



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3881>

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

***Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE***

***Determination of the factors that affect the reliability of EPMAPSE submersible pumps***

***Determinação dos fatores que afetam a confiabilidade das bombas submersíveis EPMAPSE***

Luis Ernesto Charcopa-Paz <sup>I</sup>

[lcharcopa7939@utm.edu.ec](mailto:lcharcopa7939@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-6186-9074>

Miguel Herrera-Suárez <sup>II</sup>

[Miguel.herrera@utm.edu.ec](mailto:Miguel.herrera@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-4567-5872>

Bladimir Jacinto Carrillo-Anchundia <sup>III</sup>

[bladimir.carrillo@utm.edu.ec](mailto:bladimir.carrillo@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-9948-728X>

**Correspondencia:** [lcharcopa7939@utm.edu.ec](mailto:lcharcopa7939@utm.edu.ec)

\***Recibido:** 01 de mayo de 2024 \***Aceptado:** 24 de mayo de 2024 \* **Publicado:** 04 de junio de 2024

- I. Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Profesor Titular Principal II, Tiempo Completo, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias, Ecuador.
- III. Departamento de Procesos Químicos en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, Magíster en Administración Ambiental, Ingeniero Químico, Ecuador.

## Resumen

El propósito de esta investigación es determinar los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE. Metodológicamente fue aplicada, de campo. Los datos se recolectaron partiendo de la observación directa y de la información proporcionada por la organización, se realiza la caracterización de las condiciones de operación, lo que permitió establecer parámetros de funcionamiento de los equipos. Luego se determinó los indicadores de mantenimiento, el análisis de criticidad, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, a partir de los registros de falla, registro de funcionamiento, inventarios, registro de observaciones y ecuaciones pertinentes. Se aplicó una entrevista-cuestionario autoadministrada para determinar los factores que afectan la confiabilidad de los equipos; finalmente se elaboró el plan de mejora para su implementación. Del análisis realizado se establece que el índice de fallas es alto, la empresa no tiene un plan de mantenimiento, solo realizan mantenimiento correctivo, el MTBF es bajo y el MTTR es elevado, hay equipos de 44,02% de confiabilidad; la aplicación del plan de mejora permitirá obtener mayor confiabilidad y disponibilidad de los equipos y así mejorar la gestión de mantenimiento de la empresa, donde se establecen metas alcanzables y estrategias de mantenimiento. Se concluye que entre los elementos que afecta la confiabilidad de las bombas electro sumergible (BES) se encuentra la falta de un plan de mantenimiento, ausencia de herramientas, falta de kit de repuesto, agentes externos como arena durante el invierno, esto incide en la calidad del agua y disminuye la vida útil de los equipos.

**Palabras clave:** análisis de criticidad; bombas sumergibles; confiabilidad; EPMAPSE; gestión de mantenimiento.

## Abstract

The purpose of this research is to determine the factors that affect the reliability of EPMAPSE submersible pumps. Methodologically it was applied, field. The data was collected based on direct observation and information provided by the organization, the characterization of the operating conditions was carried out, which allowed the establishment of operating parameters of the equipment. Then the maintenance indicators, criticality analysis, reliability, maintainability and availability were determined, based on the failure records, operation records, inventories, observations record and relevant equations. A self-administered interview-questionnaire was applied to determine the factors that affect the reliability of the equipment; Finally, the improvement plan

---

was prepared for its implementation. From the analysis carried out, it is established that the failure rate is high, the company does not have a maintenance plan, they only perform corrective maintenance, the MTBF is low and the MTTR is high, there is equipment with 44.02% reliability; The application of the improvement plan will allow greater reliability and availability of the equipment and thus improve the company's maintenance management, where achievable goals and maintenance strategies are established. It is concluded that among the elements that affect the reliability of electrosubmersible pumps (BES) is the lack of a maintenance plan, absence of tools, lack of replacement kit, external agents such as sand during the winter, this affects the water quality and reduces the useful life of the equipment.

**Keywords:** criticality analysis; submersible pumps; reliability; EPMAPSE; maintenance management.

## Resumo

O objetivo desta pesquisa é determinar os fatores que afetam a confiabilidade das bombas submersíveis EPMAPSE. Metodologicamente foi aplicado, campo. Os dados foram recolhidos com base na observação direta e informação fornecida pela organização, foi realizada a caracterização das condições de funcionamento, o que permitiu o estabelecimento de parâmetros de funcionamento do equipamento. Em seguida foram determinados os indicadores de manutenção, análise de criticidade, confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, com base nos registros de falhas, registros de operação, inventários, registro de observações e equações relevantes. Foi aplicado um questionário-entrevista autoaplicável para determinar os fatores que afetam a confiabilidade do equipamento; Por fim, foi elaborado o plano de melhorias para sua implementação. Pela análise realizada, constata-se que o índice de falhas é alto, a empresa não possui plano de manutenção, realiza apenas manutenções corretivas, o MTBF é baixo e o MTTR é alto, há equipamentos com 44,02% de confiabilidade; A aplicação do plano de melhorias permitirá maior confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos e assim melhorar a gestão de manutenção da empresa, onde são estabelecidas metas alcançáveis e estratégias de manutenção. Conclui-se que entre os elementos que afetam a confiabilidade das bombas eletrossubmersíveis (BES) está a falta de plano de manutenção, ausência de ferramentas, falta de kit de reposição, agentes externos como areia durante o inverno, isso afeta a qualidade da água e reduz a vida útil do equipamento.

**Palavras-chave:** análise de criticidade; bombas submersíveis; confiabilidade; EPMAPSE; gerenciamento de manutenção.

## Introducción

La planta de captación y producción del sistema regional de agua potable Esmeraldas (EPMAPSE) tiene como fuente de abastecimiento la cuenca hidrográfica del río Esmeraldas. El agua cruda mediante cinco bombas es elevada a través de una línea de impulsión hasta las lagunas de reserva, desde aquí, se alimenta a la planta de potabilización.

La estación de bombeo de agua cruda tiene instalada cinco bombas electro-sumergibles (BES), de las cuales cuatro permanecen en operación y una en stand by, con lo que el caudal máximo de bombeo es de 2, 560 l/s; en la actualidad se tiene un caudal de bombeo de 1, 880 l/s por que se presentan problemas en el funcionamiento de los equipos por diferentes factores como: desgaste de las partes internas de las bombas, fallos eléctricos, atascamiento del impulsor, falta de plan de mantenimiento. Estas bombas (BES), durante el trabajo suelen verse afectados por condiciones ambientales adversas que provoca la aparición de una serie de fallas que comprometen su confiabilidad operacional, pues el fluido succionado arrastra materiales sólidos causando atascamientos y averías en el impulsor de las bombas, dañando en ocasiones los sellos mecánicos o los bujes, que impiden que el líquido ingrese al interior de la bomba. Estos problemas, entre otros, reducen la vida útil de los equipos y, por lo tanto, la confiabilidad.

Por lo general la reparación de estas bombas se realiza después de una falla por lo que su mantenimiento fundamentalmente es correctivo, lo cual evidentemente incide directamente en la confiabilidad de estos equipos.

