidad de los sistemas industriales, resulta desafiante para el personal operativo optimizar o mantener la producción y productividad de todo el sistema, garantizando que cada componente o sistema de la planta opere sin fallos, dado que el fallo es un fenómeno ineludible en los sistemas (Garg, 2014). En consecuencia, asegurar la operatividad ininterrumpida de los equipos que desempeñan un papel crucial en la mejora de la productividad, lo que incrementa así la producción y la productividad, es potencialmente factible mediante las siguientes estrategias: evaluación del desempeño de la maquinaria existente en el entorno laboral, organización del ambiente laboral, estricto cumplimiento de las acciones de mantenimiento planificado, inventario óptimo de piezas de repuesto y capacitación de operarios y mantenimiento (Jakkula et al., 2022).

Es importante subrayar que las fallas en los equipos de producción de las industrias en general pueden crear una serie de dificultades; esto es, una disminución en el rendimiento, la calidad, un impacto económico y un retraso en los plazos de entrega. En este contexto, Tsarouhas (2011) propone que, para prevenir fallos aleatorios y su impacto en el desempeño de los sistemas, la gestión del mantenimiento es imprescindible para minimizar la pérdida de tiempo operativo del sistema y la producción de componentes defectuosos. En dichas condiciones, resulta evidente que un estudio exhaustivo de los parámetros de mantenimiento, tales como la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM), podría desempeñar un papel crucial en la etapa de diseño y en cualquier modificación requerida para alcanzar un rendimiento optimizado de dichos sistemas (Tsarouhas, 2020).

El diagnóstico de los parámetros CDM constituye una de las metodologías más empleadas en la evaluación del rendimiento de los sistemas reparables (Koohsari et al., 2022). Sin embargo, la evaluación de estos parámetros en cualquier sistema industrial puede variar debido a diversos factores, tales como las condiciones operativas del sistema, el grado de formación de los trabajadores (operadores, técnicos y gerentes), la política de mantenimiento vigente, entre otros. En consecuencia, el sistema es particular y demanda un conocimiento especial para su resolución (Tsarouhas, 2020). De ahí que el análisis estadístico sea esencial en la valoración de los parámetros CDM de los sistemas industriales complejos (Kumar et al., 2020). Adicionalmente, Chavez et al. (2020) señalan estos parámetros como las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos, que poseen el mantenimiento para su análisis y evaluación integral, lo que los convierte en modelos universales.

Considerando la relevancia expuesta de los parámetros CDM, se han realizado múltiples investigaciones en torno al tema. Entre las más recientes se encuentra: Rajaprasad (2018), que examinó las características CDM de una máquina de papel de 120 toneladas diarias en una planta de papel en la región

meridional de la India. Soltanali et al. (2019) propusieron una metodología innovadora que emplea el análisis CDM para cuantificar el impacto esperado. Esta metodología permite interpretar el rendimiento real y la identificación de los cuellos de botella y las oportunidades de optimización. Tsarouhas (2019), en su artículo titulado "análisis estadístico de los datos de fallo para estimar la fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de una línea de producción automática de croissants", analizó datos de fallos mediante técnicas estadísticas descriptivas. Asimismo, realizó pruebas de tendencia y correlación de los datos de fallos. Además, estimó la fiabilidad y la mantenibilidad tanto de la línea de producción de croissants como de sus estaciones de trabajo en distintos períodos mediante diversas distribuciones con el objetivo de discernir cuál presentaba un ajuste más óptimo.

En su estudio, Kumar et al. (2020) aportaron hallazgos derivados de las medidas de CDM con el objetivo de optimizar el rendimiento operativo de una planta de tratamiento y suministro de agua blanda (SWTS-Plant). En este contexto, Tsarouhas (2020) proporcionó una evaluación meticulosa sobre el análisis de CDM, empleando datos de fallos de una industria heladera. Gallegos-Londoño et al. (2020), en su estudio de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad aplicada a grupos electrógenos de primera generación (prime), proporcionaron una secuencia lógica de etapas requeridas para el cálculo de los indicadores de CDM correspondientes. Koohsari et al. (2022) divulgaron los hallazgos de un estudio crítico fundamentado en las técnicas estadísticas, relativos a los parámetros CDM de las máquinas de equilibrio de presión de la tierra (EPBM) empleadas en la concepción de un proyecto de metro urbano en Isfahan, Irán.

Con base en lo expuesto, el estudio de los parámetros CDM facilita la evaluación del comportamiento de los componentes, subsistemas y sistemas, fundamentándose en su configuración, políticas de mantenimiento, recursos disponibles y filosofía operativa. Este enfoque ha adquirido una relevancia significativa en las industrias petroleras globales (Ronceros, 2022). En este contexto, la organización PDVSA Compresión Gas, perteneciente a Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA), se distingue por la implementación de protocolos de mantenimiento tradicionales en la mayoría de sus procesos. Esto permite a la entidad utilizar estudios de ingeniería orientados al principio de confiabilidad con el objetivo de optimizar su desempeño (Ronceros y Pomblas, 2023).

Bajo este marco, el propósito de la presente investigación fue estudiar las fallas y analizar los parámetros de mantenimiento relacionados con la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM) de la planta compresora Jusepín 12 perteneciente al Complejo Operacional Jusepín (COJ), Distrito Furrial de PDVSA Compresión Gas, ubicada al norte del estado Monagas Venezuela. Esta instalación representa una de las más significativas para la Gerencia de Compresión de Gas de Oriente, una entidad vinculada a PDVSA Gas, específicamente a la gerencia de Maturín. No obstante, su rendimiento no ha cumplido con las expectativas establecidas, y se han documentado fallos recurrentes, desviaciones en las variables operativas, elevados costos y una carencia en el suministro de repuestos y carga de líquidos en las unidades

motocompresoras, factores que han impactado negativamente en su producción. Se anticipa que este estudio establecerá los cimientos para una futura optimización de la fiabilidad operativa a través de la implementación de la técnica de análisis metodológico CDM.

