UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE FALLAS EN LA PLANTA DE BOMBEO NO. 5 DEL SISTEMA CUTZAMALA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE REGISTROS HISTÓRICOS Y LA METODOLOGÍA AMEF-VDA, COMO BASE PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

REPORTE DE APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS QUE COMO TRÁMITE PARA LA EVALUACIÓN PROFESIONAL DE LA CARRERA DE INGENIERO AGRÓNOMO INDUSTRIAL, PRESENTA:

MISAEL SÁNCHEZ VELAZQUEZ
(14ª GENERACIÓN, NO. DE CUENTA:0643263)

ASESORES
DR. OMAR ROBERTO VARGAS FLORES
DRA. MARÍA DOLORES MARIEZCURRENA BERASAIN

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO. OCTUBRE, 2026

Índice

Contenido

I. Resumen 9

Abstract 10

II. Definición y caracterización del problema, y su relación con el plan de estudios cursado 11

2.1 El Sistema Cutzamala 11

2.2 Agua potable en el Valle de México 13

2.3 El Sistema Cutzamala como infraestructura estratégica 16

2.4 Fallas en sistemas de bombeo 17

2.5 Mantenimiento predictivo y monitoreo de condición 17

2.6 Modelos de predicción de fallas 18

2.7 Vacíos de investigación 19

2.8 Relación del problema con el plan de estudios cursado (IAI, 2015) 19

III. Análisis de alternativas previas de solución 22

3.1. Análisis de alternativas de solución 23

1) Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) con FMEA/FMECA 23

2) Sistema de monitoreo en línea con sensores de vibración, temperatura y corriente 24

3) Detección de anomalías con aprendizaje no supervisado o semisupervisado 25

4) Predicción de vida útil remanente (RUL) de componentes críticos 26

5) Gemelo digital y “soft sensors” para la estación de bombeo 28

6) Optimización conjunta de mantenimiento, operación y costo del ciclo de vida 28

IV. Solución propuesta o implementada 30

4.1 Zona de estudio 31

4.2 Unidad de análisis 32

4.4 Fuentes de información y recopilación de datos 33
4.5 Aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF-VDA).....38
4.5.1 Análisis de estructura 38
4.5.2 Análisis funcional 40
4.5.3 Análisis de modos de falla 41
4.5.4 Análisis de riesgo.....43
4.5.5 Optimización 44
4.5.5.1 Implementación de una alarma visual 45
4.5.5.2 Programa de revisión periódica 46
4.5.5.3 Modificación del programa de operación 46
4.5.5.4 Sustitución de la bobina de cierre.....47
4.5.5.5 Implementación de evidencia fotográfica.....47
4.6 Desarrollo de la propuesta metodológica como base para el mantenimiento predictivo 48
4.7 Consideraciones éticas y limitaciones.....49

V. Evaluación de la solución.....50
5.1 Resultados del análisis de los registros históricos 50
5.2 Modos de falla críticos identificados 51
5.3 Evaluación del riesgo mediante AMEF-VDA.....51
5.4 Evaluación de las acciones de mejora.....53
5.5 Discusión de los resultados 54

VI. Conclusiones y sugerencias.....55
6.1 Conclusiones 55
6.2 Sugerencias.....56

VII. Fuentes bibliográficas consultadas.....57

Índice de figuras

Figura 1. Croquis del Sistema Cutzamala. 11
Figura 2. Planta de Bombeo No. 5, Sistema Cutzamala 12
Figura 3. Tandeos y abastecimiento mediante pipas. 14
Figura 4, Presas del Sistema Cutzamala 16
Figura 5. Bombas centrífugas del Sistema Cutzamala..... 17
Figura 6. Análisis de vibraciones y la medición de temperatura..... 18
Figura 7. Modelos interpretables y robustos de fallas del Cutzamala. 19
Figura 8. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) apoyado en el análisis FMEA/FMECA. 24
Figura 9. Sistema de monitoreo en línea mediante sensores de vibración, temperatura y corriente..... 25
Figura 10. Detección de anomalías mediante técnicas de aprendizaje no supervisado y semisupervisado 26
Figura 11. Esquema conceptual para la predicción de la vida útil remanente (Remaining Useful Life, RUL) de componentes críticos. 27
Figura 12. Esquema conceptual de un gemelo digital (Digital Twin) aplicado a sistemas de bombeo..... 28
Figura 13. Optimización conjunta del mantenimiento, la operación y el costo del ciclo de vida de los equipos..... 29
Figura 14. Vista interior de los equipos de bombeo de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala..... 30
Figura 15. Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala. 31
Figura 16. Propuesta metodológica para la identificación y priorización de fallas como base para el mantenimiento predictivo en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala. 48

