

Análisis de la eficiencia técnica del mantenimiento de una planta compresora de gas natural mediante Análisis Envolvente de Datos (DEA)

Analysis of the technical efficiency of the maintenance of a natural gas compressor plant using Data Envelopment Analysis (DEA)

Rubén Darío Vega Mejía ^a, Cristhian Ronceros Morales ^b

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. Venezuela ^a

Universidad Privada San Juan Bautista. Perú ^b

Correo: rvegas@udo.edu.ve

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17204010>

Recibido: 08-04-2024 Aceptado: 15-10-2024

Resumen

El propósito fue evaluar la eficiencia técnica del mantenimiento realizado en una planta compresora de gas natural propiedad de PDVSA Gas, ubicada en el estado Monagas, Venezuela, durante los años 2011 a 2022. Se empleó el método de DEA a partir de modificaciones técnicas al indicador OEE y se determinó el impacto de las acciones de mantenimiento implementadas. Inicialmente, se asignaron los años como DM, obteniéndose durante el lapso 2011-2016 eficiencias aceptables ($> 80\%$), mientras que durante el lapso 2017 – 2022 las eficiencias disminuyeron con el tiempo, lo cual fue considerado como el lapso crítico. Una segunda fase para estos años, se consideraron las cuatro unidades moto-compresoras como DMU, así durante 2017-2019 la mejor eficiencia ($> 80\%$) la presentó la unidad denominada K1040, las demás unidades presentaron un comportamiento no acorde con lo esperado. En el lapso 2020-2022 se evidenció la disminución de la eficiencia por debajo de 80 % en el 66,7 % de las unidades. Se concluye que la aplicación del método DEA a partir de la modificación del indicador OEE para medir la eficiencia técnica de las acciones de mantenimiento puede considerarse como una herramienta que presenta resultados acordes con la realidad en estudio.

Palabras clave: eficiencia técnica, DEA, mantenimiento, productividad, planta compresora de gas natural.

Código UNESCO: 3321.07 – Ciencias Tecnológicas – Tecnología del Carbón y del Petróleo – Gas natural

Abstract

The purpose was to evaluate the technical efficiency of the maintenance performed in a natural gas compressor plant owned by PDVSA Gas, located in the state of Monagas, Venezuela, during the years 2011 to 2022. The DEA method was used based on technical modifications to the OEE indicator and the impact of the maintenance actions implemented was determined. Initially, the years were assigned as DM, obtaining during the period 2011-2016 acceptable efficiencies ($> 80\%$), while during the period 2017 - 2022 the efficiencies decreased over time, which was considered as the critical period. A second phase for these years, the four motor-compressor units were considered as DMU, so during 2017-2019 the best efficiency ($> 80\%$) was presented by the unit called K1040, the other units presented a behavior not in accordance with the expected. In the period 2020-2022 there was evidence of a decrease in efficiency below 80 % in 66.7 % of the units. It is concluded that the application of the DEA method based on the modification of the OEE indicator to measure the technical efficiency of maintenance actions can be considered as a tool that presents results in accordance with the reality under study.

Keywords: technical efficiency, DEA, maintenance, productivity, natural gas compressor plant.

UNESCO Code: 3321.07 – Technological Sciences – Coal and Petroleum Technology – Natural gas

PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA, revista científica de publicación continua, dos números al año, editada en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela, bajo la Licencia CC BY-NC-SA. ISSN:1856-8890, EISSN:2477-9660. Depósitos legales: pp200702LA2730, ppi201402LA4590.

*Autor de Correspondencia

Rubén Darío Vega Mejía. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6331-3851>. Correo: rvegas@udo.edu.ve. MSc. Gerencia Empresarial, Ingeniero Mecánico. Doctorando del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería mención Productividad, Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO). Docente - Investigador, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (EICA), Universidad de Oriente, Venezuela.

Cristhian Ronceros Morales. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8421-5217>. Correo: cristhian.ronceros@upsjb.edu.pe. Doctor en Gerencia, Ingeniero de Sistemas. Docente - Investigador, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Computación y Sistemas, Universidad Privada San Juan Bautista, Perú.

1. Introducción

Para implementar estrategias y elevar la productividad como consecuencia de la presión competitiva global [1] el mantenimiento es crucial en la industria porque influye significativamente en los costos y la confiabilidad. También interviene en la capacidad de una empresa para ser competitiva en términos de bajo precio, alta calidad y rendimiento [2]. En tal sentido, los programas de producción de mayor envergadura con productos cada vez más complejos están aumentando la importancia de las tareas de mantenimiento [3]. Hoy en día, el mantenimiento está ampliamente reconocido como una función empresarial esencial y un elemento crítico de la gestión de activos. Las organizaciones se dan de cuenta que pueden mejorar su eficiencia y fiabilidad planificando las intervenciones de mantenimiento de forma más eficaz [4]. Es por ello que, en esta época, ha aumentado la importancia de la productividad de los equipos y plantas operativas, que dependen además del mantenimiento de la capacidad de la planta [5].

No hay un acuerdo referente a una definición precisa sobre productividad, su medición, ni que se ajuste a todas las situaciones estudiadas [6], [7]; entre las definiciones clásicas de productividad es posible mencionar la de Kaplan y Cooper [8] quienes la expresaron como la relación entre lo que se produce y lo que se necesita para producirlo. Sumanth [9] señala que la productividad mide la relación entre el producto, como los bienes y servicios producidos, y los insumos, que incluyen mano de obra, capital, material y otros recursos. Hill [10] expresó que era la razón de producción tangible entre insumos tangible. Y Prokopenko [11] la definió como la relación numérica resultante entre la producción alcanzada por un sistema de producción o de servicios y los recursos utilizados para obtenerla. No obstante, de acuerdo a Mora [12] “la productividad en el mantenimiento está más asociada a indicar el número de servicios prestados por unidad de tiempo” (p.287). En función de lo descrito, para el presente documento se entenderá como productividad la definición propuesta por los autores, la cual es: uso correcto de los recursos disponibles (humanos, materiales y de tiempo) para ser más eficientes y eficaces en la prestación de un servicio que garantice así el funcionamiento correcto de los activos sujetos a acciones de mantenimiento.

En función de lo antes descrito, uno de los métodos que se ha empleado en mantenimiento para medir la productividad es a través del indicador clave de rendimiento (KPI), Overall Equipment Effectiveness (OEE) (Eficacia global de los equipos), el cual se puede definir como uno de los indicadores de medición de la implementación del Mantenimiento Productivo Total (TPM) que puede mostrar la eficacia con la que puede funcionar la máquina [13]. El cálculo del OEE fue propuesto originalmente por Nakajima (1988) como uno de los principales indicadores del TPM y su medición tiene como objetivo detectar las pérdidas de producción y maximizar la eficacia de los equipos, el mismo se obtiene multiplicando la disponibilidad del equipo, la tasa de rendimiento y la tasa de calidad [14],[15].

Sin embargo, actualmente OEE es empleado principalmente como un indicador de Lean Manufacturing para identificar pérdidas de producción e identificar la eficiencia operativa, convirtiéndose así en una herramienta fundamental para aumentar la eficiencia y disminuir los desperdicios de producción [15],[16]. Asimismo, OEE no es un indicador bien definido e inequívoco, porque se adoptan cambios en los métodos de medición y de cálculo, según surjan de las consideraciones que se apliquen en diversas industrias o para diferentes propósitos [15].

Diversos métodos se utilizan medir la eficiencia y uno de los más empleados es el Análisis Envolvente de Datos (DEA). DEA es una técnica determinística no paramétrica que emplea la

programación matemática la cual fue propuesta por Charnes, Cooper y Rhodes en 1978 [17]. De acuerdo a Charles et al. [18] representa una excelente herramienta de la ciencia de la gestión que mide el rendimiento relativo de un conjunto de entidades o unidades de toma de decisiones (DMU) con múltiples medidas de rendimiento que se clasifican como entradas y salidas. Este método de evaluación de la eficiencia se ha aplicado ampliamente, demostrando ser un método confiable y persuasivo [19].