La actividad del mantenimiento se desarrolla para mantener los equipos e instalaciones en un estado óptimo durante el desempeño de sus funciones (Salguero, 2022). La ejecución de esta actividad se lleva a cabo mediante la aplicación de un conjunto de técnicas y operaciones que conllevan a la disponibilidad de una cantidad determinada de recursos (Mora Gutiérrez, 2019).

Para lograr la optimización de los recursos de mantenimiento, es necesario fijar estrategias que den prioridad a la confiabilidad de los equipos dentro del contexto operacional, por lo tanto, es preciso llevar a cabo un análisis de criticidad y posterior a ello la jerarquización de los equipos (Parra et, al., 2019).

## Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

---

En la actualidad el mantenimiento ha efectuado más cambios que cualquier otra disciplina, como una consecuencia del aumento en número y variedad de recursos físicos que deben conservar, incremento de procesos productivos de mayor complejidad, así como la introducción de nuevas técnicas de mantenimiento que se basan en la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (Pinos, 2020).

Tomando en cuenta estos antecedentes la presente investigación tiene como objetivo determinar los factores que inciden en la confiabilidad operacional de las bombas electro-sumergibles (BES) de la planta de captación EPMAPSE del municipio de Esmeraldas, para la propuesta de un plan de medidas dirigidas a la mejora de la confiabilidad.

### **Materiales y Métodos**

La presente investigación fue realizada en la Planta de Captación de agua de la EPMAPSE, forma parte de las empresas del Municipio de Esmeraldas, siendo la responsable de la calidad y cantidad del suministro de agua potable para los cantones Esmeraldas, Atacames y Rioverde. Ubicada en el margen izquierdo del río Esmeraldas, aproximadamente a 8 km de la desembocadura del río en el océano Pacífico, en la parte convexa de la curva que forma el peñón de San Mateo.

En la figura 1, se presenta la ubicación de la planta de captación de agua, correspondiente a la Parroquia San Mateo, cantón y provincia de Esmeraldas, coordenadas geográficas  $00.887749^{\circ}$ ,  $-079.629170^{\circ}$ , aproximadamente a 15 km de la ciudad de Esmeraldas. El acceso a la zona se realiza a través de la Ruta del Spondylus, la cual se encuentra en buen estado y completamente pavimentada. La EPMAPSE cuenta con dos plantas de captación de agua, se localizan en la margen derecha del río Esmeraldas, a unos 200 m aguas arriba del puente colgante vehicular, aproximadamente a 8 km de la desembocadura del río Esmeraldas en el océano Pacífico, a la altura de la parroquia San Mateo, en la curva que forma el peñón de San Mateo, En la estructura de captación, se han implementado los cárcamos de bombeo, como se muestra en la Figura 2. La investigación se realizó en la captación 2.

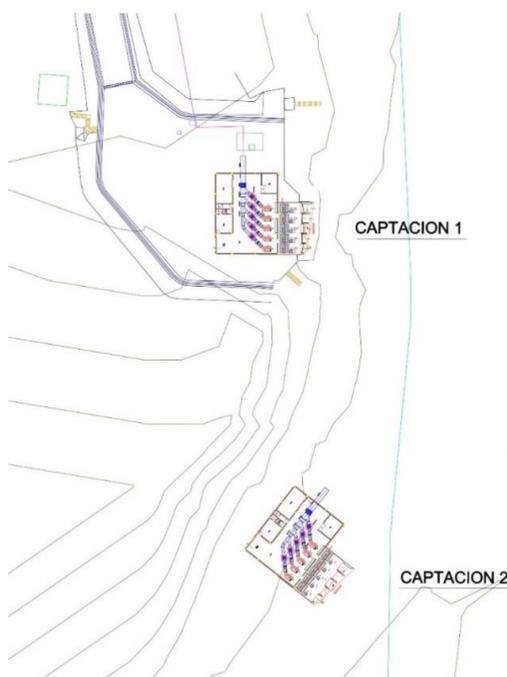
Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

Figura 1. Ubicación geográfica de la Planta de Captación



Nota. Ubicación de Planta de Captación, Parroquia San Mateo, Esmeraldas. Adaptado de tipo de mapa Satélite, Google Maps, 2023, (<https://www.google.com/maps/@0.887749,-79.629170,1242m/data=!3m1!1e3?hl=es-419&entry=ttu>). CC BY 4.0

Figura 2. Plantas de captación



Nota. Cortesía de EPMAPSE (2022).

Para la ubicación del emplazamiento de la captación, se determinaron como sitios viables aquellos donde no existía influencia de la marea, y que no eran sujetos a inundación, encontrándose adecuados los terrenos ubicados en la margen derecha antes del puente colgante, entre las cotas 6 y 9 msnm, sitio en el cual el arrastre de sedimentos y/o arenas era el mínimo, a fin de asegurar la vida útil de los

equipos de bombeo. En la figura 2 se muestra el plano de la planta de captación y el bombeo de agua cruda.

## **Metodología para la determinación de los factores que afectan la confiabilidad de las bombas BES**

La recopilación de información para determinar de los factores que afectan la confiabilidad de las bombas BES, se basó en el análisis de la documentación existente, en especial la contenida en la literatura especializada y una encuesta a informantes clave, tales como personal encargado de las actividades de mantenimiento, técnicos y directivos. Como instrumento de recolección de datos se empleó una encuesta estructurada que fue aplicada a los 16 entrevistado que se muestran en la Tabla 1.

*Tabla 1. Personal técnico que labora en el lugar de estudio*

<b>Población</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Personal de mantenimiento	8	50,00
Personal de operación	5	31,25
Personal directivo	3	18,75

*Nota. Elaboración Propia*

La confección de las preguntas de encuesta partió de los criterios de expertos y así como de la información contenida en la literatura. De igual forma la validación elaboración de la encuesta se realizó a partir del criterio de expertos mediante la metodología de preferencia, siguiendo el procedimiento metodológico descrito por (Herrera & Col 2006).

Se seleccionaron 20 candidatos o aspirantes a expertos, que a priori cumplen con los requisitos de ser conocedores de la temática del mantenimiento equipos de bombeo, mantenimiento industrial, de la mecánica en general, además de conocer las interioridades del contexto productivo ecuatoriano.

Los candidatos a expertos evaluados, nueve provienen del ámbito académico, pues se desempeñan en la docencia como especialistas en el área de la Ing. Mecánica e Industrial, cinco del ámbito metodológico en el área de investigación científica, la mayor parte de estos forman parte del claustro de profesores de la maestría de Mantenimiento Industrial de la UTM. Otros dos profesionales de EPMAPSE, dos profesionales de EP Petroecuador y los dos restantes profesionales de CELEC EP.

## Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

---

La selección final de los expertos se realizó mediante una autoevaluación que se realizan los propios candidatos respecto a los conocimientos y dominio de la información sobre la temática objeto de encuesta, mediante el coeficiente de competencia del experto, así como la determinación del coeficiente de argumentación  $K_a$ , el cual evalúa las fuentes que han influido más en su conocimiento. La metodología para la determinación de estos coeficientes ha sido ampliamente descrita en múltiples recursos (Legrá Lobaina y Silva Diéguez (2010) Ramírez Urizarri y Toledo Fernández (2011) (Herrera y col 2006).