2. METODOLOGÍA

El estudio documental se basó en datos aportados por la Superintendencia de Ingeniería de Mantenimiento de la Gerencia General de Compresión Gas Oriente de PDVSA Gas, en el lapso enero de 2011 y diciembre de 2019. Para el logro de los objetivos planeados se establecieron las siguientes fases:

2.1. Descripción del contexto operacional de la planta: inicialmente se examinaron aspectos de la planta tales como: la capacidad de compresión, el análisis funcional de la planta compresora, el flujo de gas comprimido durante el periodo 2011-2019 y la identificación de los periodos críticos de acuerdo con la metodología propuesta por Velásquez (2022). Este estudio se realizó con el objetivo de comprender el entorno operativo y vincular este con la existencia de fallas.

2.2. Estudio de las averías: se llevó a cabo mediante la identificación de las fallas, la determinación de las horas fuera de servicio para identificar el sistema crítico, la determinación de la relación entre el número de fallas y las horas fuera de servicio, así como la determinación de los tiempos entre fallas (TEF) y tiempos fuera de servicio (TFS). Se fundamentó lo anterior en los procedimientos ejecutados por Corvaro et al. (2017) y Montalvo et al. (2006).

2.3. Análisis estadístico de los parámetros CDM: se fundamentó en la metodología propuesta por Tsarouhas (2020); la investigación de fiabilidad basada en el procedimiento sugerido por Jakkula et al. (2022); la mantenibilidad conforme a lo indicado por Cuaical-Angulo et al. (2019) y la disponibilidad conforme a lo postulado por Faris (2021). El análisis se llevó a cabo utilizando el software estadístico Minitab ®.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La planta compresora Jusepín 12 tiene una capacidad instalada para comprimir 120 millones de pies cúbicos de gas natural por día (MMPCND), está compuesta principalmente por cuatro (4) unidades moto-compresoras idénticas denominadas K-1010, K-1020, K-1030 y K-1040. El gas comprimido proviene de pozos del campo Jusepín, Distrito Furrial, el cual es operado por PDVSA Exploración y Producción Oriente. Los trenes de compresión instalados en la planta tienen una capacidad máxima de 30 MMPCND cada uno y actualmente constan de los siguientes equipos: un depurador de primera etapa, un compresor alternativo de tres etapas, un enfriador de tres etapas, un depurador inter-etapas y un depurador de tercera etapa. El flujo de la planta también puede reducirse a petición del cliente, gestionándolo entre 30 y 120 MMPCND en función del número de grupos moto-compresores en funcionamiento. Además, según el análisis funcional de las

operaciones, la planta se subdivide en un sistema de compresión principal y un sistema de equipos secundarios o auxiliares.

En cuanto a la producción de la planta, en la Figura 1, se precisa que los datos que abarcan el periodo de enero de 2011 y diciembre de 2019, muestran que la producción máxima fue de 102 MMPCND y la producción mínima de 76 MMPCND en los años 2012 y 2017, respectivamente. Como se observa, la planta nunca ha comprimido a su máxima capacidad, esto se debe probablemente a la presencia de una restricción de capacidad de gas de los trenes de separación de media presión existentes, junto con la presencia de un patrón de flujo aguas arriba intermitente y una distribución de flujo desigual debido a la configuración no simétrica del colector de entrada común de los módulos II y III (Trujillo y Brito, 2009).

No obstante, si se observa la Figura 1, el flujo de gas comprimido por la planta ha ido disminuyendo progresivamente y en los últimos años ha mostrado una condición inestable, lo cual preocupa la gerencia de producción. En función de este comportamiento de la producción y subdividiendo los años de estudio en tres periodos, se detalla que:

- *Periodo 1 (2011-2013):* corresponde al inicio de operaciones, normalmente al ser un equipo nuevo, la planta mostró un comportamiento estable en la curva de flujo comprimido manteniendo un promedio de 101 MMPCND. Sin embargo, a pesar de ser un equipo nuevo, el volumen máximo alcanzado por la planta en un día libre de fallas fue de 102 MMPCND, lo que muestra que, a pesar de no presentar fallas, la planta no fue capaz de alcanzar el flujo de diseño.

- *Periodo 2 (2014-2016):* en este periodo el flujo de gas comprimido disminuyó con respecto al periodo anterior, reportando un promedio de 91 MMPCND, además de presentar una tendencia a la baja, y pasar de comprimir en el 2014 de 95 MMPCND a 87 MMPCND. En el último año de este periodo, el flujo máximo alcanzado por la planta en un día libre de fallas fue de 104 MMPCND.

- *Periodo 3 (2017-2019):* el flujo de gas comprimido continuó disminuyendo, y manejó un flujo promedio para el periodo de 78 MMPCND. El flujo máximo manejado por la planta en un día libre de fallas fue de 98 MMPCND, por debajo de su nivel de diseño.

La filosofía de operación de la planta establece que, durante el periodo de recepción de gas, la operación debe mantenerse constante las 24 horas del día, y sólo se permitirá su cierre mientras se esté llevando a cabo algún tipo de mantenimiento, ya sea correctivo o preventivo. No obstante, la operación continua de los compresores reciprocatantes no puede exceder un máximo de 12/24 meses antes de que el desgaste de válvulas y juntas sea inaceptable, y las tareas de movimiento sólo pueden durar un máximo de tres años entre revisiones significativas (Corvaro et al., 2017).