En los últimos años, se ha utilizado DEA en una variedad de campos tanto de economía como de ingeniería para evaluar la eficiencia técnica, por lo que, su campo de uso se ha ampliado significativamente; entre algunas investigaciones de su aplicación se mencionan los siguientes:: Evaluación de la eficiencia del crecimiento de la industria de cereales en América aplicando análisis envolvente de datos [20], Marco integrado para la identificación de diseños de fabricación sostenibles basados en Big Data, aprendizaje automático, metaheurística y análisis envolvente de datos [21], Desarrollo de un novedoso análisis envolvente de datos (DEA) integrado y generalizado para evaluar los hospitales que prestan servicios de atención al accidente cerebro vascular [22], Aplicación del Análisis Envolvente de Datos (DEA) a las tecnologías de la información y la comunicación [23], Un modelo de transporte multi-objetivo difuso totalmente fermateano que utiliza una técnica DEA ampliada [24].

En concordancia con lo descrito, el presente trabajo tuvo como propósito analizar la eficiencia técnica del mantenimiento de una planta compresora de gas natural mediante la aplicación del método de DEA, a partir de modificaciones técnicas al indicador OEE para conocer así, el efecto de las acciones del mantenimiento aplicado en una planta compresora de gas natural perteneciente a PDVSA Gas, ubicada en el estado Monagas – Venezuela durante los años 2011 al 2022.

2. Desarrollo

2.1. Metodología

Las variables de entrada y de salida estuvieron basadas en el indicador clave de rendimiento (KPI) OEE, el cual es una técnica que busca maximizar la producción manteniendo las condiciones ideales de funcionamiento y el equipo / maquinaria funcionando eficazmente [25]. Pero, se introdujeron modificaciones al método; por lo que, para las variables de entrada se consideró:

- **Disponibilidad:** se refiere a la tasa de tiempo de operación respecto al tiempo de carga, entendiéndose por tiempo de carga como la resta del tiempo de inactividad planificado del tiempo total disponible [15]. Sin embargo, para la presente investigación la disponibilidad será obtenida a través de la ecuación 1, que relaciona los tiempos medios entre falla (MTBF) y los tiempos medios de reparación (MTTR) [12].

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF}/(\text{MTBF}-\text{MTTR}) \times 100 \quad (1)$$

- **Índice de velocidad de funcionamiento** se refiere a las pérdidas de velocidad de producción. Indica las diferencias entre la velocidad real y la ideal o el tiempo de ciclo [15], en este caso se determinará el rendimiento, el cual será calculado a través de la ecuación 2:

$$\text{Rendimiento} = \text{Producción real}/\text{Producción neta} \times 100 \quad (2)$$

- **Tasa de calidad:** refleja los defectos, ya que el tiempo dedicado a producir desechos es tiempo perdido. Esta dada por la relación de la cantidad procesada menos la cantidad no procesada por

defectos entre la cantidad procesada [15]. En el caso de estudio este criterio no aplica porque para el proceso se considera un gas de calidad aquel cuyo contenido de agua sea menor o igual a 7 lb / MMPCND y eso se garantiza en el proceso de deshidratación al cual es sometido el gas natural previo al proceso de compresión. Por lo tanto, la tasa de calidad fue sustituida por la tasa de utilización (ecuación 3), siendo este un indicador clave de la ingeniería de confiabilidad [26]:

$$\text{Utilización} = \text{Horas operativas reales} / \text{Horas disponibles de operación} \quad (3)$$

Debido a los cambios planteados, en vez de emplear el término OEE como variable de salida, se asumió el nombre de índice de eficiencia técnica (IET) y éste se calculó como se observa en la ecuación 4:

$$\text{IET} = \text{Disponibilidad} \times \text{Rendimiento} \times \text{Utilización} \quad (4)$$

Se aplicó el método de Análisis Envolvente de Datos (DEA) para conocer y analizar el valor de eficiencia técnica, el mismo es empleado para estudiar la eficiencia técnica y productiva en actividades industriales muy diversas, entre las que destacan los sectores bancario, agropecuario, energético, pesquero y de infraestructura, resaltando su aplicación en proyectos de investigación y desarrollo [27]. Además, no requiere la especificación de una función de producción [28].

Por lo anteriormente descrito, se consideraron tres (3) variables de entrada y una (1) variable de salida (Figura 1).

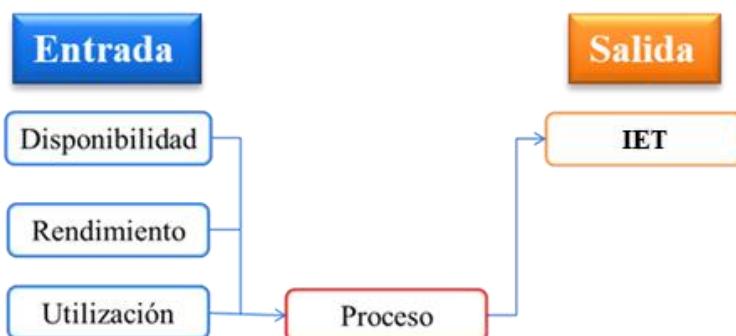


Figura 1. Variables de entrada y salida

Como número de unidades (DMU) se asumieron inicialmente los años de producción de la planta compresora desde el 2011 hasta 2022 (12 años), lo cual satisface las ecuaciones para establecer el número de DMU mínimas de:

$$\text{Golany y Roll (1969)} \geq 2 (\text{VE} + \text{VS}) \rightarrow \text{DMU} = 8 \quad (6)$$

$$\text{Charnes, Cooper y Rhodes (1994)} \geq 3 (\text{VE} + \text{VS}) \rightarrow \text{DMU} = 12 \quad (7)$$

$$\text{Murias y Fernández (2004)} = \text{VE} \times \text{VS} \rightarrow \text{DMU} = 3 \quad (8)$$

La data para el estudio fue suministrada por la gerencia Compresión Gas, perteneciente a Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA), la misma registraba los tiempos medios entre falla (MTBF) y los tiempos medios de reparación (MTTR) de las unidades motocompresoras K1010, K1020, K1030 y K1040 durante el lapso 2011 – 2022.

2.1.1. Análisis de los datos iniciales que permiten obtener las variables de entrada y cálculo de IET

Para el cálculo de las variables de entrada se emplearon los promedios de producción diaria (millones de pies cúbicos naturales diarios, MMPCND), el tiempo de trabajo mensual (h/m) de la planta compresora de gas natural y los MTBF (h), MTTR (h) de las unidades moto-compresoras durante el lapso de 2011 al 2022, dichos datos pertenecen a la base de datos de la Gerencia de Mantenimiento de PDVSA Gas. Posteriormente, se determinó la disponibilidad (ecuación 1), rendimiento (ecuación 2), utilización (ecuación 3) y finalmente se calculó la variable de salida IET mediante la ecuación 4. La información de los cálculos será presentada mediante el uso de gráficas de dispersión según la metodología de Kafi et al. [29].

2.1.2. Desarrollo del Análisis DEA mediante el uso del software Frontier Analyst®

Basado en las metodologías aplicadas por Osorio-Oviedo [20], Favila Tello [30] y Golsefid et al. [31] se estudiaron los siguientes aspectos:

- Correlación entre las variables de entrada y entre las variables de entra y salida.
- Medición de la eficiencia aplicando DEA
- Mejoras potenciales totales por variable de entrada.
- Referencia unitaria de las DMU.
- Contribución Input/Output de las variables por DMU.
- Mejora potencial de las variables de entrada por DMU.

2.1.3. Estudio de las unidades moto-compresoras en los años no productivos

Para esta fase se tomaron como DMU las cuatro unidades moto-compresoras denominadas K1010, K1020, K1030 y K1040 y que serán identificadas con las letras A, B, C Y D respectivamente en los años que no fueron productivas, identificados por números crecientes (1.2.3...4). A las mismas se le estudiaron, según la metodología anterior:

- Correlación entre las variables de entrada y entre las variables de entrada y salida.
- Índice de Eficiencia DEA.
- Establecimiento de causas de la eficiencia encontrada asociadas a las variables de entrada.