Finalmente se determinó la concordancia entre las respuestas emitidas por los expertos, realizándose para ello la prueba de juicio de expertos para lo cual se determinó el coeficiente de concordancia de Kendall ( $W$ ), mediante el empleo del procesador estadístico SPSS 22.5 para Windows. Dicho coeficiente se determinó mediante la siguiente expresión.

Donde  $K$ , número de expertos que intervienen en el estudio;  $n$ , número de características o aspectos a evaluar;  $n_i$ , número de cuestiones a evaluar;  $S$ , suma de puntuaciones de cada característica evaluada;  $t_i$ , es el número de elementos con la misma calificación, es decir que se encuentran en el mismo rango, pueden tomar valores entre 2 y  $n$ .

El coeficiente de Kendall ( $W$ ) toma valores de 0 a 1, por lo tanto, se puede asumir intuitivamente que se acepte la concordancia de los expertos cuando  $W > 0.7$  y que se asuma discordancia cuando  $W < 0.4$ . En este caso queda sin determinarse la concordancia de los expertos cuando  $W$  está entre (0,4; 0,7).

### **Metodología para determinar la criticidad de las bombas sumergibles objeto de estudio**

Para el análisis de criticidad se consideraron los elementos que se observa en la figura 3, los cuales van desde el número 1: impulsor, 2: placa base, 3: Doble carcasa en la voluta a partir de DN 400, 4: juntas mecánicas, 5: eje acero inoxidable, 6: rodamientos robustos, hasta el 7: motor.

*Figura 3. Elementos de la Bomba Sumergible*



*Nota. Manual Bomba sumergible SULZER (2019).*

Las características del motor se evidencian en la Figura 4, mismas que están diseñadas para trabajar con varias frecuencias, dichas características se mencionan a continuación: 1: Aislamiento de clase H (140 °C / 284 °F), 2: factor de servicio hasta 1.3, 3: versatilidad en cables, 4: cable apantallado, 5: detector de humedad DI en cámara de junta incluido y suministro estándar, 6: sonda de protección térmica en el estator incluida en suministro estándar, 7: sistema de refrigeración.

*Figura 4. Características del motor*



*Nota. Manual Bomba sumergible SULZER (2019).*

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

Los elementos de la Bomba sumergible y la posición de cada factor de acuerdo a la escala determinada se muestran en la Tabla 2. En el caso de la frecuencia se evalúan las fallas en una escala de 1 a 4 y para el caso de las consecuencias se dividen en cuatro factores, que son impacto operacional que van en la escala del 1 a 10, el impacto por flexibilidad se mide en una escala del 1 a 4, el impacto de los costos de mantenimiento en una escala de 1 a 2 y el ingreso en seguridad, higiene y medio ambiente se mide en una escala de 1 a 8.

Tabla 2. Determinación de factor de Criticidad

ITEM	FACTORES	FACTOR DE FRECUENCIA		FACTORES DE CONSECUENCIAS															
		FALLAS (FF)		IMPACTO OPERACIONAL (IO)	IMPACTO POR FLEXIBILIDAD OPERACIONAL (FO)	IMPACTO EN COSTO DE MANTENIMIENTO (CM)	IMPACTO EN SEGURIDAD, HIGIENE Y AMBIENTE (SHA)												
		Numero de eventos (Escala 1-4)		(Escala 1 - 10)	(Escala 1 - 4)	(Escala 1 - 2)	(Escala 1 - 8)												
	EQUIPAMIENTO	4: Frecuente: mayor a 2 eventos al año	3: Promedio: 1 y 2 eventos al año	2: Bueno: entre 0,5 y 1 evento al año	1: Excelente: menos de 0,5 eventos al año	10: Pérdidas de producción superiores	7: Pérdidas de producción entre el 50%	5: Pérdidas de producción entre el 25%	3: Pérdidas de producción entre el 10%	1: Pérdidas de producción menor al	4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de	2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el	1: Se cuenta con unidades de reserva en	2: Costos de reparación, materiales y mano de obra superiores a USD 2,000,00	1: Costos de reparación, materiales y mano de obra inferiores a USD	8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor	6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o	3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental	1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud ambiental
A	Elementos de bomba Sumergible																		
1																			
2																			
3																			

Nota. Elaboración propia.

### Metodología para determinar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las bombas sumergibles

Para realizar el cálculo de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD), se considera la información de un mes de operación, por ser manejable y útil para el área de producción y para mantenimiento.

## Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

---

Para establecer los indicadores de mantenimiento se considerado el periodo de operación de 365 días, en tres jornadas de 8 horas cada una, correspondiente a 8760 horas al año, las cuales inician el 1 de enero de 2023 y terminan el 31 de diciembre de 2023. Los tiempos de logística y puesta en marcha no se consideraron en este análisis.

Para determinar la confiabilidad de los equipos mediante el método de distribución exponencial, se utiliza la siguiente ecuación.

$$R(t)=e^{(-\lambda t)} \quad (1)$$

Donde,

La tasa de fallos representa la cantidad de fallos de un sistema, se determina mediante la siguiente

$R(t)$  = Confiabilidad

$e$  = Numero de Euler (2, 718)

$\lambda$  = Constante denominada “tasa de fallas aleatorias”

$t$  = Periodo de tiempo arbitrario para el cual se desea conocer la confiabilidad

ecuación.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (2)$$

$\lambda$  = Tasa de fallos

El

1 = Número de fallas (3)

MTBF= Tiempo medio entre fallas.

MTBF se puede calcular usando la ecuación siguiente:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo Total Disponible (operación)}}{\text{Número de Fallas}}$$

Tasa de reparación indica el número de reparaciones realizadas por hora, se determina aplicando la siguiente formula.

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (4)$$

Mientras que el MTTR se puede calcular usan la ecuación siguiente:

$\mu$  = Tasa de reparación

1 = Número de reparaciones

MTTR = Tiempo medio entre reparación (Mean Time To Repair)

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

---

El MTBF se puede calcular usando la ecuación siguiente:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo Total Disponible (operación)}}{\text{Número de Fallas}} \quad (5)$$

Tasa de reparación indica el número de reparaciones realizadas por hora, se determina aplicando la siguiente formula.

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (6)$$

Mientras que el MTTR se puede calcular usan la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} \mu &= \text{Tasa de reparación} \\ 1 &= \text{Número de reparaciones} \\ MTTR &= \text{Tiempo medio entre reparación (Mean Time To Repair)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo Total de Mantenimiento}}{\text{Número de Reparaciones}}$$

La mantenibilidad se determina con la ecuación siguiente:

$$M(t) = 1 - e^{-(\mu t)} \quad (8)$$

Donde,

La disponibilidad está en función de la confiabilidad y de la mantenibilidad. Se calcula con la

$M(t)$  = Mantenibilidad

$e$  = Numero de Euler (2,718)

$\mu$  = Constante tasa de reparación

$t$  = El MTTR es el tiempo promedio para reparar un componente cuando falla.

ecuación siguiente:

$$D = \frac{R(t)}{M(t)} \quad (9)$$

Donde,

$R(t)$  = Confiabilidad

$M(t)$  = Mantenibilidad

La expresión matemática la criticidad total de riesgo está dada por la siguiente manera:

$$CTR = FF \times C \quad (10)$$

Donde

$CTR$  = Criticidad Total por Riesgo

$FF$  = Frecuencia de fallos

$C$  = Consecuencia de los eventos de falla

El valor de las consecuencias se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$C = IO + FO + CM + SHA$$

Donde

$IO$  = Factor de impacto en la producción.