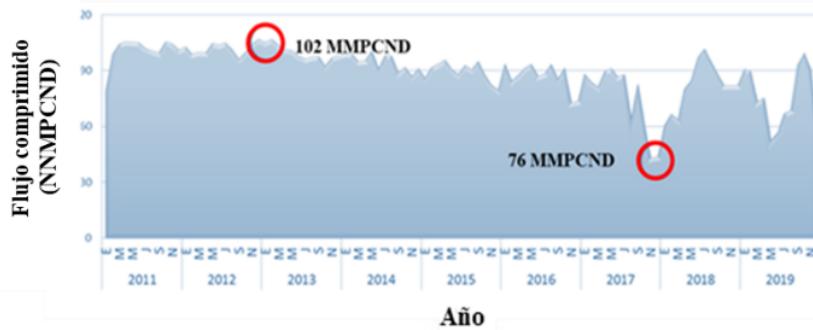


Figura 1. Flujo de gas comprimido planta compresora Jusepín 12 (promedio mensual 2011-2019)

En este sentido, lo descrito no coincide con el comportamiento de producción mostrado, por lo que se considera que, durante el funcionamiento normal de la planta compresora, el flujo de gas comprimido se veía afectado principalmente por mantenimientos programados, averías en los equipos principales o auxiliares, fallos externos, condiciones y variación de los parámetros del proceso o por petición del cliente. Por lo tanto, debido al bajo nivel de producción, el período 2017 - 2019 se consideró el más crítico. A continuación, en la Tabla 1 se muestra el número de fallas y horas de falla presentada por los sistemas de la planta Jusepín 12.

En la Tabla 1, se muestra que el estudio de fallas durante el período 2017-2019 mostró un total de 991 fallas y el 84,3 % de ellas corresponden al sistema de compresión, representado por las cuatro unidades moto-compresoras. El sistema eléctrico general y el sistema general de succión contribuyeron con 105 y 37 fallas respectivamente, simbolizando estos tres sistemas el 98,6 % del total de fallas. Cabe destacar, que el suministro eléctrico de la planta depende del sistema eléctrico nacional, por lo que no son inherentes al proceso de compresión. Los fallos del sistema de aire comprimido, el sistema general de descarga, el sistema de gas combustible y el sistema de recogida de condensados representaron algo más del 1 % del total de fallas. Es importante señalar, que el fallo del sistema de compresión (grupo moto-compresor) afecta al flujo de gas manejado por el equipo (30 MMPCND); por el contrario, un fallo en cualquier otro sistema, ya sea auxiliar o de servicio, provoca la parada total de la planta y del flujo total de 120 MMPCND. Asimismo, en la Tabla 1 se detalla que las averías descritas representaron un total de 18518,35 horas de parada, de las cuales el 92,7 % (17166,5 h) son del sistema de compresión.

Tabla 1. Número de fallas y horas de falla presentada por los sistemas de la planta Jusepín 12

Sistema	Número de fallas	Porcentaje (%)	Horas de falla	Porcentaje (%)
Compresión	835	84,3	17166,5	92,7
Eléctrico	105	10,6	518,5	2,8
Succión	37	3,7	703,7	3,8
Aire comprimido	6	0,6	55,6	0,3
Descarga	4	0,4	37,0	0,2
Gas combustible	2	0,2	18,5	0,1
Recolección de condensado	2	0,2	18,5	0,1
Total	991	100,0	18518,3	100,0

Los resultados obtenidos concuerdan con Corvaro et al. (2017) quienes indicaron que las fallas del sistema de compresión representaron para ellos el 61,9 % del total de fallas. De igual manera, coinciden con Montalvo et al. (2006) quienes en su estudio indicaron que los porcentajes de fallas en el sistema de compresión fue de 53,7 % y 81,9 % para las plantas A y B respectivamente. En ambos estudios los porcentajes de fallas del sistema de compresión también representaron ser los más altos.

Debido al número de fallos y tiempos de reparación (TTR) del sistema de compresión, éste fue considerado crítico respecto a los demás. En tal sentido, se precisa en la Figura 2 que la unidad K1030 tiene el mayor número de fallas totales en los años de estudio (242 fallas), pero es la que presentó un TTR total inferior al máximo registrado. La unidad K1020, a pesar de tener el menor número de fallas totales (162 fallas), presentó el mayor tiempo total de inactividad (4852,1 h) entre las cuatro unidades.

El comportamiento descrito es común en componentes electromecánicos cuyas fallas se asocian al desgaste, el cual inicia al momento de empezar operar el equipo. Por lo tanto, se puede presentar que una falla tenga un gran TTR o puedan existir un gran número de fallas con bajo TTR, posiblemente asociado a malas reparaciones, mala calidad de los repuestos o mal puesta a punto del equipo.

En cuanto al análisis estadístico de los parámetros CDM de las unidades moto-compresoras, la Figura 3 muestra que durante el período 2011 y 2016 los tiempos promedios entre fallas (MTBF) fueron mayores con respecto a los tiempos medios de reparación (MTTR), por lo que se obtuvo la mejor producción de la planta, es decir, hubo un desempeño normal durante este lapso. Sin embargo, los MTTR aumentaron durante el período 2017-2019 (periodo crítico) respecto a los dos períodos anteriores, siendo 2017 el año más desfavorable, donde se evidenciaron MTTR superiores al MTBF, lo cual destaca dos MTTR de 245,3 y 362,3 h, que están asociados a los procesos administrativos y no a reparaciones propiamente dichas.

También de detalla que sólo se alcanzaron tres MTBF superiores a 450 h durante el período, pero el comportamiento normal fue de MTBF inferior a la mitad de este tiempo (< 225 h).