2.2. Resultados y discusión

La planta compresora está ubicada al norte del estado Monagas, al oeste de la ciudad de Maturín y tiene una capacidad para comprimir 120 millones de pies cúbicos de gas natural diarios (MMPCND), principalmente metano y ciertas cantidades de etano, propano y butano; asimismo, en procesos anteriores ya se le ha extraído el agua (Deshidratación) y los componentes ácidos como el dióxido de carbono (CO_2) y el ácido sulfídrico (H_2S) a través del proceso de endulzamiento. La referida planta consta principalmente de cuatro (4) unidades moto-compresoras idénticas denominadas: K-1010, K-1020, K-1030 y K-1040 cada uno con capacidad de compresión de 30 MMPCND. El gas natural empleado en la planta proviene de los pozos adyacentes a ella y son operados por PDVSA Exploración y Producción Oriente.

Concerniente a la producción de la planta, se observa que la misma durante el lapso 2011 al 2022 mostrado en la Figura 2, no logró alcanzar su máxima capacidad instalada; en tal sentido, el mayor valor se obtuvo en el año 2012, siendo este de 102 MMPCND (85 % de rendimiento) y el menor valor fue de 67 MMPCND (2022) (54,2 % de rendimiento). Operacionalmente se puede atribuir a la capacidad limitada de gas del tren de separación de media presión existente, así como a la presencia de un patrón de flujo ascendente intermitente y una distribución de flujo no uniforme debido a la configuración asimétrica del colector, entrada común para los módulos II y III [32]. Otra posible causa está asociada a las actividades de mantenimiento llevadas a cabo, lo que le ha impedido a la planta no conseguir su más alto nivel de confiabilidad operacional, ello como consecuencia de la presencia de fallas recurrentes en las unidades moto-compresoras.

En la misma figura, también se detalla que la producción ha venido presentando una reducción a lo largo del tiempo, intensificándose a partir del 2016 hasta la actualidad. Referente a las horas trabajadas se evidenció un comportamiento similar, nunca se han laborado las 720 h/mes, siendo los valores máximo y mínimo de 694,1 h/mes y 488 h/mes para los años 2013 y 2022 respectivamente.

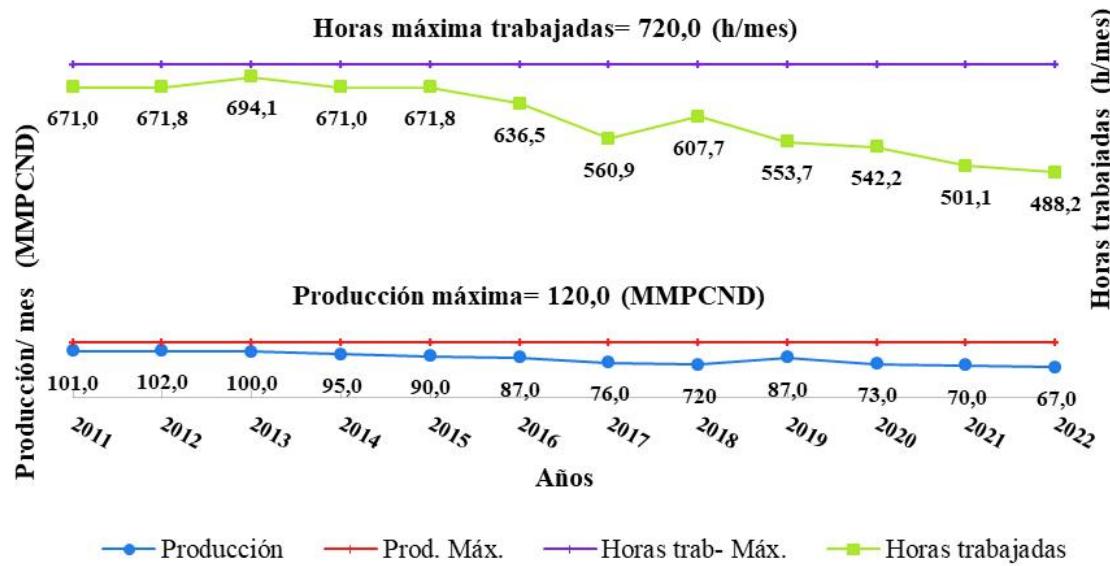


Figura 2. Porcentaje de producción y Porcentaje de horas máximas trabajadas durante el lapso 2011-2022

En la Figura 3 se presentan los tiempos promedios entre fallas (MTBF) y los tiempos promedios para reparar (MTTR), con respecto a los MTBF estos presentaron un comportamiento inestable con oscilaciones entre 250,5 h (2015) y 96 h (2021); es decir, que el máximo tiempo trabajado sin presentar fallas fue sólo de 10,43 días y el mínimo de 4 días. Los MTTR enseñados expresan que durante el lapso de 2011 al 2016 fueron menores y fluctuaron entre 3,4 h y 12,5 h para los años 2013 y 2011 respectivamente. No obstante, a partir del año 2016 hasta el 2022 aumentaron, evidenciándose valores entre 68,0 h (2017) y 51,8 h (2018). Cabe destacar, que desde el punto de vista de mantenimiento se debe tender a las cero fallas y de presentarse estas deben ser solucionadas en el tiempo mínimo posible.

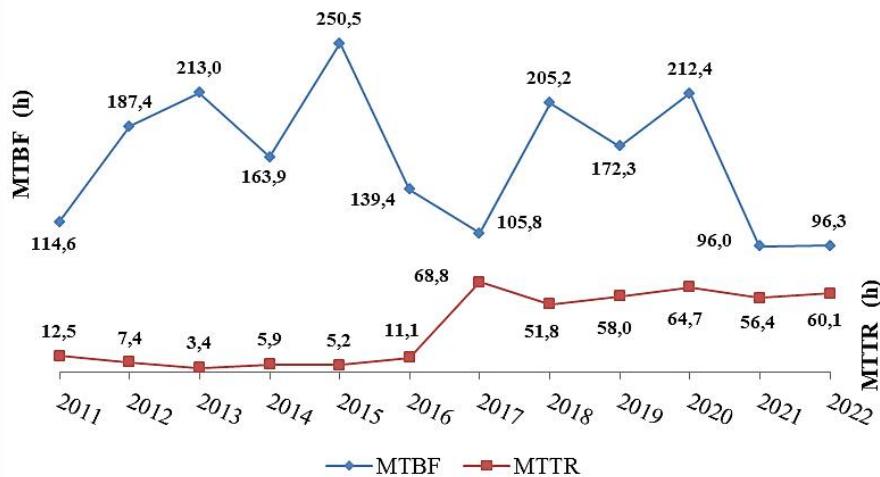


Figura 3. Tiempo medio entre falla (MTBF) y Tiempo medio de reparación (MTTR) por año

Referente al efecto de las fallas sobre la producción de la planta, esto puede ser comprobado al analizar los valores conseguidos de MTBF (entre 96 h y 250,5 h) y MTTR (3,4 h y 68,0 h). Se observan bajos MTBF y altos MTTR las cuales son condiciones indeseables. Igualmente, los mismos distan de los obtenidos por Corvaro et al. [33] quienes presentaron MTBF de 597,5 h y MTTR de 29,6 h para unidades moto-compresoras reciprocanes API 618. Asimismo, los valore de MBTF están por debajo del valor presentado en la base de datos OREDA [34] de 7181,36 h (299,2 días) para empresas compresoras de gas natural clase mundial

Al calcular los valores de las variables de entrada (disponibilidad, rendimiento y utilización) se refleja en Tabla 1 con respecto a la disponibilidad que si bien en los primeros seis años (2011 – 2016) es mayor a 90 %, ajustándose así a los patrones de clase mundial, los cuales según Faris [35] indica que un buen indicador de disponibilidad es aquel que está por encima del 90 %; posteriormente, disminuye de manera significativa, lo cual se asocia a un aumento del número de fallas, combinado con malas reparaciones que aumentan los TTR. Cabe destacar, que Corvaro et al. [33] reportaron valores de disponibilidad de 99,5 %, también mostraron un rendimiento promedio de 97,8 %, y aunque la utilización no fue enunciada esta no puede ser mayor que la disponibilidad. Si se toman estos tres valores como referencia, la planta de los autores mencionados al aplicar la formula tendría hipotéticamente un IET de 91,3 %, el cual sería superior en 12, 2 % al máximo valor reflejado en este estudio.