$FO$  = Factor de flexibilidad operacional.

$CM$  = Factor de costos de mantenimiento.

$SHA$  = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente.

(11)

La expresión final del modelo CTR es:

$$CTR = FF \times (IO + FO + CM + SHA) \quad (12)$$

## Resultados y Discusión

### Resultados de la determinación de los actores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles

La confiabilidad de los equipos de bombeo es de suma importancia para garantizar un suministro de agua seguro y continuo. Varios factores pueden influir en la confiabilidad de estos equipos.

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

En la Tabla 3, se presentan algunos factores que inciden en la confiabilidad de los equipos objeto de estudio, mismos que se determinan a partir del fallo funcional, modo de falla y los efectos de la falla, que se producen en el sistema de bombeo; la baja confiabilidad de los equipos es a causa de: problemas eléctricos, falta de ejecución de un plan de mantenimiento, ausencia de equipos y herramientas, falta de kit de repuesto de bomba y los agentes externos como exceso de arena durante de invierno y falta de fluido en temporada de verano; estos factores reducen la vida útil del equipo y no permiten que las bombas operen con normalidad incluso llegan a quedar fuera de funcionamiento, provocando que se reduzca la capacidad operativa del sistema de bombeo.

Tabla 3. Descripción de los factores que inciden en la Confiabilidad

Item	Factor	Descripción
1	Calidad del agua	La calidad del agua que se bombea puede tener un impacto en la confiabilidad de las bombas. El agua con altos niveles de sólidos suspendidos, sedimentos o contenido químico corrosivo puede acelerar el desgaste de las partes de la bomba y reducir su vida útil.
2	Diseño adecuado	El diseño del sistema de bombeo debe ser adecuado para la aplicación. Esto incluye la selección de bombas con la capacidad y la presión adecuadas para cumplir con los requisitos de la demanda de agua.
3	Mantenimiento preventivo	La falta de mantenimiento preventivo regular es una de las principales causas de fallas en las bombas. Las actividades de mantenimiento, como la lubricación, la inspección de piezas y la limpieza, deben llevarse a cabo de acuerdo con un programa planificado.
4	Monitoreo y control	La falta de sistemas de monitoreo y control en tiempo real puede llevar a una detección tardía de problemas en las bombas. La implementación de sistemas de monitoreo puede ayudar a identificar anomalías y prevenir fallas costosas
5	Capacitación del personal	El personal encargado de operar y mantener las bombas debe estar adecuadamente capacitado en la operación segura y el mantenimiento de los equipos. La falta de capacitación puede dar lugar a errores que afectan la confiabilidad.
6	Piezas de repuesto	Mantener un inventario de piezas de repuesto críticas es esencial. Esto puede ayudar a reducir el tiempo de inactividad en caso de una falla

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

---

		inesperada, ya que las piezas de repuesto pueden instalarse rápidamente.
7	Entorno de operación	Las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y la exposición a productos químicos, pueden afectar la confiabilidad de las bombas. Las bombas deben estar protegidas y ubicadas en un entorno adecuado para prolongar su vida útil.
8	Detección de cavitación	La cavitación es un fenómeno en el que se forman burbujas de vapor en el interior de la bomba debido a presiones y velocidades del agua inadecuadas. Esto puede dañar las partes de la bomba y reducir la eficiencia. La detección temprana y la mitigación de la cavitación son importantes para mantener la confiabilidad.
9	Redundancia	En sistemas críticos, la instalación de bombas de respaldo o redundantes puede garantizar el suministro de agua incluso en caso de falla de una bomba principal
10	Planificación de contingencia	Tener un plan de contingencia en caso de interrupciones en el suministro de agua o fallas en las bombas es importante para garantizar la continuidad del servicio.

---

*Nota. Elaboración propia*

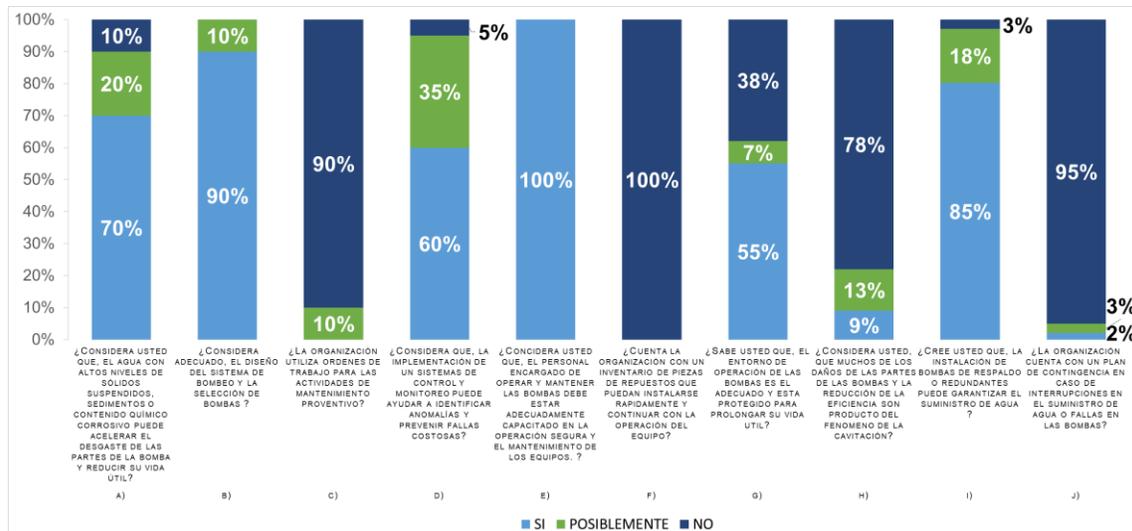
Los resultados representados en la Figura 5, revelan los valores obtenidos de la encuesta realizada a los operadores y personal de mantenimiento de la EPMAPSE, donde los ítems de la encuesta para delimitar tales aspectos, se direccionaron a los factores que afectan la confiabilidad de las bombas sumergibles, se obtuvo varias respuestas afirmativas que, alrededor del 70% de los consultados consideran que la calidad del agua afecta la confiabilidad, el 90% para el diseño adecuado, 60% para monitoreo y control, 100% de los encuestados requieren de capacitación, el 55% para el entorno de operación y un 85% considera beneficioso que la instalación de bomba de remplazo (redundancia) puede garantizar el suministro de agua.

Lo contrario ocurre para las ordenes de trabajo, marcado por el 90% de las opiniones, el 100% considera que en la organización no existen piezas de repuestos, un 78% manifiestan que los daños en las bombas no son por cavitación y un 95% indica que no existe plan de contingencia.

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

Por tanto, mantener la confiabilidad de los equipos de bombeo de captación de agua, implica una combinación de diseño adecuado, mantenimiento preventivo, monitoreo constante y gestión eficiente. Esto es esencial para garantizar un suministro de agua seguro y continuo para la comunidad.