Índice de cuadros

Cuadro 1. Unidades de Aprendizaje relacionadas con la propuesta “Desarrollo de una propuesta metodológica para la identificación y priorización de fallas en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala mediante el análisis de registros históricos y la metodología 20
Cuadro 2. Variables operativas y de condición consideradas para una etapa posterior de mantenimiento predictivo 33
Cuadro 3. Principales tipos de eventos de falla identificados en la muestra analizada 34
Cuadro 4. Modos de falla asociados al arranque bloqueado 35
Cuadro 5. Modos de falla asociados al arranque negativo..... 36
Cuadro 6. Modos de falla asociados al paro normal no programado 36
Cuadro 7. Modos de falla asociados al paro de emergencia..... 37
Cuadro 8. Estructura jerárquica del proceso de bombeo de agua potable para el desarrollo del AMEF-VDA 39
Cuadro 9. Equivalencia de códigos utilizados para identificar los elementos de trabajo..... 39
Cuadro 10. Análisis funcional del proceso de bombeo de agua potable de la Planta de Bombeo No. 5 mediante la metodología AMEF-VDA. 40
Cuadro 11. Análisis de modos de falla del proceso de bombeo de agua potable de la Planta de Bombeo No. 5 mediante la metodología AMEF-VDA..... 41
Cuadro 12. Análisis de riesgo de los modos de falla mediante la metodología AMEF-VDA 43
Cuadro 13. Acciones de optimización propuestas para los modos de falla prioritarios 44
Cuadro 14. Distribución de eventos de falla identificados 50
Cuadro 15. Modos de falla críticos identificados durante el periodo de estudio 51
Cuadro 16. Evaluación del riesgo de los principales modos de falla mediante AMEF-VDA..... 52
Cuadro 17. Acciones de mejora propuestas para los principales modos de falla..... 53

I. Resumen

El presente Reporte de Aplicación de Conocimientos tuvo como objetivo desarrollar una propuesta metodológica para la identificación y priorización de fallas en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala, mediante el análisis de registros históricos de operación correspondientes al periodo 2021–2025 y la aplicación de la metodología AMEF-VDA, como base para fortalecer las estrategias de mantenimiento predictivo. Se revisó un universo aproximado de 5 000 turnos de operación y se seleccionaron 359 registros con información suficiente para el análisis. De ellos, 274 presentaron eventos de falla y 85 correspondieron a operación sin incidentes. Los eventos se clasificaron en arranque bloqueado, arranque negativo, paro normal no programado y paro de emergencia. Posteriormente se identificaron los modos de falla de mayor frecuencia y se aplicó el AMEF de Proceso conforme al enfoque AIAG-VDA, considerando análisis de estructura, análisis funcional, modos de falla, severidad, ocurrencia, detección y Prioridad de Acción. El arranque negativo presentó la mayor frecuencia, y el modo No retro del interruptor 52MX (NRI) fue el evento individual más recurrente. Los modos prioritarios se asociaron principalmente con sistemas de lubricación, control eléctrico, vibración, nivel hidráulico y mecanismos de protección. A partir del análisis se formularon acciones de mejora orientadas a fortalecer la prevención y detección temprana. Debido a que los registros disponibles no incluyen series continuas de variables de condición, la propuesta no constituye un modelo predictivo validado, sino una base metodológica para la incorporación futura de vibración, temperatura, presión, caudal, consumo energético y horas de operación en sistemas de mantenimiento basado en condición.