La variable de salida (IET) alcanzó un valor mayor de 79,1 % en el año 2013 y mínimo de 23,3 % en el año 2023. Si los valores encontrados se compararan con las condiciones de aceptación y rechazo de OEE, el rango de las DMU entre 2016 y 2022 se considerarían como inadmisible (menor a 65%), las DMU 2011, 2012 y 2015 como regular ($0,65 \leq \text{OEE} < 0,75$) y las DMU 2013 y 2014 como aceptables ($0,75 \leq \text{OEE} < 0,85$), por lo que ninguna de las DMU obtendría una clasificación de buena ($0,85 \leq \text{OEE} < 0,95$) o excelente ($\geq 0,95$). Si bien, para Faris et al. [36] se han realizado pocos estudios para OEE en plantas compresora, ellos reportan un valor de este indicador de 55 % para compresores reciprocanes de aire. Igualmente, Faris [35] es un estudio posterior muestra un OEE de 60, 44 % para compresores reciprocanes de gas natural. Por lo que, es posible señalar que los obtenidos no distas de estos y podrían considerarse desde el punto de vista de TPM con normales.

Tabla 1. Variables de entrada (Disponibilidad, Rendimiento y Utilización) y variable de salida (IET) de las DMU en estudio

DMU	Variables de entrada			Variable de salida
	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Utilización (%)	
PC-2011	90,2	84,2	89,2	70,7
PC-2012	96,2	85,0	93,3	76,3
PC-2013	98,4	83,3	96,4	79,1
PC-2014	96,5	79,2	93,2	71,2
PC-2015	98,0	75,0	93,3	68,6
PC-2016	92,6	72,5	88,4	59,4
PC-2017	60,6	63,3	77,9	29,9
PC-2018	79,8	60,0	84,4	40,4
PC-2019	74,8	72,5	76,9	41,7
PC-2020	76,7	60,8	75,3	35,1
PC-2021	63,0	58,3	69,6	25,6
PC-2022	61,6	55,8	67,8	23,3

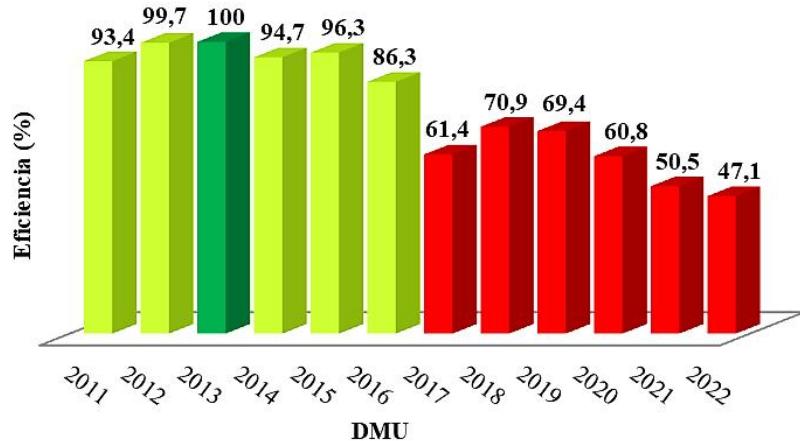
Introducidos los datos en el software Frontier Analyst® se procedió a declarar el IET como variable de salida, las demás variables permanecieron como entradas. Una primera información que se obtuvo al realizar el análisis es la correlación entre las variables de entrada- entradas y entrada-salida; el análisis de correlación se emplea para determinar la relación de dependencia que existen entre cada uno de los resultados obtenidos [37]. Se detalla en la Tabla 2 que las correlaciones de las variables disponibilidad-rendimiento y utilización-rendimiento son positivas altas, mientras que las demás correlaciones en estudio se consideran como positivas fuertes.

Tabla 2. Correlación de las variables de entrada y salida.

	Disponibilidad	Rendimiento	Utilización	IET
Disponibilidad	1,0	0,84	0,94	0,96
Rendimiento		1,0	0,88	0,94
Utilización			1,0	0,96
IET				1,0

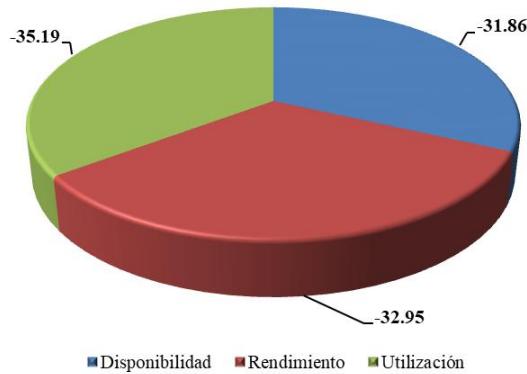
Sin embargo, de acuerdo a Stefanović-Marinović et al. [38] todos los valores de correlación superiores a 0,8 indican una correlación extremadamente alta. Dado que las correlaciones encontradas están entre 0,84 y 0,96 es posible manifestar que existe una fuerte correlación entre las variables de entrada y entre las variables de entrada con la variable de salida. Por lo que, de acuerdo a Starčević et al. [39] estos resultados confirman que el modelo es aceptable y no hay factores externos que lo afecten.

Osorio-Oviedo [20] en su estudio al emplear el método DEA estableció tres escalas que categorizan a la eficiencia; así la eficiencia es baja en un rango de 0 a 80 %, media desde 81 a 90 % y alta hasta alcanzar el 100 %. En función de los resultados obtenidos, las eficiencias de las DMU (Figura 4) indican que sólo en el 2013 alcanzó 100 por ciento (color verde), mientras que los años 2011, 2012, 2014, 2015 y 2016 tuvieron eficiencias medias (color verde lima) y a partir de 2017 eficiencias bajas (color rojo). El comportamiento reflejado es un indicativo del deterioro sufrido en las instalaciones del proceso de compresión de gas de PDVSA y que está asociado a causas internas y externas.

**Figura 4.** Eficiencia DEA (%) por año de la planta compresora

De acuerdo a la Figura 4 se percibe una mejor eficiencia desde el año 2011 hasta el 2016 y a partir de ahí la eficiencia se considera baja, esto es concordante con los resultados obtenidos por Velásquez [40] quién aplicando la metodología de confiabilidad operacional en la planta en estudio en el período 2011 - 2019, calificó a los años 2017, 2018 y 2019 como críticos, debido a los bajos indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM) obtenidos. Esto permite señalar que la metodología aplicada (IET y DEA) se adapta a la realidad del caso en estudio.

El potencial total de mejora (Figura 5) de las variables de entrada para alcanzar una eficiencia superior evidenció un comportamiento similar entre las tres variables, dado que se obtuvieron valores de 31,86 % para la disponibilidad, 32,95 % para la utilización y 35,19 % para la utilización. Es decir, que mejorar la eficiencia de la planta requiere de esfuerzos en proporciones similares en las tres variables estudiadas. No obstante, hay que dejar claro que las fallas en mantenimiento asociadas a la disponibilidad afectan de manera directa el rendimiento y la utilización de la planta, por lo que este es un parámetro crítico.

**Figura 5.** Mejoras potenciales totales por variable de entrada

Cuando se analiza la contribución input/output sobre la eficiencia de cada año (cuadro 3) se observa que sólo una variable de entrada junto con la variable de salida contribuye a la eficiencia de

manera significativa (disponibilidad). En la Tabla 3 también puede verse que en los años 2011 hasta 2016, los porcentajes de mejora para alcanzar los valores del año 2013 oscilaron en porcentajes entre 1 y 13 para la disponibilidad, entre 3 y 20 para el rendimiento y entre 0 y 18 para la utilización. Sin embargo, para la 2017 hasta la 2022 los valores aumentan representativamente y los rangos de porcentajes son entre 30 y 52 para la disponibilidad, entre 29 y 56 para el rendimiento y entre 33 y 58 para la utilización.