Figura 5. Valores de encuesta



Nota. Elaboración propia

### Resultados de la determinación de la criticidad de las bombas sumergibles

Los elementos de la Bomba sumergible y la posición de cada factor de acuerdo a la escala determinada se muestra en la tabla 4; en el caso de la frecuencia se evalúan las fallas en una escala de 1 al 4 y para el caso de las consecuencias se dividen en 4 factores, que son impacto operacional que van en la escala del 1 al 10, el impacto por flexibilidad que van de la escala del 1 al 4, el impacto de los costos de mantenimiento que van en una escala del 1 al 2 y el ingreso en seguridad, higiene y medio ambiente que va de escala del 1 al 8.

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

Tabla 4. Determinación de factor de Criticidad

ITEM	FACTORES	FACTOR DE FRECUENCIA		FACTORES DE CONSECUENCIAS																
		FALLAS (FF)		IMPACTO OPERACIONAL (IO)			IMPACTO POR FLEXIBILIDAD OPERACIONAL (FO)			IMPACTO EN COSTO DE MANTENIMIENTO (CM)		IMPACTO EN SEGURIDAD, HIGIENE Y AMBIENTE (SHA)								
		Numero de eventos (Escala 1-4)		(Escala 1 - 10)			(Escala 1 - 4)			(Escala 1 - 2)		(Escala 1 - 8)								
		4: Frecuente: mayor a 2 eventos al año	3: Promedio: 1 y 2 eventos al año	2: Bueno: entre 0,5 y 1 evento al año	1: Excelente: menos de 0,5 eventos al año	10: Pérdidas de producción superiores	7: Pérdidas de producción entre el 50%	5: Pérdidas de producción entre el 25%	3: Pérdidas de producción entre el 10%	1: Pérdidas de producción menor al	4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de	2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el	1: Se cuenta con unidades de reserva en	2: Costos de reparación, materiales y mano de obra superiores a USD 2.000,00	1: Costos de reparación, materiales y mano de obra inferiores a USD	8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor	6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o	3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afectación a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental	1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afectación a la salud ambiental	
<b>A</b>	<b>Elementos de bomba Sumergible</b>																			
1	impulsor	1				1					1				1					1
2	placa base			1						1	1				1					1
3	Doble carcasa en la voluta a partir de DN 400				1		1				1				1					1
4	juntas mecánicas	1					1				1				1					1
5	eje acero inoxidable			1	1						1				1					1
6	rodamientos robustos	1					1				1				1					1
<b>B</b>	<b>Motor</b>																			
7	Aislamiento de clase H (140 °C / 284 °F)		1							1	1				1					1
8	Factor de servicio hasta 1,3,		1						1		1				1					1
9	Versatilidad en cables	1					1				1				1					1
10	Cable apantallado	1						1			1				1					1
11	Detector de humedad DI en cámara de junta incluido y suministro estándar	1								1	1				1					1
12	Sonda de protección térmica en el	1					1				1				1					1

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

	estator incluida en suministro estándar																		
13	sistema de refrigeración	1				1				1				1					1
C	Agentes externos																		
15	Compuerta	1						1		1				1					1
16	Rejilla	1						1	1				1						1
17	Polipasto				1			1	1					1					1
18	Transformador				1	1				1				1				1	

Nota. Elaboración propia a partir de datos de EPMAPSE (2022).

Los resultados mostrados en la tabla 5, evidencian que los elementos críticos de las bombas sumergibles son: el sistema de refrigeración, el impulsor, los rodamientos, la versatilidad de cables y los rodamientos, en ese orden. Estos resultados nos permiten definir las prioridades de mantenimiento para cada elemento de la bomba.

Tabla 5. Análisis de Criticidad

TEM	EQUIPO	CALCULO DE CONSECUENCIA	FF	CRITICIDAD TOTAL	CONDICIÓN DE CRITICIDAD CR >50 50 > SCR >30 NCR <30	ITEM	ELEMENTOS ORDENADOS DE MAYOR A MENOR DE ACUERDO AL CALCULO DE CRITICIDAD Y AL RANGO EN EL QUE SE ENCUENTRA		
							LISTA JERARQUIZADA		
1	Impulsor	17	4	68	CRITICO	1	Sistema de refrigeración	72	CR
2	Placa base	7	1	7	NO CRITICO	2	Impulsor	68	CR
3	Doble carcasa en la voluta a partir de DN 400	14	1	14	NO CRITICO	3	Rodamientos robustos	56	CR
4	Juntas mecánicas	13	4	52	CRITICO	4	Versatilidad en cables	56	CR
5	Eje acero inoxidable	17	1	17	NO CRITICO	5	Juntas mecánicas	52	CR
6	Rodamientos robustos	14	4	56	CRITICO	6	Sonda de protección térmica en el estator incluida en suministro estándar	48	SCR
7	Aislamiento de clase H (140 °C / 284 °F)	8	3	24	NO CRITICO	7	Cable apantallado	40	SCR
8	Factor de servicio hasta 1.3,	9	3	27	NO CRITICO	8	Compuerta	36	SCR
9	Versatilidad en cables	14	4	56	CIRITCO	9	Rejilla	32	SCR

## Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

10	Cable apantallado	10	4	40	SEMICRITICO	10	Detector de humedad DI en cámara de junta incluido y suministro estándar	28	NCR
11	Detector de humedad DI en cámara de junta incluido y suministro estándar	7	4	28	NO CRITICO	11	Factor de servicio hasta 1.3,	27	NCR
12	Sonda de protección térmica en el estator incluida en suministro estándar	12	4	48	SEMICRITICO	12	Aislamiento de clase H (140 °C / 284 °F)	24	NCR
13	Sistema de refrigeración	18	4	72	CRITICO	13	Transformador	22	NCR
14	Compuerta	9	4	36	SEMICRITICO	14	Eje acero inoxidable	17	NCR
15	Rejilla	8	4	32	SEMICRITICO	15	Doble carcasa en la voluta a partir de DN 400	14	NCR
16	Polipasto	7	1	7	NO CRITICO	16	Placa base	7	NCR
17	Transformador	22	1	22	NO CRITICO	17	Polipasto	7	NCR

*Nota. Elaboración propia a partir de datos de EPMAPSE (2022).*

### Resultados del a determinación de los indicadores de Mantenimiento

Los datos analizados comprenden la ocurrencia de la falla y su reparación de las bombas sumergibles de la planta de captación. Los registros de fallas comprenden desde el 1 de enero de 2022 al 31 de diciembre de 2023. No están discriminados, los tiempos de reparaciones por componentes.

Con los reportes de instalación y desinstalación de las bombas sumergibles; en la Tabla 6 se exponen, los tiempos de operación de los sistemas sumergibles correspondiente a 24 eventos o tiempos hasta el fallo, este tiempo es la diferencia entre la fecha en la cual dejo de operar la bomba sumergible y la fecha de arranque de la bomba luego de la instalación en el pozo.

*Tabla 6. Tiempos de operación de los sistemas sumergibles*

Nombre de Bomba	Tiempo hasta el fallo (días)				
S1	107	85	119	89	37
S2	5	95	54	221	
S3	78	33	105	59	61
S4	23	208	137	234	47
S5	92	102	59	164	70

*Nota. Elaboración propia a partir de datos de EPMAPSE (2023).*

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

Cabe mencionar que, en la EPMAPSE los operadores (personal cualificado), realizan la inspección diaria de los equipos en funcionamiento y al momento de presentarse una falla, se procede a informar para que se realice el respectivo trabajo. El estado de las diferentes condiciones de funcionamiento del sistema debe ser especificado en la bitácora, así como los cambios en la configuración o la posición del sistema y sus componentes durante las diferentes fases operativas.