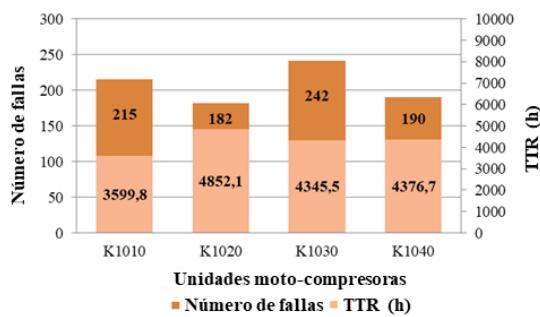


Figura 2. Número de fallas y tiempo de reparación (TTR) del sistema de compresión PC Jusepín 12 (Periodo 2017-2019)

Corvaro et al. (2017) presentaron MTTR de 29,6 h y MTBF de 597,5 h para unidades moto-compresoras. De manera similar, Montalvo et al. (2006) reportaron MTBF de 632,05 y MTTR de 5,95 h. Se detalla que estos MTBF son mayores y MTTR menores que los determinados en esta investigación, lo que demuestra que sus unidades tienen un mejor desempeño con respecto a las unidades moto-compresoras de la planta Jusepín 12.

En la Tabla 2, se observa la estadística descriptiva relativa a los TBF. En esta tabla, se refleja un aumento de los MTBF del año 2017 al año 2019. Sin embargo, los equipos sólo trabajaron de forma continua 4,37 días (105,4 h), 6,5 días (156 h) y 6,73 días (161,4 h) de media en los respectivos años objeto de estudio. Los coeficientes de variación sugieren la dispersión de los TBF, y muestran un aumento con el tiempo, lo que demuestra una falta de control del parámetro.

Los tres valores de asimetría fueron superiores a cero, por lo que hay datos que sesgan la distribución hacia la derecha, como los valores máximos de 481,9 h y 486 h; siendo esto, un indicio de bajo rendimiento de los equipos con TBF bajos como son los mínimos mostrados. Por último, las Kurtosis reflejaron tres comportamientos diferentes, para el año 2017 los datos fueron más dispersos por lo que su comportamiento fue plásticúrtico. Para 2018, demostraron una mayor concentración de los datos respecto a la media y su comportamiento se considera leptocúrtico y para el año 2019, que teóricamente sería el ideal (mesocúrtico) y asociado a un alto MTBF.

Otros estudios como los de Kumar et al. (2020) y Tsarouhas (2019), también encontraron un sesgo positivo en su estudio de los tiempos entre fallas (TBF), sugiriendo que es posible aumentarlos y así afectar positivamente a la confiabilidad. Igualmente mostraron una variabilidad de los datos que llevó a un alto coeficiente de variación (> 30), lo cual muestra que la mayoría de los datos de funcionamiento están por debajo de la media y sólo unos pocos por encima de ella.

Al analizar TBF mediante la prueba de Grubbs, se obtuvo un valor G de $2,81 < 2,89$ G crítico, lo que indica que no se encontraron valores atípicos para un intervalo de confianza del 99,5 %. Un valor atípico es una observación que, por ser muy diferente de otras observaciones del mismo conjunto de datos, puede considerarse creada por un mecanismo diferente (Hawkins, 1980).

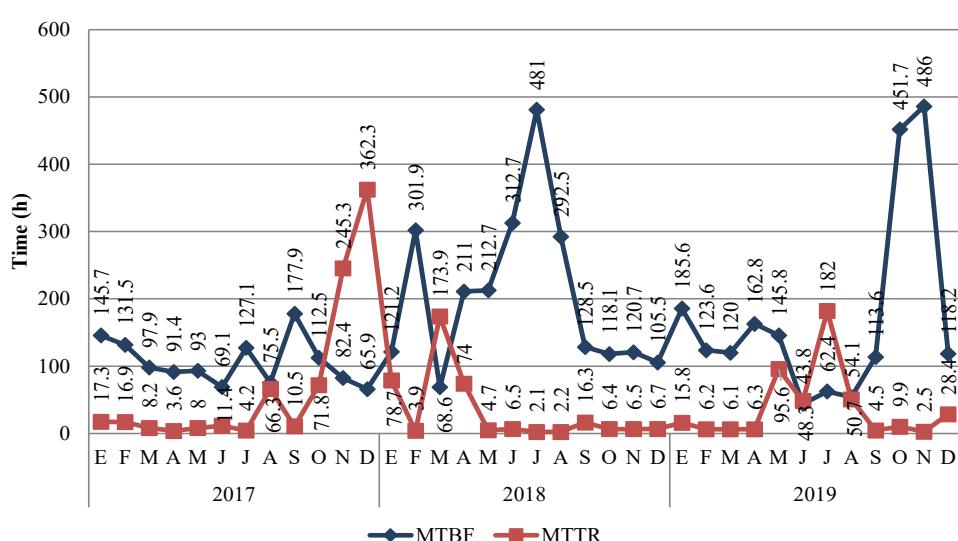


Figura 3. Tiempos medios entre falla (TMBF) y tiempos medios de reparación (MTTR) de planta compresora Jusepín 12 (2017-2019)

Tabla 2. Estadísticas descriptivas del TBF

	2017	2018	2019
Media (MTBF)	105,8	156,0	161,4
Desviación Standard	34,10	100,9	115,6
Coeficiente de variación	32,22	64,68	71,61
Mín.	65,9	65,9	43,8
Mediana	95,45	121,0	121,0
Máx.	177,9	481,9	486,0
Asimetría	0,84	1,85	1,78
Kurtosis	0,13	3,59	2,55

En la Figura 4, al emplear la prueba de Anderson-Darling (AD) para el método de estimación de máxima verosimilitud, se evidencia que en cada uno de los años de estudio los valores de TBF se ajustaron a la distribución Weibull 3P. Esto se atribuye a los menores estadísticos del parámetro en comparación con Weibull 2P. Como ilustración, en la Figura 4a correspondiente al año 2017 se registró un estadístico de AD de 1,317 para Weibull 2P, mientras que en la Figura 4b se observa un valor del parámetro de 1,178 para Weibull 3P. De igual manera se observa un valor del parámetro de 0,821

(Figura 4d) y 1,098 (Figura 4f) para el 2018 y 2019 respectivamente. En relación con Weibull 2P, los valores obtenidos fueron de 1,635 (Figura 4c) y 1,949 (Figura 4e) para los años 2018 y 2019 respectivamente.