Abstract

This Applied Knowledge Report aimed to develop a methodological proposal for identifying and prioritizing failures at Pumping Plant No. 5 of the Cutzamala System through the analysis of historical operating records from 2021–2025 and the application of the AIAG-VDA FMEA methodology, as a basis for strengthening predictive maintenance strategies. An approximate universe of 5,000 operating shifts was reviewed, from which 359 records containing sufficient information were selected. Of these, 274 included failure events and 85 corresponded to incident-free operation. Events were classified as blocked start, unsuccessful start, unplanned normal shutdown, and emergency shutdown. The most frequent failure modes were then identified and a Process FMEA was applied, including structure analysis, function analysis, failure mode analysis, severity, occurrence, detection, and Action Priority. Unsuccessful start was the most frequent event category, while failure to receive feedback from the 52MX circuit breaker (NRI) was the most recurrent individual failure mode. Priority modes were mainly associated with lubrication systems, electrical control, vibration, hydraulic level, and protection mechanisms. Improvement actions were proposed to strengthen prevention and early detection. Because the available records do not include continuous condition-variable time series, the proposal should not be interpreted as a validated predictive model, but rather as a methodological basis for the future incorporation of vibration, temperature, pressure, flow rate, energy consumption, and operating-hour data into condition-based maintenance systems.

II. Definición y caracterización del problema, y su relación con el plan de estudios cursado.

2.1 El Sistema Cutzamala

El Sistema Cutzamala constituye uno de los principales sistemas de abastecimiento de agua potable de México, ya que suministra entre el 25 y el 30 % del agua consumida en la Zona Metropolitana del Valle de México (CONAGUA, 2023; UNAM, 2024). El sistema está conformado por un conjunto de presas, acueductos y seis plantas de bombeo que permiten transportar el agua a lo largo de más de 160 km y vencer un desnivel cercano a los 1 100 m. Estas condiciones demandan un elevado consumo energético y someten a los equipos electromecánicos a una operación continua y de alta exigencia, favoreciendo procesos de desgaste que requieren estrategias de mantenimiento orientadas a garantizar la confiabilidad operativa del sistema (CONAGUA, 2023).

Como se observa en la Figura 1, el Sistema Cutzamala está conformado por un conjunto de presas, acueductos y seis plantas de bombeo que permiten transportar el agua a lo largo de más de 160 km y vencer un desnivel cercano a los 1 100 m. Estas características convierten al sistema en una de las infraestructuras hidráulicas más complejas del país y explican la elevada exigencia operativa a la que están sometidos sus equipos electromecánicos.



Figura 1. Croquis del Sistema Cutzamala.

Fuente: CONAGUA, adaptado por Sarumo74 (2010).

Tradicionalmente, la gestión del mantenimiento en infraestructuras hidráulicas de gran escala se ha basado en estrategias de mantenimiento correctivo y preventivo programado. Si bien estos enfoques continúan siendo ampliamente utilizados, presentan limitaciones cuando los equipos operan bajo condiciones variables y de elevada exigencia, como ocurre en las estaciones de bombeo del Sistema Cutzamala (Mobley, 2002). En este contexto, el mantenimiento predictivo surge como una alternativa que permite anticipar fallas mediante el análisis de variables operativas y de condición, tales como vibración, temperatura y consumo energético (Jardine, Lin y Banjevic, 2006).



Figura 2. Planta de Bombeo No. 5, Sistema Cutzamala

Fuente: Instituto de Ingeniería, UNAM (2021).

Por lo anterior, el presente trabajo plantea una solución aplicada orientada a sistematizar la identificación y priorización de los modos de falla de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala, a partir de registros históricos de operación y de la metodología AMEF-VDA. El alcance se concentra en establecer una base técnica para fortalecer la gestión del mantenimiento y para orientar una etapa posterior de monitoreo de condición y mantenimiento predictivo.

Derivado de lo anterior el objetivo general del presente trabajo fue **“**Desarrollar una propuesta metodológica para la identificación y priorización de los modos de falla de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala, mediante el análisis de registros históricos de operación

correspondientes al periodo 2021–2025 y la aplicación de la metodología AMEF-VDA, como base para el fortalecimiento de las estrategias de mantenimiento predictivo". De igual forma los específicos se describen a continuación

• Identificar y caracterizar los principales eventos y modos de falla registrados en la operación de la Planta de Bombeo No. 5 durante el periodo 2021–2025.