Los requerimientos operativos mínimos exigidos del sistema son definidos de tal manera que los criterios de éxito o fracaso puedan ser claramente entendidos. Tales requisitos específicos como la disponibilidad y la seguridad deben ser considerados en términos de los niveles mínimos especificados de rendimiento que deben alcanzarse y los niveles máximos de daño o perjuicio para ser aceptado.

### Resultados de la determinación de los indicadores de mantenimiento

En la tabla 7 se muestran los valores obtenidos del tiempo entre fallos (TBF), tiempos fuera de operación o tiempos de reparación (TTR), el MTBF y el MTTR, (es preciso manifestar, que el último tiempo no se suma puesto que es al final del periodo y no un fallo), estos resultados permiten indicar que el tiempo de reparación es muy extenso, mientras que los tiempos entre fallos son cortos, además se debe tomar acciones inmediatas para reducir los fallos y el tiempo de reparación de esta manera el funcionamiento del equipo se prolonga.

Tabla 7. Resultados de la determinación de los indicadores MTBF y MTTR

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S1	EQUIPO ENTRA EN OPERACIÓN			TBF		TTR		MTBF	MTTR	
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	Fecha	Hora	Días	Horas	Horas	Días	Horas			
1	5/1/2023	10:30:00	Fallo en el motor	1/2/2023	11:00:00	5,00	1,71	121,71	27,00	0,21	648,21		
2	7/5/2023	14:00:00	Ingreso de trozo de madera en el impulsor	25/5/2023	13:00:00	95,00	1,54	2281,54	18,00	0,37	432,37		
3	20/8/2023	9:00:00	Fuerte ruido en Rodamientos	5/9/2023	10:00:00	87,00	1,25	2089,25	16,00	1,33	385,33		
4	24/10/2023	15:00:00	Fallo en junta mecánica	7/11/2023	9:00:00	49,00	-1,44	1174,56	14,00	-4,00	332,00		
5	15/12/2023	20:00:00	Ajuste de Tornillo del Impulsor	31/12/2023	11:00:00	38,00	-2,00	910,00	16,00	1,03	385,03		
<b>TOTAL</b>								<b>6577,06</b>		<b>2182,94</b>		<b>1315,41</b>	<b>436,59</b>

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S2	EQUIPO ENTRA EN OPERACIÓN			TBF		TTR		MTBF	MTTR
--------------------------	--	--	------------	---------------------------	--	--	-----	--	-----	--	------	------

## Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	Fecha	Hora	Días	Horas	Horas	Días	Horas	Horas	
1	3/2/2023	12:30:00	Fuerte Ruido en Bomba	18/2/2023	11:00:00	33,00	-1,90	790,10	15,00	1,68	361,68	
2	7/6/2023	9:00:00	Aumento de temperatura en tablero Eléctrico	22/8/2023	13:00:00	109,00	2,00	2618,00	76,00	2,67	1826,67	
3	19/10/2023	10:00:00	Cambio de Rodamientos	29/12/2023	15:00:00	58,00	-1,19	1390,81	71,00	3,68	1707,68	
4	1/1/2024	0:00:00	Sin Novedad	1/1/2024	0:00:00	3,00	-6,94	65,06	0,00	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>								<b>4863,97</b>		<b>3896,03</b>	<b>1621,32</b>	<b>1298,68</b>

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S3	EQUIPO ENTRA EN OPERACIÓN			TBF		TTR		MTBF	MTTR
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	Fecha	Hora	Días	Horas	Horas	Días	Horas	Horas	
1	26/1/2023	12:30:00	Se apaga la Bomba	27/2/2023	15:00:00	25,00	1,1	601,10	32,00	1,11	769,11	
2	11/3/2023	9:00:00	Fallo en Junta Mecánica	20/4/2023	11:00:00	12,00	0,27	288,27	40,00	1,14	961,14	
3	5/5/2023	10:00:00	Fuerte ruido de la Bomba	5/6/2023	13:30:00	15,00	2,03	362,03	31,00	1,25	745,25	
4	17/8/2023	13:00:00	Elementos extraños que obstruyen la succión de la bomba	2/9/2023	15:00:00	73,00	0,10	1752,10	16,00	2,00	386,00	
5	1/1/2024	0:00:00	Sin Novedad	1/1/2024	0:00:00	121,00	-9,00	2895,00	0,00	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>								<b>5898,50</b>		<b>2861,50</b>	<b>1474,63</b>	<b>715,38</b>

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S4	EQUIPO ENTRA EN OPERACIÓN			TBF		TTR		MTBF	MTTR
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	Fecha	Hora	Días	Horas	Horas	Días	Horas	Horas	
1	9/2/2023	10:30:00	Fallo en Junta Mecánica	21/2/2023	10:00:00	39,00	-3,49	932,51	12,00	1,45	289,45	
2	21/4/2023	14:00:00	Reducción de Caudal	1/5/2023	13:30:00	59,00	1,25	1417,25	10,00	-2,71	237,29	
3	14/12/2023	9:00:00	Falla en el Motor	30/12/2023	14:00:00	227,00	-3,23	5444,77	16,00	4,50	388,50	
4	1/1/2024	0:00:00	Sin novedad	1/1/2024	0:00:00	2,00	2,23	50,23	0,00	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>								<b>7844,76</b>		<b>915,24</b>	<b>2614,92</b>	<b>305,08</b>

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S5	EQUIPO ENTRA EN OPERACIÓN			TBF		TTR		MTBF	MTTR
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	Fecha	Hora	Días	Horas	Horas	Días	Horas	Horas	
1	15/3/2023	9:30:00	Fallo en el motor	15/4/2023	15:00:00	73,00	1,71	1753,71	31,00	0,18	744,18	
2	21/5/2023	11:30:00	Problema de voltaje, contactores.	3/6/2023	14:30:00	36,00	-2,00	862,00	13,00	-1,00	311,00	
3	11/7/2023	15:00:00	Desgaste de Impulsor	21/9/2023	11:00:00	38,00	1,21	913,21	72,00	1,13	1729,13	
4	12/10/2023	20:00:00	Aumento de temperatura en tablero eléctrico	27/10/2023	19:00:00	21,00	-2,32	501,68	15,00	1,37	361,37	
5	13/11/2023	22:00:00	Elementos extraños que obstruyen la succión de la bomba	28/12/2023	17:00:00	17,00	0,11	408,11	45,00	1,06	1081,06	
6	1/1/2024	0:00:00	Sin novedad	1/1/2024	0:00:00	4,00	-1,45	94,55	0,00	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>								<b>3614,21</b>		<b>2821,67</b>	<b>906,65</b>	<b>845,35</b>

Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

TOTAL	4533,26	4226,74
-------	---------	---------

*Nota. Elaboración propia a partir de datos de EPMAPSE (2023).*

**Resultados de la determinación de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad**

En la tabla 8, se muestran los valores de CMD en porcentaje de las bombas sumergibles: siendo la bomba S5 la que tiene la menor confiabilidad y mantenibilidad con datos de 44,02% y 58,53% respectivamente, con mayor confiabilidad la bomba S4 con el 75,24%, la mayor mantenibilidad es para la bomba S2 con el 95,02%, mientras que la disponibilidad mayor es para la bomba S3 con el 93,39% y la menor es para la bomba S2 con un valor de 66,51%; estos resultados nos permite manifestar, que se debe aumentar el tiempo de operación (MTBF) de los equipos y reducir el tiempo de reparación (MTTR) para que los equipos tenga mayor disponibilidad.