El estadístico Anderson-Darling cuantifica la fidelidad de los datos a una distribución específica, postulando que, para un conjunto de datos y una distribución específica, una mayor adecuación de la distribución a los datos implica una reducción en este estadístico (Flores y Flores, 2021). La figura también evidencia que las puntuaciones de los datos correspondientes a esta distribución Weibull 3P se ajustaron de manera más precisa a la línea de tendencia central y se encuentran dentro de los intervalos de confianza, lo que evidencia su mayor precisión.

Con respecto a la aplicación de la distribución de Weibull para la obtención de sus parámetros de forma (β), vida característica (η) y vida asegurada (γ), además del valor de fiabilidad, en la Tabla 3, se destaca que los resultados de β fueron 1,64 para el año 2017, 0,98 en 2018 y 1,07 en 2019. El parámetro de forma β de la distribución de Weibull indica en qué parte de la vida del equipo se encuentran este en la curva de la bañera. Los mismos son: periodo de arranque ($\beta < 1$), periodo de funcionamiento normal ($\beta = 1$) periodo de desgaste ($\beta > 1$) (Gallegos-Londoño et al., 2022).

En función de lo descrito, se observa que el comportamiento para el año 2017 está en el periodo de desgaste, mientras que en los años 2018 y 2019 se acercan a 1, lo que indica que están en el periodo de operación normal. Dicho cambio se debió a que se aprovechó el TTR de 362,3 h para realizar mantenimiento menor a las unidades, así como ajuste de cabezales. Cabe señalar, que con base en los valores β obtenidos en 2018 y 2019, el número de fallas presentes en esos años puede deberse a malas reparaciones, mala aplicación o no aplicación de acciones de mantenimiento programado o mala operación de las unidades.

En cuanto a la confiabilidad, los resultados obtenidos para los años de estudio fueron del 43,75 %, 35,44 % y 37,81 % considerados bajos y alejados del Indicador Clave de Rendimiento (KPI) de confiabilidad para unidades motocompresoras, que debe ser igual o superior a 95 % (Gallegos-Londoño et al., 2020). También están por debajo del valor presentado para el parámetro establecido por Sánchez (2015), quien mostró una confiabilidad de 73,99 % para una unidad compresora. Este valor a pesar de estar por debajo del KPI reflejaba un MTBF de 1080 h, superior a los tres valores presentados en este estudio.

En lo que respecta a la mantenibilidad, se registró un valor atípico para el TBF, evidenciado por un máximo de 362,3 h, y un valor G que superaba el valor crítico de 4,02, lo que sugiere que este valor puede ser rechazado. Este valor se atribuye a dificultades administrativas derivadas de la búsqueda de repuestos, por lo que se optó por dedicar un tiempo teóricamente dentro de los principios de mantenibilidad.

En la Tabla 4, se observa el comportamiento estadístico descriptivo de los TTR asociados a la mantenibilidad. Además, se avista que las medias son de 2,87 días (68,8 h), 2,1 días (50,3 h) 1,93 días (46,2 h) para los años 2017, 2018 y 2019, respectivamente. A su vez se reflejan coeficientes de variación entre 166,92 y 177,55 (máximos) que expresan la dispersión de los datos, los cuales están contenidos en los tres años entre un valor mínimo de 3,6 h y un máximo de 362,3 h.

De acuerdo con Kumar et al. (2020), el valor del coeficiente de variación indica una elevada variabilidad y que el personal de mantenimiento dedica intervalos distintos a la reparación de los diversos subsistemas, lo que evidencia una mala mantenibilidad. Este comportamiento incidió en la simetría de la distribución, que experimentó un desplazamiento hacia la derecha, corroborando la baja mantenibilidad al exhibir valores como 362,3 h que inducen dicha inclinación.

Tabla 3. Parámetros Weibull 3P y fiabilidad a partir del MTBF en el periodo 2017-2019

Parámetros Weibull	2017	2018	2019
Parámetro de forma (β)	1,64	0,98	1,07
Vida característica (η)	57,53	92,86	120,95
Vida asegurada (γ)	54,57	62,25	43,55
Tiempo medio entre fallas (MTBF)	105,8	156,0	161,4
Confiabilidad (R)	43,75	36,44	37,81

Tabla 4. Estadísticas descriptivas de los Tiempos de reparación (TTR)

Estadísticas	2017	2018	2019
Media (MTTR)	68,8	50,3	46,2
Desviación Standard	114,9	89,3	78,5
Coeficiente de variación	166,92	177,55	169,92
Mín.	3,6	2,1	2,1
Mediana	14,1	9,3	10,2
Máx.	362,3	362,3	362,3
Asimetría	2,10	2,55	2,67
Kurtosis	3,65	6,50	7,62

Respecto a la disponibilidad, los KPI indican que es de clase mundial un equipo compresor compuesto por un motor de combustión interna y un compresor reciprocatante, cuando este se encuentra en operación normal y posee una disponibilidad igual o superior a 94 % (Faris, 2021).

Durante el período en estudio (2017-2019), no fue posible cumplir con esta premisa a excepción del compresor K1010 para el año 2018, tal como se observa en la Tabla 6. También se detalla que la disponibilidad global de las unidades motocompresoras fueron de 79,4 % (2017), 86,4 % (2018) y 84,8 % (2019), lejos del valor KPI para el parámetro. La disponibilidad obtenida está asociada a una mejor mantenibilidad (bajo TTR) y no a una mejor confiabilidad (altos TBF). Los valores de disponibilidad obtenidos distan de los presentados por Sánchez (2015) de 93,4 %, Montalvo et al. (2006) de 99,5 %, Corvaro et al. (2017) de 96 % y son similares a las de Faris (2021) de 86,2 %.