• Evaluar y priorizar los modos de falla seleccionados mediante la metodología AMEF-VDA, considerando sus causas, efectos, severidad, ocurrencia, capacidad de detección y Prioridad de Acción.

• Formular acciones de prevención, detección y mejora para los modos de falla prioritarios, con base en los resultados del análisis de riesgo.

• Establecer las variables operativas y de condición que deberán incorporarse en etapas posteriores para el desarrollo de herramientas de mantenimiento predictivo en la planta.

2.2 Agua potable en el Valle de México

El abastecimiento de agua potable constituye uno de los principales retos de gestión pública y técnica en la Zona Metropolitana del Valle de México, una de las regiones urbanas con mayor densidad poblacional del país. La creciente demanda de agua, el envejecimiento de la infraestructura hidráulica y los periodos recurrentes de sequía incrementan la presión sobre los sistemas de abastecimiento, particularmente sobre el Sistema Cutzamala, cuya operación resulta fundamental para garantizar el suministro continuo de agua potable (CONAGUA, 2023; UNAM, 2024).

Diversos reportes oficiales han documentado que las interrupciones o reducciones en el suministro de agua provenientes del Sistema Cutzamala obligan a la implementación de medidas emergentes, como tandeos, reducción de presión y abastecimiento mediante pipas.

Como se muestra en la Figura 3, estas acciones buscan mitigar temporalmente los efectos de las contingencias en el suministro; sin embargo, generan afectaciones directas a la población y costos adicionales para las autoridades (CONAGUA, 2023). Estas situaciones ponen de

manifiesto la necesidad de fortalecer la confiabilidad operativa del sistema, particularmente en sus componentes críticos, como las plantas de bombeo.



Figura 3. Tandeos y abastecimiento mediante pipas.

Fuente: [medio/fotógrafo original de la imagen].

Dentro del Sistema Cutzamala, las plantas de bombeo representan los componentes de mayor complejidad técnica y consumo energético, debido a que el transporte del agua requiere vencer desniveles cercanos a los 1 100 m mediante equipos electromecánicos de gran capacidad (CONAGUA, 2023). En particular, la Planta de Bombeo No. 5 se localiza en uno de los tramos de mayor exigencia hidráulica del sistema y, de acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua, cuenta con nueve conjuntos de bombeo; seis de ellos tienen una capacidad aproximada de 4 000 L/s y tres una capacidad aproximada de 1 700 L/s. Estas condiciones de operación incrementan el desgaste de los equipos y elevan la probabilidad de fallas mecánicas, eléctricas e hidráulicas, así como de paros no programados que pueden afectar la continuidad del abastecimiento de agua potable (UNAM, 2024).

Tradicionalmente, la gestión del mantenimiento en infraestructuras hidráulicas de gran escala se ha basado en esquemas correctivos y preventivos, los cuales, si bien permiten atender fallas una vez ocurridas o realizar intervenciones programadas, presentan limitaciones importantes cuando los equipos operan bajo condiciones variables y de alta exigencia (Mobley, 2002). En este sentido, el mantenimiento correctivo suele implicar altos costos, tiempos prolongados de inactividad y riesgos asociados a la operación de emergencia;

mientras que el mantenimiento preventivo basado únicamente en intervalos de tiempo puede resultar ineficiente si no se consideran las condiciones reales de operación.

El mantenimiento predictivo constituye una estrategia que permite anticipar fallas mediante el análisis de variables operativas y de condición, como vibración, temperatura, consumo energético y comportamiento hidráulico (Jardine *et al.,* 2006). A diferencia del mantenimiento basado únicamente en intervalos de tiempo, este enfoque utiliza información proveniente de la operación de los equipos para detectar oportunamente condiciones anómalas y programar intervenciones antes de que ocurran fallas críticas. En sistemas industriales complejos, esta estrategia ha demostrado mejorar la confiabilidad operativa, reducir la frecuencia de paros no programados y optimizar el uso de los recursos destinados al mantenimiento (Mobley, 2002).