*Tabla 8. Cálculo de los parámetros CMD*

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S1	Taza de fallas	Taza de Reparación	CONFIABILIDAD	MANTENIBILIDAD	DISPONIBILIDAD
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	$\lambda=1/MTBF$	$\mu=1/MTTR$	$R(t) = e^{-\lambda t}$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$	$D=(R(t))/(M(t))$
1	5/1/2023	10:30:00	Fallo en el motor					
2	7/5/2023	14:00:00	Ingreso de trozo de madera en el impulsor					
3	20/8/2023	9:00:00	Fuerte ruido en Rodamientos	0,00076	0,00229	56,80%	81,81%	69,43%
4	24/10/2023	15:00:00	Fallo en junta mecánica					
5	15/11/2023	20:00:00	Ajuste de Tornillo del Impulsor					

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S2	Taza de fallas	Taza de Reparación	CONFIABILIDAD	MANTENIBILIDAD	DISPONIBILIDAD
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	$\lambda=1/MTBF$	$\mu=1/MTTR$	$R(t) = e^{-\lambda t}$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$	$D=(R(t))/(M(t))$
1	3/2/2023	12:30:00	Fuerte Ruido en Bomba					
2	7/6/2023	9:00:00	Aumento de temperatura en tablero Eléctrico	0,00062	0,00077	63,20%	95,02%	66,51%
3	19/10/2023	10:00:00	Cambio de Rodamientos					
4	1/1/2024	0:00:00	Sin Novedad					

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S3	Taza de fallas	Taza de Reparación	CONFIABILIDAD	MANTENIBILIDAD	DISPONIBILIDAD
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	$\lambda=1/MTBF$	$\mu=1/MTTR$	$R(t) = e^{-\lambda t}$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$	$D=(R(t))/(M(t))$

## Determinación de los factores que inciden en la confiabilidad de las bombas sumergibles de EPMAPSE

1	26/1/2023	12:30:00	Se apaga la Bomba					
2	11/3/2023	9:00:00	Fallo en Junta Mecánica					
3	5/5/2023	10:00:00	Fuerte ruido de la Bomba	0,00068	0,00140	60,38%	64,66%	93,39%
4	17/8/2023	13:00:00	Elementos extraños que obstruyen la succión de la bomba					
5	1/1/2024	0:00:00	Sin Novedad					

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S4	Taza de fallas	Taza de Reparación	CONFIABILIDAD	MANTENIBILIDAD	DISPONIBILIDAD
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	$\lambda=1/MTBF$	$\mu=1/MTTR$	$R(t) = e^{-\lambda t}$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$	$D=(R(t)) / (M(t))$
1	9/2/2023	10:30:00	Fallo en Junta Mecánica					
2	21/4/2023	14:00:00	Reducción de Caudal	0,00038	0,00328	75,24%	91,27%	82,43%
3	14/12/2023	9:00:00	Falla en el Motor					
4	1/1/2024	0:00:00	Sin novedad					

EQUIPO SALE DE OPERACIÓN			EQUIPO: S5	Taza de fallas	Taza de Reparación	CONFIABILIDAD	MANTENIBILIDAD	DISPONIBILIDAD
ITEM	Fecha	Hora	Causa de Paro Modos de Fallo	$\lambda=1/MTBF$	$\mu=1/MTTR$	$R(t) = e^{-\lambda t}$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$	$D=(R(t)) / (M(t))$
1	15/3/2023	9:30:00	Fallo en el motor					
2	21/5/2023	11:30:00	Problema de voltaje, contactores.					
3	11/7/2023	15:00:00	Desgaste de Impulsor					
4	12/10/2023	20:00:00	Aumento de temperatura en tablero eléctrico	0,00110	0,00118	44,02%	58,53%	75,21%
5	13/11/2023	22:00:00	Elementos extraños que obstruyen la succión de la bomba					
6	1/1/2024	0:00:00	Sin novedad					

*Nota. Elaboración propia a partir de datos de EPMAPSE (2023).*

## Conclusiones

Los factores que representan el 20% de las causas que inciden en el 80% de los efectos que disminuyen la confiabilidad de las bombas electro sumergibles (BES) de la EPMAPSE calidad del agua, son: la calidad del agua de bombeo; la capacitación del personal encargado de la planificación, control y ejecución de las actividades de mantenimiento; el diseño adecuado de la bombas empleadas; la falta de instalación de bombas de respaldo o redundantes en casos de fallas de las bombas principales, la disponibilidad de piezas de repuesto y la planificación de contingencias en el suministro de agua o fallas en las bombas.

Los elementos críticos de las bombas electro sumergibles (BES) son: el sistema de refrigeración (CR 72); el impulsor (CR 68); los rodamientos robustos (CR 56); la versatilidad en cables (CR 56) y las juntas mecánicas (CR 52).

La confiabilidad de las bombas electro sumergibles (BES) de la EPMAPSE oscila entre un 44,02 a 75,24 % y una mantenibilidad del 58,53 a 95,02 % respectivamente, resultados que son un indicador de la necesidad de aumentar el tiempo de operación (MTBF) de los equipos y reducir el tiempo de reparación (MTTR), en función de aumentar la disponibilidad.

## Referencias

1. Abernethy, R. B. (2019). The New Weibull Handbook-R.B. Abernethy. Pdfcoffee.Com. <https://pdfcoffee.com/robert-b-abernethy-the-new-weibull-handbook-rb-abernethy-2006-4-pdf-free.html>
2. Acuña Ojeda, E. A., & Vargas Neyra, R. W. (2019). Mantenimiento basado en confiabilidad y su influencia en la disponibilidad de los equipos de una planta concentradora. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6032>
3. Andrade-Solórzano, C. L., & Herrera-Suárez, M. (2021). Análisis de la situación actual del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación. ISSN: 2737-6249., 4(8), Article 8. <https://doi.org/10.46296/ig.v4i8.0021>
4. Arata Panduro, P. H., & De la Cruz Tornero, F. G. (2022). “Mantenimiento centrado en la confiabilidad para incrementar la disponibilidad en equipos críticos en una planta de producción de harina y aceite de pescado—Callao—2021”. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6860>
5. Castro Condori, P. C. (2021). Implementación de un plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad de bombas sumergibles Empresa EICM Engineering Group, Arequipa-2021. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75863>
6. Cordero, O., & Estupiñan, E. (2018). Propuesta de optimización del mantenimiento de planta minera de cobre ministro hales, mediante análisis de confiabilidad, utilizando la metodología FMECA. Investigación & Desarrollo, 18(1), 129-142.