Tabla 3. Contribución y mejora de las variables de entrada por DMU

D M U	Contribución Input/Output de las variables por DMU				Mejora potencial de las variables de entrada por DMU		
	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Utilización (%)	IET (%)	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Utilización (%)
2011	100	--	--	100	-6	-15	-11
2012	--	--	100	100	-1	-5	0
2013	100	--	--	100	0	0	0
2014	--	100	--	100	-8	-5	-6
2015	100	--	--	100	-12	-3	-10
2016	--	100	--	100	-13	-20	-18
2017	100	--	--	100	-38	-50	-53
2018	--	100	--	100	-37	-29	-41
2019	100	--	--	100	-30	-39	-33
2020	--	100	--	100	-49	-39	-49
2021	100	--	--	100	-49	-53	-55
2022	100	--	--	100	-52	-56	-58

En función de los resultados obtenidos y a la metodología planteada, se consideran los años del 2017 al 2022 como críticos; además, los mismos están dentro del criterio asumido por Faris et al. [36] quienes al obtener un valor de OEE de 60,44 por ciento lo consideraron bajo para plantas compresoras cuyo propósito es trabajar 24 h/d.

Para dar continuación al estudio y en función de lo establecido en el punto 2.1.3, se asumió ahora como DMU las unidades moto-compresoras K1010, K1020, K1030 y K1040. No obstante, se decidió dividir el análisis en dos grupos, uno antes de pandemia (2017-2019) y otro en pandemia (2020-2022), ello por considerar que las condiciones de trabajo durante la pandemia no fueron las mismas ni posteriores a ella.

En el caso del primer periodo en estudio (2017 – 2019), en la Tabla 4, se muestran las variables de entrada y salida para las DMU consideradas. Se detalla en el referido cuadro que el mayor valor de disponibilidad lo mostró A2 (97,5 %) y la menor disponibilidad C1 (44,5 %). El mejor rendimiento fue de 74 % fue presentado por C3 y el menor rendimiento fue de 47,8 % de B2). La utilización osciló en el rango de 43 % (C1) y 90,2 % (D2). Los valores obtenidos en las variables de entrada conllevaron a la obtención de IET bajos (entre 11,3% y 60,1%) que ratifica el mal desempeño de las actividades asociadas a la cadena de valor del gas natural en el país. Asimismo, es posible señalar que el mayor valor obtenido de IET coincidió con el mayor valor de disponibilidad y utilización, y el menor valor de IET también se relaciona con las menores puntuaciones de ambas variables.

Tabla 4. Variables de entrada (Disponibilidad, Rendimiento y Utilización) y variable de salida (IET) para las unidades moto-compresoras (DMU) en los años 2017,2018 y 2019

Año	DMU	Nombre	Variables de entrada			Variable de salida
			Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Utilización (%)	
2017	K1010	A1	71,9	64,0	70,7	32,5
	K1020	B1	87,3	69,5	85,4	51,8
	K1030	C1	44,5	59,3	43,0	11,3
	K1040	D1	45,6	60,6	44,5	12,3
2018	K1010	A2	97,5	66,2	93,1	60,1
	K1020	B2	69,9	47,8	67,2	22,5
	K1030	C2	95,6	61,9	87,1	51,5
	K1040	D2	92,4	64,1	90,2	53,5
2019	K1010	A3	73,3	71,4	72,7	38,1
	K1020	B3	89,7	72,7	77,1	50,3
	K1030	C3	87,7	74,0	78,5	51,0
	K1040	D3	84,5	71,8	76,2	46,3

Las correlaciones de las variables (ver Tabla 5) mostraron ser baja entre el rendimiento - utilización, moderada entre la disponibilidad - rendimiento y entre el rendimiento e IET, las demás correlaciones (disponibilidad - utilización, disponibilidad - IET, utilización - IET) fueron muy fuertes, este comportamiento es cónsono con lo explicado en el punto anterior respecto al mayor y menor valor de EIT. De acuerdo a Santos-Navarro et al. [41] ello se debe a que es necesario incorporar más variables explicativas al modelo o existen variables para el caso en estudio que lo afectan y no se consideraron o perjudican las variables (factores externos).

Tabla 5. Correlación de las variables de entrada y salida

	Disponibilidad	Rendimiento	Utilización	IET
Disponibilidad	1,0	0,45	0,98	0,97
Rendimiento		1,0	0,39	0,61
Utilización			1,0	0,96
IET				1,0

En función del resultado del primer punto donde se demostró que el modelo aplicado se ajusta a la realidad, es posible indicar entonces que en este caso las variables fueron afectadas por aspectos externos, tales como suspensión del servicio por parte del cliente y falta de gas para comprimir, siendo estas causas las que afectan directamente el rendimiento y sobre las cuales no se tienen control.

Los porcentajes de eficiencia (ver Figura 6) reflejaron comportamientos similares de los tres años de estudio. Las unidades B1 y B2 y C3 fueron las únicas que presentaron eficiencia de 100 por ciento, C1 y D1, D2, C3 y D3 presentaron eficiencias medias, mientras que A1, A2, C2 y D3 presentaron eficiencias bajas. De acuerdo a lo observado, el mejor desempeño fue logrado por la unidad D (K1040) quien durante los tres años su eficiencia osciló entre 91,6 % y 96,3 %. El comportamiento presentado por las unidades moto-compresoras puede considerarse como inestable, porque las unidades no evidenciaron un comportamiento

constante en el lapso de estudio, sino que estuvo sujeto a altas y bajas asociadas a acciones sobre las cuales parece no tenerse control sobre ellas.

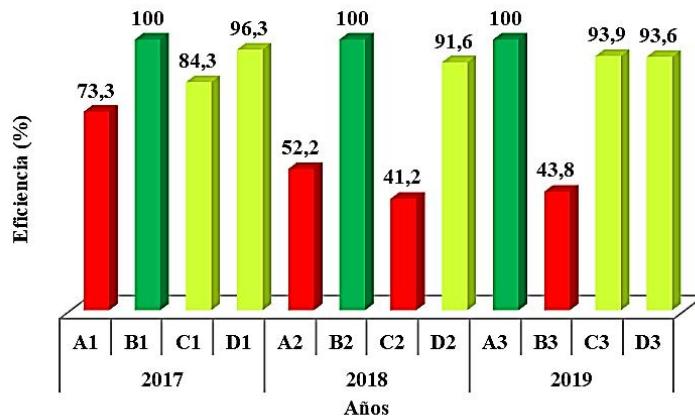


Figura 6. Eficiencia por unidad compresora (2017-2019)

El contexto anteriormente descrito pudo deberse desde el punto de vista de mantenimiento, al número de fallas, tiempos entre falla (TBF) y tiempos de reparación (TTR) presentado por las unidades, variables que afectan la confiabilidad y mantenibilidad de las unidades moto-compresoras. Como se observa en la Tabla 6, la DMU que presentó un menor número de fallas fue la K1020 (182 fallas), pero sus tiempos de reparación fueron mayores en comparación con las otras DMU, y si bien tuvo eficiencia de 100 % en los dos primeros años esta disminuyó hasta 43,8 % en el año 2019. Destaca K1040 quien presentó durante los tres años de estudio un bajo número de fallas totales (196), TBF altos (21066,4 h) y mejores TTR (4245,5 h), esto le permitió tener buenas eficiencias en el lapso de estudio, justificando así comportamiento descrito anteriormente.

Tabla 6. Número de fallas, tiempos de reparación de las unidades moto-compresoras y valores de los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad en los años 2017, 2018 y 2019

Unidades	Número de fallas				Tiempo entre falla, total (TBF, h)				Tiempo de reparación, total (TTR, h)				Confiabilidad / Mantenibilidad
	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Año	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	4	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2017	106	66	95	61	6959,6	7482,3	6411,0	6516,8	1630,8	1042,6	2278,7	2143,5	43,7 % / 71,9 %
2018	58	46	70	59	8156,3	5909,7	7699,8	7880,1	359,2	2701,0	918,8	688,6	36,4 % / 72,5 %
2019	51	70	77	76	6635,8	6760,1	6891,8	6669,7	1609,8	1108,5	1148,0	1544,6	37,8 % / 71,4 %
Total	215	182	242	196	21751,7	20152,1	21002,7	21066,4	3599,8	4852,1	4376,7	4245,5	

Las confiabilidades encontradas en los años en estudio se consideran bajas con respecto al indicador clase mundial de 95%; además, disminuyeron al pasar el tiempo, mientras que las mantenibilidades son aceptables y se mantuvieron cercanas entre ellas. Este comportamiento señala que los altos valores de disponibilidad encontrados durante el estudio son reflejo de una buena mantenibilidad (TTR bajos) pero acompañado de una mala confiabilidad (TBF bajos).