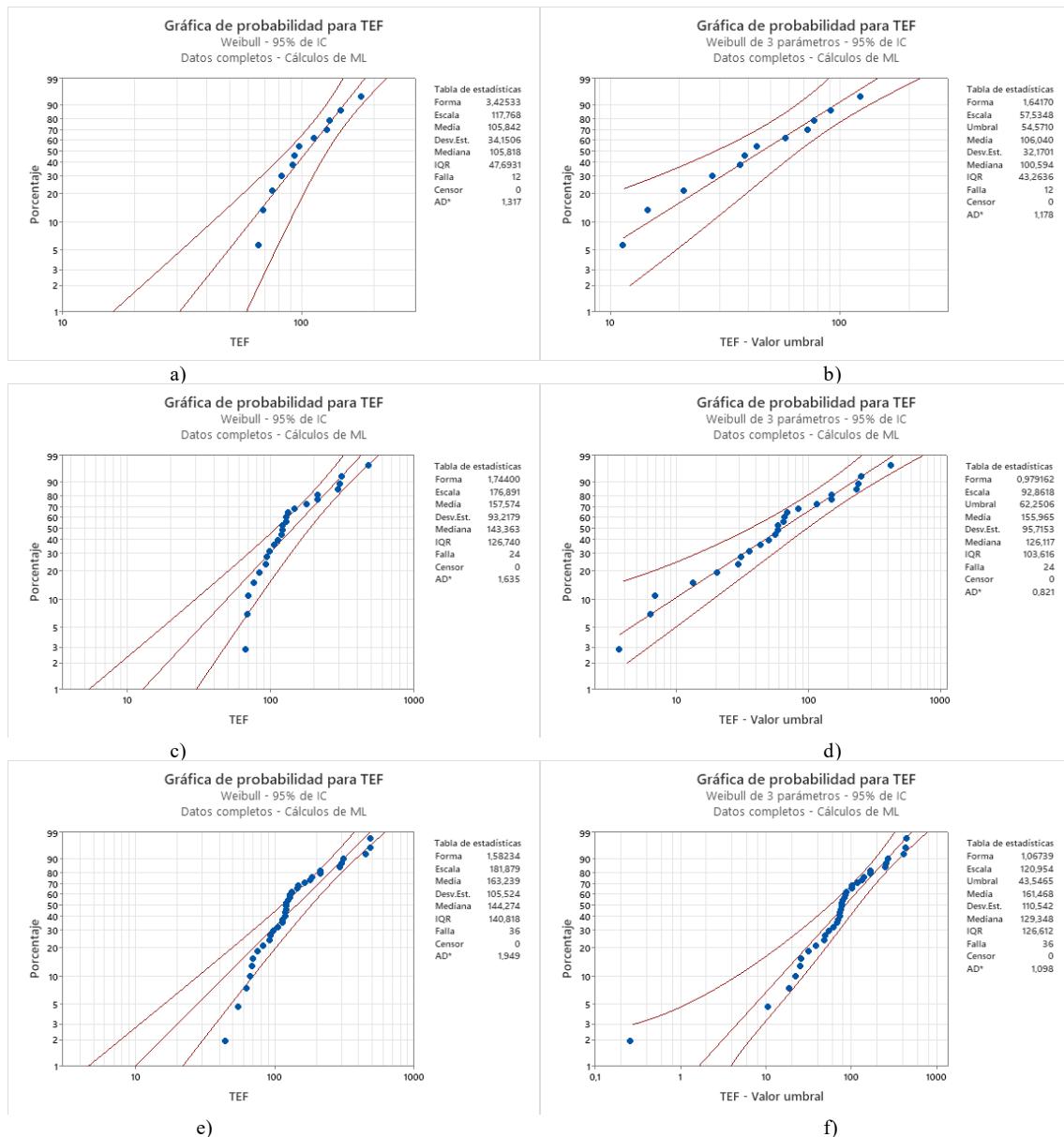


Figura 4. Estadístico de Anderson-Darling para los años 2017 (Figura 4.a Weibull 2P, Figura 4.b Weibull 3P), 2018 (Figura 4.c Weibull 2P, Figura 4.d Weibull 3P) y 2019 (Figura 4.e Weibull 2P, Figura 4.f Weibull 3P)

La evaluación de los parámetros de mantenimiento indica insuficiencias en las intervenciones de mantenimiento implementadas en la instalación, lo que evidencia la necesidad de implementar medidas de mantenimiento que optimicen los parámetros en estudio y, por ende, mejoren la operatividad de la planta.

Santos y Strefezza (2015) argumentan que las organizaciones que destinan recursos hacia el conocimiento, la confiabilidad operacional y el mantenimiento han logrado una mejora significativa en la productividad, la reducción de riesgos y el incremento de la calidad.

Tabla 5. Valor de la mantenibilidad en el periodo 2017-2019

Parámetro	2017	2018	2019
Parámetro de forma (β)	0,66	0,64	0,68
Vida característica (η)	48,03	33,81	33,49
MTTR	68,8	50,3	46,2
Mantenibilidad ($1 - R$)	71,85	72,46	71,42

Tabla 6. Resumen de los parámetros CDM en el periodo estudiado

Parámetros	2017	2018	2019
Confiabilidad del sistema	43,75	36,44	37,81
Mantenibilidad del sistema	71,85	72,46	86,40
Disponibilidad del sistema	79,40	86,40	84,80
Disponibilidad K1010	80,40	95,60	81,60
Disponibilidad K1020	87,90	68,90	87,20
Disponibilidad K1030	73,60	89,00	86,90
Disponibilidad K1040	75,60	92,30	83,60

Santos y Strefezza (2015) argumentan que las organizaciones que destinan recursos hacia el conocimiento, la confiabilidad operacional y el mantenimiento han logrado una mejora significativa en la productividad, la reducción de riesgos y el incremento de la calidad.