7. Deshpande, V. S., & Modak, J. P. (2002). Application of RCM for safety considerations in a steel plant. *Reliability Engineering & System Safety*, 78(3), 325-334. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00177-1](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00177-1)
8. Díaz-Concepción, A., Muñoz-González, E., Alfonso-Álvarez, A., González- González, A., López-Martínez, I., Rodríguez-Soto, Á. A. (2021). Análisis de la confiabilidad de procesos en una empresa biofarmacéutica. *Ingeniería Mecánica*, 24(2), 12-18.
9. Ding, Y., Cheng, L., Zhang, Y., & Xue, Y. (2014). Operational reliability evaluation of restructured power systems with wind power penetration utilizing reliability network equivalent and time-sequential simulation approaches. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2(4), 329-340. <https://doi.org/10.1007/s40565-014-0077-8>
10. Dodson, B., & Nolan, D. (2002). *Reliability engineering handbook*. CRC, Taylor & Francis; Quality Publishing.
11. Fernández-Bujarrabal, P., & Andrés, A. (2018). Diseño y optimización de estación de bombeo. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/28492>
12. Fraser, K., Hvolby, H. H., & Watanabe, C. (2011). A review of the three most popular maintenance systems: How well is the energy sector represented? *International Journal of Global Energy Issues*, 35(2/3/4), 287. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2011.045024>
13. Gertsbakh, I. (2000). Preventive Maintenance Based on Parameter Control. En I. Gertsbakh (Ed.), *Reliability Theory: With Applications to Preventive Maintenance* (pp. 107-137). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04236-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04236-6_5)
14. Huanes Carranza, Y. J. H. (2018). Metodología para la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en sistemas de bombeo de aguas subterráneas de agroindustrial DANPER S.A.C. [Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/905bc0ad-b472-4fb4-9882-dea7855f9f45/content>
15. Huerta, M. A. F. (2018). Maestría en ciencia y tecnología en ingeniería industrial y de manufactura [Corporación mexicana de investigación en materiales]. <https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/35/1/Tesis%20Marco%20Fuentes-SIN.pdf>
16. Jones, I. A., Van Oyen, M. P., Lavieri, M. S., Andrews, C. A., & Stein, J. D. (2021). Predicting rapid progression phases in glaucoma using a soft voting ensemble classifier exploiting

- Kalman filtering. *Health Care Management Science*, 24(4), 686-701.  
<https://doi.org/10.1007/s10729-021-09564-2>
17. Knezevic, J. (1996). *Mantenibilidad*. ISDEFE. <https://www.iberlibro.com/Mantenibilidad-Knezevic-Jezdimir-Isdefe/31585722802/bd>
18. Martínez, M. C. (2019). *Análisis de confiabilidad operacional en la red de transmisión PDVSA oriente distrito PLC* [Thesis, Universidad Central de Venezuela].  
<http://saber.ucv.ve/handle/10872/12951>
19. McKenna, T., & Oliverson, R. (1997). *Glossary of Reliability and Maintenance Terms*. Gulf Professional Publishing.
20. Miño Ormazá, M. P. (2015). *Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) de un motor de combustión interna WARTSILA 18V32LNGD*.  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4400>
21. Modarres, M., Kaminskiy, M. P., & Krivtsov, V. (2016). *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide, Third Edition (3.a ed.)*. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781315382425>
22. Mora Gutierrez, L. A. (2019). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. (Primera). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.  
[https://www.academia.edu/36972344/Mantenimiento\\_Alberto\\_Mora\\_Guti%C3%A9rez\\_FR\\_EELIBROS\\_ORG](https://www.academia.edu/36972344/Mantenimiento_Alberto_Mora_Guti%C3%A9rez_FR_EELIBROS_ORG)
23. Morales Méndez, J. D., & Rodríguez, R. S. (2017). Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: A case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1-4), 1013-1026. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0052-4>
24. Moubray, J. (1997). *Reliability-centered Maintenance*. Industrial Press Inc.
25. Parra Marquez, C., & Crespo Marquez, A. (2019). *Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21197.87524>
26. Paulino Romero, J. M., & Becerra Arévalo, G. (2021). *El análisis de confiabilidad como herramienta para optimizar la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación en un centro minero*. Repositorio Institucional - UNI.  
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3496688>

27. Pinos Guillén, G. M. (2016). Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad a los equipos críticos de la planta de tratamiento de agua potable Sustag de Etapa Ep. [masterThesis, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6192>
28. Ramakumar, R. (1993). Engineering reliability: Fundamentals and applications. Prentice Hall. <http://books.google.com/books?id=QHIRAAAAMAAJ>
29. Ramos Valencia, G. F. (2018). Modelo de confiabilidad para sistemas de levantamiento artificial con bombas eléctrico sumergibles del Campo Shushufindi Bloque 57. <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/8428>
30. Reyes, Á. (2019). Estudio de la Confiabilidad  $R(t)$ , Función de Riesgo  $\lambda(t)$  y Fase de Vida de Bombas Electro-Sumergibles que Operan en Estaciones de Aguas Servidas.
31. Rivero Diaz, A. E. (2020). Implementación de plan de mantenimiento en bombas centrífugas verticales para aumentar su vida útil, en proyecto de gran minería, Arequipa 2019. Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8538>
32. Rodríguez Tapia, F. F. (2018). Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad mediante la aplicación de la distribución de Weibull. Estudio de caso separadoras de aceite Westfalia de la empresa Agip Oil Ecuador. [masterThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/8739>
33. Rosales Velasquez, R. I. S. (2018). Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos del área lavadero salinas de la empresa DELISHELL S.A.C. Universidad San Pedro. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/8266>
34. Salguero Herrera, A. D. (2022). Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para una industria química alimenticia en la ciudad de Guayaquil [Tesis, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22435/1/UPS-GT003688.pdf>
35. Sánchez Zambrano, C. A. (2015). Análisis de confiabilidad de un sistema de generación de vapor de 60 BHP. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3246>
36. Sawhney, R., Martinis, P., & Murthi, V. (2004). A simulation based approach for determining maintenance strategies. 7, 32-41.
37. Soltanali, H., Rohani, A., Tabasizadeh, M., Abbaspour-Fard, M. H., & Parida, A. (2020). Operational reliability evaluation-based maintenance planning for automotive production

- line. *Quality Technology & Quantitative Management*, 17(2), 186-202.  
<https://doi.org/10.1080/16843703.2019.1567664>
38. Soto Ortega, M. V. (2018). Propuesta de implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), de los activos críticos de la unidad n°1 de la Central Térmica El Descanso [masterThesis, Universidad del Azuay].  
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8378>
39. Stephens, M. A. (1974). EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, 69(347), 730-737.  
<https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10480196>
40. Valladares Cruzado, J. R. (2020). Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a bombas de carga en una refinería. <https://hdl.handle.net/11042/4479>
41. Vargas Alvarez, M. B., & Isuiza Pinedo, J. J. (2020). Factores que Influyen en el deficiente servicio de agua potable y la solución en el distrito de Shamboyacu—Provincia de Picota – Región San Martín. Repositorio - UNSM. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3969>
42. Zavaleta De la Cruz, C. (2021). Plan de mantenimiento preventivo en los motores Mercedes Benz basado en análisis de aceite para mejorar la disponibilidad en los buses de la Empresa Nuevo California. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/74438>
43. Zvolensky, P., Stuchly, V., Grecik, J., & Poprocky, R. (2014). Evolution of Maintenance Systems of Passenger and Freight Wagons from the ECM Certification Point of View. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 16(3A), 40-47.  
<https://doi.org/10.26552/com.C.2014.3A.40-47>