Desde el punto de vista de rendimiento y utilización cuando estos no son afectados por fallas de los moto-compresores, los tiempos no operativos están asociados a factores externos

como la falta de gas procedente de los módulos de producción, detención de los pozos y fallas en los sistemas auxiliares de la planta compresora de gas (gas combustible, aire comprimido, energía eléctrica, aceite lubricante, recolección de condensados, agua industrial, recolección de aguas aceitosas y alivio y venteo), estos últimos ocasionan una detención del cien por ciento de la planta cuando fallan. Cabe destacar, que este tipo de percance se refleja cuando existen diferencias entre el valor de disponibilidad y utilización.

En lo que respecta a los años 2020 – 2021, difiere negativamente respecto a los tres años anteriores. Así se obtuvieron rangos de disponibilidad entre 37,3 % (A4) y 96,5 % (C4), el rendimiento varió entre 48,1 % (A4) y 68,7 % (C4) y la utilización alternó entre 29,5 % (A4) y 85,1 % (C4) (ver Tabla 7). Como consecuencia de la disminución de las variables de entrada, la variable de salida también disminuyó, por ende, se obtuvo un IET mínimo de sólo 5,3 % para A4 y el IET máximo fue de 56,4 % para C4.

Tabla 7. Variables de entrada (disponibilidad, rendimiento y utilización) y variable de salida (IET) para las unidades moto-compresoras (DMU) en los años 2020, 2021 y 2022

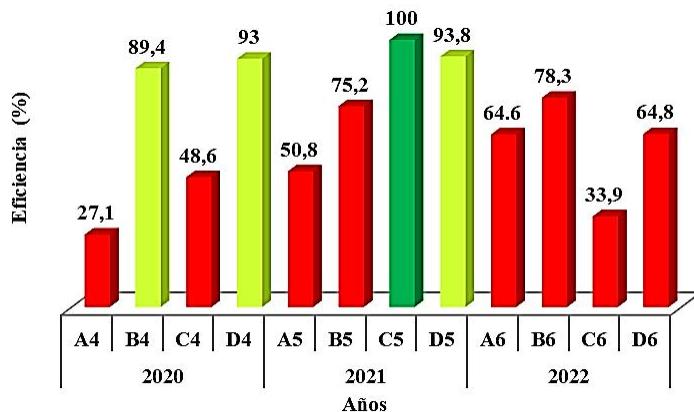
Año	DMU	Nombre	Variables de entrada			Variable de salida
			Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Utilización (%)	
2020	K1010	A4	37,3	48,1	29,5	5,3
	K1020	B4	93,7	65,9	81,6	50,3
	K1030	C4	96,5	68,7	85,1	56,4
2021	K1040	D4	80,4	60,8	75,3	36,8
	K1010	A5	80,6	66,2	79,0	42,1
	K1020	B5	60,6	49,9	59,6	18,0
2022	K1030	C5	83,0	67,8	80,9	45,5
	K1040	D5	42,9	49,5	40,1	8,5
	K1010	A6	66,5	48,4	58,1	18,7
2022	K1020	B6	83,1	60,0	72,0	35,9
	K1030	C6	69,7	61,4	53,7	23,0
	K1040	D6	69,7	56,2	67,5	26,4

Las correlaciones obtenidas mejoraron respecto a los años anteriores (Tabla 8), por ende, se encontraron correlaciones positivas altas entre disponibilidad - rendimiento y rendimiento y utilización, y correlaciones fuertes entre disponibilidad - utilización y entre las tres variables de entrada con la variable de salida, ratificando lo descrito anteriormente sobre este aspecto. Este comportamiento ratifica lo expresado referente a que el modelo aplicado se ajusta a la realidad.

Tabla 8. Correlación de las variables de entrada y salida

	Disponibilidad	Rendimiento	Utilización	IET
Disponibilidad	1,0	0,87	0,96	0,96
Rendimiento		1,0	0,84	0,93
Utilización			1,0	0,95
IET				1,0

La conducta de las eficiencias desmejoró respecto al lapso anterior (Figura 7), sólo C5 fue eficiente (color verde), B4, D4 Y D5 presentaron eficiencias buenas (color verde lima), las demás ocho DMU su eficiencia fue baja (color rojo).

**Figura 7.** Eficiencia por unidad compresora años 2020-2022

El comportamiento encontrado en la producción es consecuencia de la casi detención absoluta de la planta durante el lapso de estudio, en la Tabla 9 se observa los bajos TBF presentados por las unidades moto-compresoras, así como la presencia de un gran número de fallas. Los valores de confiabilidad y mantenibilidad disminuyeron, por ende, lo que trajo como consecuencia la disminución de la disponibilidad mostrada anteriormente.

Tabla 9. Número de fallas, tiempos de reparación de las unidades moto-compresoras y valores de los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad en los años 2020, 2021 y 2022

	Número de fallas					Tiempo entre falla, total (TBF, h)				Tiempo de reparación, total (TTR, h)				Confiabilidad / Mantenibilidad
	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	
Unidades	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Confiabilidad / Mantenibilidad
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Año	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	4	Confiabilidad / Mantenibilidad
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2020	50	65	71	32	96,12	207,84	239,99	305,71	161,75	14,06	8,58	74,29	28,1 % / 68,3 %	
2021	53	68	57	29	103,07	86,47	101,92	92,69	17,02	140,84	60,71	22,28	18,4 % / 56,8 %	
2022	48	72	24	22	82,88	117,38	93,13	91,89	41,72	23,92	40,44	134,52	22,4 % / 61,1 %	
Total	151	205	152	83	282,07	411,69	435,04	490,29	220,49	178,82	109,73	231,09		

Aunadas a la causas técnicas normales que afectan el rendimiento y la utilización descritas anteriormente para el lapso 2017-2019, es importante señalar en defensa de los resultados obtenidos, que según Molina-Villacís et al. [44] para el momento de la pandemia las producciones en las industrias en general disminuyeron como consecuencia de la reducción de los suministros necesarios para la producción, afectando particularmente a las industrias que estaban más estrechamente integradas en las cadenas de valor globales [44]. Otros factores que posiblemente perturbaron la actividad económica incluyeron restricciones a gran parte de la fuerza laboral existente, que les impidió tele trabajar o viajar, así como órdenes de cerrar establecimientos que operan para el público (excepto aquellos que proporcionan alimentos y bienes), productos farmacéuticos y productos sanitarios [45].

Es importante señalar, que los efectos de la disminución de la eficiencia asociada al rendimiento y utilización trajeron para la industria del gas consecuencias secundarias negativas, porque se ocasiona

una producción diferida cuyo destino es quema y venteo, la cual ha ido en aumento en la planta como se muestra en la Figura 8, sobre todo a partir del año 2016 [39].