La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad (CDM) constituyen términos habituales en el vocabulario cotidiano

del mantenimiento. La evaluación de la definición contemporánea del mantenimiento revela que su propósito es asegurar que los equipos e instalaciones cumplan con su función para facilitar la atención de un proceso de servicio o producción de alta calidad, confiabilidad, protección, preservación ambiental y costos razonables (Grajales y Sánchez, 2006).

En este contexto, la metodología implementada constituye un instrumento aplicable a lo largo de la vida productiva de los equipos, independientemente de la etapa de la curva de la bañera en cuestión. Además, el procedimiento implementado promueve la toma de decisiones en torno a las estrategias de mantenimiento y las medidas correctivas y preventivas a implementar en respuesta a las fallas. Tsarouhas (2019), en relación con lo expuesto, sostiene que el análisis estadístico de los parámetros de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad asiste al personal de la planta en la predicción del comportamiento del sistema, lo que permite programar el mantenimiento futuro para asegurar la operatividad de los equipos.

En última instancia, los autores de la presente investigación reconocen la necesidad de un enfoque estructurado para supervisar y evaluar la eficacia de los parámetros CDM a lo largo del ciclo de vida de la planta, y establecer metas cuantitativas durante la fase de conceptualización.

Asimismo, en función de la información que se recabó sobre confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de la planta es de mucho valor para la organización, que esta establezca un sistema de mantenimiento predictivo y preventivo para disminuir el número de fallas de los compresores.

4. CONCLUSIONES

Los grupos moto-compresores constituyen el sistema crítico de la planta, acumulando durante el período de estudio 17166,5 horas de servicio (2,11 años), lo que representa el 84,3 % de las fallas y equivale al 92,3 % del total de horas fuera de servicio.

La investigación estadística descriptiva del tiempo entre fallos (TBF) evidenció una carencia en las medidas de mantenimiento preventivo implementadas en la instalación. Por lo tanto, las confiabilidades adquiridas durante este período se consideran inaceptables, siendo inferiores al Indicador Clave de Rendimiento (KPI) para unidades de motores compresores.

La investigación estadística descriptiva sobre los tiempos fuera de servicio (TTR) reveló prácticas inadecuadas en la reparación de los equipos bajo estudio, vinculadas a la calidad de los componentes de repuesto, la mano de obra insuficiente y la ausencia de políticas para la adquisición de componentes de repuesto. No obstante, se considera que los valores de mantenibilidad adquiridos son aceptables en comparación con la confiabilidad.

En última instancia, la disponibilidad adquirida se sitúa por debajo del valor del indicador de clase mundial, y este valor se

atribuye a una mantenibilidad superior en comparación con la confiabilidad.

REFERENCIAS

- Chavez, M., Jimenez, J., & Cucurí, M. (2020). Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) del sistema de reinyección de agua de formación. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria KOINONIA*, 5(9), 249-267. <https://doi.org/10.35381/r.k.v5i9.647>
- Corvaro, F., Giacchetta, G., Marchetti, B., & Recanati, M. (2017). Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618. *Petroleum*, 3(2), 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.09.002>
- Cuaical-Angulo, B. A., Buenaño-Moyano, L. F., & Moreno-Pinduisaca, L. (2019). Análisis de indicadores de gestión CMD en el desarrollo de software de mantenimiento para vehículos livianos. *Revista Científica FIPCAEC*, 4(4), 145-170. <https://doi.org/10.23857/fipcaec.v4i4.128>
- De Nicolo, Y. (2015). Gestión de la calidad en las empresas de mantenimiento del sector petrolero ubicadas en el municipio Lagunillas del estado Zulia. *Revista de Formación Gerencial*, 14(1), 39-63. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7195295>
- Faris, M. (2021). *Developing a Total Productive Maintenance Framework with RAM (Reliability, Availability and Maintainability) Techniques in Gas Compression Plants*. Jartum: Doctoral dissertation Sudan University of Science and Technology.
- Flores, C., & Flores, K. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov. *Societas*, 23(2), 83-106. Obtenido de <https://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/341/3412237018.pdf>
- Gallegos Londoño, C. M., García Mora, F. A., & Caicedo Benavides, F. U. (2022). Aplicaciones de la distribución de Weibull en el estudio de la fiabilidad. *ConcienciaDigital*, 5(3), 48-67. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i3.2203>
- Gallegos Londoño, C., Viscaíno Cuzco, M., & Villacrés Parra, S. (2020). Estudio de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad aplicado a grupos electrógenos prime. *ConcienciaDigital*, 3(3), 44-61. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i3.1266>
- Garg, H. (2014). Reliability, availability and maintainability analysis of industrial systems using PSO and fuzzy methodology. *Mapan*, 29, 115-129. <https://doi.org/10.1007/s12647-013-0081-x>
- Gómez, G., & González, C. (2015). La función mantenimiento en PYMES venezolanas y la gestión de calidad según las normas internacionales ISO 9000. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 9(33), 26-30. Obtenido de https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212005000100007&lng=es&nrm=iso&tlang=es