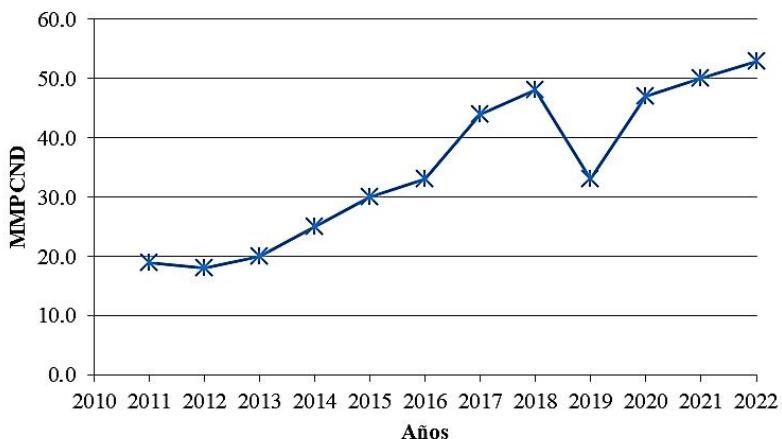


Figura 8. Producción diferida años 2011-2022

En función de los resultados obtenidos estos dos últimos períodos analizados, se observa que el proceso asociado al mantenimiento aplicado a la planta de gas fue deficiente y como consecuencia de ello aumentaron el número de fallas, por ende, afectó la disponibilidad, el rendimiento y utilización de los equipos. Pero, también influye sobre la planificación y logística del mantenimiento, porque cuantas más averías se produzcan, más piezas se necesitarán para reparar los equipos averiados, así como el costo de la mano de obra de mantenimiento que suele derivarse del trabajo no planificado. Esto afecta en gran medida a los costos de producción y la productividad [45].

3. Conclusiones

La aplicación del método DEA a partir de la modificación del indicador OEE para medir la eficiencia técnica de las acciones de mantenimiento puede considerarse como una herramienta que presenta resultados acordes con la realidad en estudio, por lo tanto, puede ser empleada para tal fin. La aplicación de la herramienta permitió aseverar que las acciones de mantenimiento se llevaron de manera correcta durante el lapso 2011-2016 donde se obtuvieron eficiencias mayores a 80 %, posterior a ello las eficiencias disminuyeron a valores no aceptables (menor a 80 %) y esto se corroboró con los valores de confiabilidad obtenidos entre 36,4 % - 43,7% para los años 2017-2019 y 18,4 % y 28,1 % para el lapso 2020-2022. Como consecuencia de ello, los resultados indican que la gestión de mantenimiento desarrollada no está acorde con la importancia de la misma y debe mejorarse.

Referencias

- [1] Muchiri, P.; Pintelon, L.; Gelders, L., y Martin, H. (2011) "Development of maintenance function performance measurement framework and indicators". International Journal of Production Economics, vol. 131, no. 1, pp. 295-302.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527310001726>
- [2] Ran, Y.; Zhou, X.; Lin, P.; Wen, Y. y Deng, R. (2019) "A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches". IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. XX, no.

- XX, pp. 1-35.
https://www.researchgate.net/publication/337971929_A_Survey_of_Predictive_Maintenance_Systems_Purposes_and_Approaches
- [3] Agergaard, J. K.; Sørgaard, K. V.; Mortensen, N. H.; Ge, J.; Hansen, K. B. y Khalid, W. (2021) "Standardising maintenance jobs to improve grouping decision making". Proceedings of the Design Society, vol. 1, pp. 2701-2710.
https://orbit.dtu.dk/files/255815412/standardising_maintenance_jobs_to_improve_grouping_decision_making.pdf
- [4] Motaghare, O.; Pillai, A. S. y Ramachandran, K. I. (2018) "Predictive maintenance architecture" in 2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC).
https://www.researchgate.net/publication/334888263_Predictive_Maintenance_Architecture
- [5] Tarar, M. A. (2014) "Study reliability centered maintenance (RCM) of rotating equipment through predictive maintenance" in 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), Dubai.
https://iieng.org/images/proceedings_pdf/4824E0314595.pdf
- [6] Yi, W. y Chan, A. P. (2014) "Critical review of labor productivity research in construction journals" Journal of Management in Engineering, vol. 30, no. 2, pp. 214-225.
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000194>
- [7] Hwang, B. G.; Zhu, L. y Tzu Ming, J. T. (2017) "Factors affecting productivity in green building construction projects: The case of Singapore" Journal of Management in Engineering, vol. 33, no. 3, p. 04016052, 2017.
https://www.researchgate.net/publication/308522362_Factors_Affecting_Productivity_in_Green_Building_Construction_Projects_The_Case_of_Singapore
- [8] Kaplan, R. y Cooper, R. (1998) "Cost and effect: using integrated systems to drive profitability and performance", Boston: Harvard Business School Press.
- [9] Sumanth, D. (1998) "Total Productivity Management. A systemic and quantitative approach to compete in Quality, Price and Time", CRC Press Company. New York
- [10] Hill, T. (1993) "Manufacturing Strategy: The Strategic Management of the Manufacturing Function", London: Open University/Macmillan.
- [11] Prokopenko, J. (1989) La Gestión de la Productividad. Manual Práctico, Ginebra: Organización Internacional del Trabajo.
- [12] Mora, L. (2009) Mantenimiento. Planeación, Ejecución y Control, Ciudad de México: Alfaomega.
- [13] O'Brien, M. (2015) "TPM & OEE" LBS Partners, Ireland. https://www.lbspartners.ie/wp-content/uploads/2018/12/TPM-OEE-EBook_LBSPartners.pdf
- [14] Anusha, C. H. y Umasankar, V. (2020) "Performance prediction through OEE-model" International Journal of Industrial Engineering and Management, vol. 11, no. 2, pp. 93-103.
https://ijiemjournal.uns.ac.rs/images/journal/volume11/IJIEM_256.pdf

- [15] Ádám, B. A. y Sebestyén, Z. (2023) "Comparison of OEE-based manufacturing productivity metrics" in Creative Construction Conference 2023, Keszthely, Hungary. <https://repositorium.omikk.bme.hu/bitstreams/162797a0-f2a8-4202-b41b-0a77f8695779/download>
- [16] Pérez-Cedeño, R. O. y Vásquez-Stanescu, C. L. (2022) "Relación entre el consumo energético y las emisiones de CO₂ con el índice de desarrollo humano en países americanos: un análisis de eficiencia usando DEA" Publicaciones en Ciencias y Tecnología, vol. 16, no. 1, pp. 3-15. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt/article/view/3942>
- [17] Charles, V.; Aparicio, J. y Zhu, J. (2019) "The curse of dimensionality of decision-making units: A simple approach to increase the discriminatory power of data envelopment analysis" European Journal of Operational Research, vol. 279, no. 3, pp. 929-940.
- [18] Gong, Y.; Liu, J. y Zhu, J. (2019) "When to increase firms' sustainable operations for efficiency? A data envelopment analysis in the retailing industry," European Journal of Operational Research, vol. 277, no. 3, pp. 1010-1026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221719305168>
- [19] Osorio-Oviedo, A. A. (2019) "Evaluación de la Eficiencia del Crecimiento de la Industria de Cereales en América Aplicando Análisis Envolvente de Datos". Publicaciones en Ciencias y Tecnología, vol. 13, no. 1, pp. 41-50. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt/article/view/2146>
- [20] Tayal, A.; Solanki, A. y Singh, S. P. (2020) "Integrated frame work for identifying sustainable manufacturing layouts based on big data, machine learning, meta-heuristic and data envelopment analysis" Sustainable Cities and Society, vol. 62, p. 102383. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670720306041>
- [21] Mirmozaffari, M.; Shadkam, E.; Khalili, S. M. y Yazdani, M. (2021) "Developing a novel integrated generalised data envelopment analysis (DEA) to evaluate hospitals providing stroke care services" Bioengineering, vol. 8, no. 12, p. 207. <https://www.mdpi.com/2306-5354/8/12/207>
- [22] Fotova Čiković, K. y Ložić, J. (2022) "Application of Data Envelopment Analysis (DEA) in information and communication technologies" Tehnički glasnik, vol. 16, no. 1, pp. 129-134. [https://doaj.org/article/d283f49d860a40298ed17733bfe03c17#:~:text=Data%20Envelopment%20Analysis%20\(DEA\)%20is,variables%20to%20multiple%20output%20variables.](https://doaj.org/article/d283f49d860a40298ed17733bfe03c17#:~:text=Data%20Envelopment%20Analysis%20(DEA)%20is,variables%20to%20multiple%20output%20variables.)
- [23] Akram, M.; Shahzadi, S.; Shah, S. M. U. y Allahviranloo, T. (2023) "A fully Fermatean fuzzy multi-objective transportation model using an extended DEA technique" Granular Computing, pp. 1-32. <https://link.springer.com/article/10.1007/s41066-023-00399-6>
- [24] Winatie, A.; Maharani, B. P. y Rimawan, E. (2018) "Productivity Analysis to increase overall equipment effectiveness (OEE) by implementing total productive maintenance" International Journal of Innovative Science and Research Technology, vol. 3, no. 12, pp. 433-439. <https://ijisrt.com/wp-content/uploads/2019/01/IJISRT18DC196.pdf>
- [25] Yanez, M.; Gómez de la Vega, H. y Valbuena, G. (2004) "Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo", R2M.