- Grajales, D. H., & Sánchez, Y. O. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et technica*, 1(30), 155-160. Obtenido de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6513>
- Hawkins, D. (1980). *Identification of outliers*. Champman & Hall: London.
- Jakkula, B., Mandela, G. R., & Chivukula, S. M. (2022). Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of Load Haul Dumpers (LHDs): a case study. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(1), 504-515. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01154-3>
- Koohsari, A., Kalatehjari, R., Moosazadeh, S., Hajihassani, M., & Van, B. (2022). A Critical Investigation on the Reliability, Availability, and Maintainability of EPB Machines: A Case Study. *Applied Sciences*, 12(21), 11245. <https://doi.org/10.3390/app122111245>
- Kumar, A., Singh, R., Saini, M., & Dahiya, O. (2020). Reliability, Availability and Maintainability Analysis to Improve the Operational Performance of Soft Water Treatment and Supply Plant. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 13(5). <https://doi.org/10.25103/jestr.135.24>
- Montalvo, A., Aldana, R., López, A., Álvarez, E., Aldana, F., & Rivera, Y. (2006). Mantenimiento Centrado en confiabilidad en moto-compresores. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 1, 1-7. <https://doi.org/10.24054/19009178.v1.n1.2018.3212>
- Rajaprasad, S. (2018). Investigation of reliability, maintainability and availability of a paper machine in an integrated pulp and paper mill. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 10(3), 43-56.
- Rajaprasad, S. V. (2018). Investigation of reliability, maintainability and availability of a paper machine in an integrated pulp and paper mill. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 10(3), 43-56. <https://doi.org/10.4314/ijest.v10i3.5>
- Ramos, P. G. (2012). *Organização e Gestão da Manutenção Industrial: Aplicação Teórico-Prática às Fabricas Lusitana-Produtos Alimentares, SA*. Portugal: Doctoral dissertation, Universidade da Beira Interior. Obtenido de <https://www.proquest.com/openview/48fd1caad02598b1b43f9696adf7c75d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Ronceros, C. (2022). Modelado de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de la plataforma de telecomunicaciones y transmisión de datos. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 34(2), 85-104. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n2.914>
- Ronceros, C., & Pomblas, R. (2023). Modelo de Confiability, Disponibilidad y Mantenibilidad Operacional para una Planta Compresora de Gas. *Revista Politécnica*, 51(1), 117-129. <https://doi.org/10.33333/rp.vol51n1.10>
- Sánchez, D. (2015). *Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema de compresión de gas, en la Central de Facilidades de Producción del Bloque 15, PetroAmazonas, Cantón Shushufindi, Provincia de Sucumbíos*. Chimborazo: (Tesis de Maestría) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Santos, J., & Strefezza, M. (2015). Una visión en la evolución de las nociones de confiabilidad y mantenimiento en la civilización occidental desde la antigüedad hasta finales de los años cuarenta del siglo XX. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 19(76), 138-153. Obtenido de <https://ve.scielo.org/pdf/uct/v19n76/art04.pdf>
- Soltanali, H., Garmabaki, A. H., Thaduri, A., Parida, A., Kumar, U., & Rohani, A. (2019). Sustainable production process: An application of reliability, availability, and maintainability methodologies in automotive manufacturing. *Journal of Risk and Reliability*, 233(4), 682-697. <https://doi.org/10.1177/1748006X18818266>
- Trujillo, J., & Brito, A. (2009). Jusepin Main Station Separation Facilities Upgrade by Means of Integrated Multiphase Solutions. *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference* (págs. SPE-120900). Society Petroleum Engineering. <https://doi.org/10.2118/120900-MS>
- Tsarouhas, P. (2011). A comparative study of performance evaluation based on field failure data for food production lines. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 26-39. <https://doi.org/10.1108/1355251111116231>
- Tsarouhas, P. (2019). Statistical analysis of failure data for estimating reliability, availability and maintainability of an automated croissant production line. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(3), 452-475. <https://doi.org/10.1108/JQME-04-2018-0029>
- Tsarouhas, P. (2020). Reliability, availability, and maintainability (RAM) study of an ice cream industry. *Applied Sciences*, 10(12), 4265. <https://doi.org/10.3390/app10124265>
- Velásquez, A. (2022). *Confiability operacional en plantas compresoras*. Maturín: Tesis de Maestría. Universidad de Oriente.

BIOGRAFÍAS



Rubén, Vega Mejía, Ingeniero mecánico. Profesor titular de la Universidad de Oriente (UDO), Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería de Ciencias Aplicadas (EICA). Departamento de Ingeniería de Petróleo. Doctorando del programa en Ciencias de la Ingeniería, mención: Productividad de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO)-Barquisimeto. Coordinador de la Maestría de Ingeniería de Gas de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. Docente – Investigador autor y coautor de varias publicaciones en el área de Ingeniería de Petróleo y Gas.



Carlos, De La Cruz, Ingeniero de petróleo Profesor titular de la Universidad de Oriente (UDO), Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería de Ciencias Aplicadas (EICA), Departamento de Ingeniería de Petróleo. Profesor de la Maestría de Ingeniería de Gas de la UDO- Monagas. MSc. Agricultura Tropical Mención Edafología. Investigador Nacional. Doctorando del programa Innovaciones Educativas de la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (UNEFA).



Asdrúbal, Velásquez, Ingeniero de Petróleo y Magíster en Ingeniería de Gas egresado de la Universidad de Oriente (UDO) en 2010 y 2023 respectivamente. Profesor de la Maestría de Ingeniería de Gas de la UDO- Monagas. Experiencia de 12 años como Ingeniero/Supervisor de Confiability en la Superintendencia de Ingeniería de Mantenimiento de la Gerencia General de Compresión Gas Oriente de PDVSA Gas. Participante y guía de equipos multidisciplinarios en la aplicación de metodologías de confiabilidad operacional, como análisis de criticidad, análisis causa raíz, optimización costo riesgo, identificación de oportunidades de mejora basado en análisis de riesgo, análisis RAM, Mantenimiento Centrado en Confiability, entre otras.



Cristhian, Ronceros, Doctor en Gerencia por la Universidad Yacambú (2012), Magíster en Gerencia General por la UDO (2005). Ingeniero de Sistemas por la UDO (2001). Estudios avanzados en Gestión de Proyectos TIC y Certificaciones en Coaching organizacional y PNL. Experiencia de 19 años PDVSA, desempeñando cargos supervisores y gerenciales en el área TI. Experiencia de 2 años como docente universitario. Docente de la Universidad Privada San Juan Bautista (Perú). Profesor de la Maestría de Ingeniería de Gas de la UDO- Monagas. Docente investigador de la UDO (Venezuela). Autor de libro de metodología de la investigación, autor y coautor de varias publicaciones en las áreas de automatización, confiabilidad operacional, proyectos y gerencia.