- [26] Schuschny, A. R. (2007) "El método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO₂ en América Latina y el Caribe", CEPAL.
<https://digitallibrary.un.org/record/600891?ln=es&v=pdf>
- [27] Périco, A. E.; Brandao Santana, N. y Do Nascimento Rebelatto, D. A. (2016) "Estimating the efficiency from Brazilian banks: a bootstrapped Data Envelopment Analysis (DEA)" Production, vol. 26, no. 3, pp. 551-561. <https://www.redalyc.org/pdf/3967/396746694005.pdf>
- [28] Kafi, A.; Daneshian, B. y Rostamy-Malkhalifeh, M. (2020) "Pronóstico del intervalo de confianza en la eficiencia de las unidades de toma de decisiones en el análisis envolvente de datos" Nexo Revista Científica, vol. 33, no. 2, pp. 431-445.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7852455>
- [29] Favila Tello, A. (2019) "Eficiencia de la innovación en América Latina. Una aproximación a través del Análisis Envolvente de Datos" Análisis económico, vol. 34, no. 87, pp. 249-267.
<https://www.redalyc.org/journal/413/41362257011/html/>
- [30] Golsefid, F. G.; Daneshian, B. y Rostamy-Malkhalifeh, M. (2020) "Ranking of units by corrected cross-efficiency method using optimal weights in the smallest interval" Nexo revista científica, vol. 33, no. 02, pp. 446-453. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7852456.pdf>
- [31] Trujillo, J. y Brito, A. (2009) "Jusepin Main Station Separation Facilities Upgrade by Means of Integrated Multiphase Solutions" in SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference.
https://www.researchgate.net/publication/254529402_Jusepin_Main_Station_Separation_Facilities_Upgrade_by_Means_of_Integrated_Multiphase_Solutions
- [32] Corvaro, F.; Giacchetta, G.; Marchetti, B. y Recanati, M. (2017) "Reliability, Availability,Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618". Petroleum, vol. 3, no. 2, pp. 266-272. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656116301523>
- [33] OREDA (2015). "Offshore and Onshore Reliability Data Handbook", NTNU. <http://www.dl.edi-info.ir/The%20Offshore%20and%20Onshore%20Reliability%20Data%20OREDA.pdf>
- [34] Faris, M. H. (2021) "Developing a Total Productive Maintenance Framework with RAM (Reliability, Availability and Maintainability) Techniques in Gas Compression Plants" Doctoral dissertation Sudan University of Science and Technology, Jartum.
- [35] Faris, M. H.; Elhussein, E., Osman Ali, H. y Yousif, A. (2019) "A Review of Applied Modern Condition Monitoring and Best Maintenance Engineering Practices in Reciprocating Gas Compression Plants" International Journal of Engineering Research and Technology, pp. 2983-2987.
https://www.researchgate.net/publication/349522062_A_Review_of_Applied_Modern_Condition_Monitoring_and_Best_Maintenance_Engineering_Practices_in_Reciprocating_Gas_Compression_Plants

- [36] Blanco-Canto, M.; Bares-López, L. y Hrynevych, O. (2019) "Análisis de la eficiencia global de las 50 mejores universidades del mundo" Espacios, vol. 40, no. 9, pp. 30-48. <http://www.revistaespacios.com/a19v40n09/a19v40n09p30.pdf>
- [37] Stefanović-Marinović, J.; Troha, S. y Milovančević, M. (2017) "An application of multicriteria optimization to the two-carrier two-speed planetary gear trains" Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, vol. 15, no. 1, p. 85–95. https://www.researchgate.net/publication/316250507_An_application_of_multicriteria_optimization_to_the_two-carrier_two-speed_planetary_gear_trains
- [38] Starčević, S.; Bojović, N.; Junevičius, R. y Skrīkājs, V. (2019) "Analytical hierarchy process method and data envelopment analysis application in terrain vehicle selection" Transport, vol. 34, no. 5, pp. 600-616. <https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/11710>
- [39] Velásquez, A. (2022) "Confiabilidad operacional en plantas compresoras de gas" Tesis de Maestría. Universidad de Oriente, Maturín.
- [40] Santos-Navarro, G.; Wong-González, P. y Martínez-Martínez, A. (2019) "Medición de la eficiencia técnica de la industria automotriz mediante el Análisis Envolvente de Datos" Economía, sociedad y territorio, vol. 19, no. 60, pp. 173-201. <https://www.redalyc.org/journal/111/11162787007/html/>
- [41] Lai, P. (2013) "A study on the relationship between airport privatization and airport efficiency. An Application of using AHP/DEA Methods" Tesis Doctoral para optar al Titulo de Doctor en Filosofía. Cardiff University. <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/46617/1/2013%20Lai%20Po-Lin.pdf>
- [42] Avkiran, N. K. (2006) "Productivity analysis in the service sector with data envelopment analysis", Brisbane, Australia: The University of Queensland. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2627576
- [43] Molina-Villacís, C. J.; Romero-Villagrán, J. L. y Cevallos-Figueroa, N. G. (2020) "Consecuencias económicas del Covid 19 sobre el aparato productivo" Polo del conocimiento, vol. 5, no. 9, pp. 46-54. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7554421.pdf>
- [44] Diago-Diago, M. P. (2021) "Violación de derechos humanos en las cadenas de suministro en tiempos de pandemia" Revista Española de Derecho Internacional, vol. 73, no. 1, pp. 337-344. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7806734>
- [45] Olis Barreto, I. M., Reyes, G. E., Martin-Fiorino, V., y Villalobos-Antúnez, J. V. (2021). "Crisis empresarial, factores que influyen y alteran la gestión de las empresas en Colombia". Revista de ciencias sociales, 27(4), 93-112.," Revista de Ciencias Sociales, vol. 27, no. 4, pp. 93-112. <https://www.redalyc.org/journal/280/28069360008/html/>
- [46] Barabady, A.; Nouri, A.; Ataei, M. y Einian, V. (2017) "Spare part requirement prediction under different maintenance strategies" International Journal of Mining, vol. 33, no. 3, pp. 1-14. https://www.researchgate.net/publication/319870044_Spare_part_requirement_prediction_under_different_maintenance_strategies

- [47] Amendola, L. (2003) "Indicadores de confiabilidad propulsores en la gestión del mantenimiento", Valencia- España: Departamento de Proyectos de Ingeniería, Universidad Politécnica de Valencia. https://mantenimientoplanificado.com/Articulos%20gesti%C3%B3n%20mantenimiento_archivos/indicadores%20confiabilidad%20amendola.pdf
- [48] Melo-González, R.; Lara-Hernández, C. y Jacobo-Gordillo, F. (2009) "Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación tipo Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería" iencia Tecnol. Ed. Ciencia (IMIQ) Ed.vol. 14 (IMIQ)n, vol. 24, no. 2, pp. 93-104. <https://www.redalyc.org/pdf/482/48213841002.pdf>
- [49] Tobe, A. Y.; Widhiyanuriyawan, D. y Yuliati, L. (2018) "The integration of Overall Equipment Effectiveness (OEE) method and lean manufacturing concept to improve production performance (Case study: Fertilizer producer)" JEMIS (Journal of Engineering & Management in Industrial System), vol. 5, no. 2, pp. 102-108. https://www.researchgate.net/publication/324817539_THE_INTEGRATION_OF_OVERALL_EQUIPMENT_EFFECTIVENESS_OEE_METHOD_AND_LEAN_MANUFACTURING_CONCEPT_TO_IMPROVE_PRODUCTION_PERFORMANCE_CASE_STUDY_FERTILIZER_PRODUCER