Desde el punto de vista técnico, la propuesta de un modelo para la predicción de fallas en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala permitiría fortalecer la toma de decisiones en materia de mantenimiento, al priorizar equipos y componentes críticos con base en información operativa y registros históricos, en lugar de depender exclusivamente de programas de mantenimiento establecidos por tiempo de servicio. Asimismo, contribuiría a prolongar la vida útil de los equipos electromecánicos, reducir los costos asociados a reparaciones de emergencia y mejorar la eficiencia operativa del sistema (Jardine *et al.,* 2006).

Desde el ámbito académico, el presente trabajo resulta pertinente porque integra conocimientos de ingeniería hidráulica, mantenimiento industrial y análisis de datos aplicados a una infraestructura estratégica para el abastecimiento de agua potable en México. Su desarrollo permite fortalecer las competencias técnicas y analíticas del estudiante en la identificación y solución de problemas complejos, en concordancia con el perfil de egreso del Ingeniero Agrónomo Industrial de la Universidad Autónoma del Estado de México. Asimismo, contribuye a la generación de conocimiento aplicado sobre la gestión y confiabilidad de sistemas de abastecimiento de agua, tema de creciente importancia para el desarrollo sostenible del país (UNAM, 2024).

Finalmente, desde una perspectiva social y ambiental, el fortalecimiento de la confiabilidad

operativa del Sistema Cutzamala mediante estrategias orientadas a la predicción de fallas contribuiría a disminuir el riesgo de interrupciones en el suministro de agua potable y, con ello, favorecer el acceso continuo a este recurso por parte de la población. En este contexto, la presente investigación se justifica por su aportación técnica, académica y social, al proponer una herramienta que podría apoyar la gestión del mantenimiento de una infraestructura estratégica para el abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana del Valle de México.

2.3 El Sistema Cutzamala como infraestructura estratégica

El Sistema Cutzamala ha sido ampliamente documentado como una de las obras hidráulicas más complejas de América Latina debido a su extensión, capacidad instalada y relevancia para el abastecimiento de agua potable del Valle de México (CONAGUA, 2023). Como se muestra en la Figura 4, el sistema está conformado por presas de almacenamiento, acueductos y plantas de bombeo que operan de manera interdependiente; por ello, una falla en cualquiera de sus componentes puede afectar el desempeño global del sistema (UNAM, 2024). Esta condición resalta la importancia de implementar estrategias de mantenimiento que contribuyan a garantizar su continuidad operativa.



Figura 4, Presas del Sistema Cutzamala.

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2025).

Diversos autores señalan que las plantas de bombeo representan los componentes de mayor

vulnerabilidad del Sistema Cutzamala, debido a la concentración de equipos electromecánicos sometidos a operación continua y condiciones de elevada exigencia (UNAM, 2024). En consecuencia, resulta indispensable fortalecer las estrategias de mantenimiento y gestión del riesgo operativo con el propósito de incrementar la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

2.4 Fallas en sistemas de bombeo

Las bombas centrífugas de gran capacidad son ampliamente utilizadas en sistemas de abastecimiento de agua. Como se observa en la Figura 5, estos equipos constituyen uno de los principales elementos de impulsión dentro del Sistema Cutzamala; sin embargo, presentan diversos modos de falla asociados al desgaste de rodamientos, desalineación, cavitación, desequilibrio y sobrecargas eléctricas (Mobley, 2002). Estas fallas generalmente se desarrollan de manera progresiva, lo que permite identificar señales tempranas antes de que ocurra una falla catastrófica.



Figura 5. Bombas centrífugas del Sistema Cutzamala.

Fuente: La Octava (2021).

Mobley (2002) señala que una proporción importante de las fallas en maquinaria rotativa podría prevenirse mediante la implementación de técnicas adecuadas de monitoreo de condición, ya que los equipos suelen presentar síntomas detectables antes de un evento catastrófico.

2.5 Mantenimiento predictivo y monitoreo de condición

El mantenimiento predictivo se basa en el análisis de datos reales de operación para estimar el estado de salud de los equipos y predecir la probabilidad de falla en un horizonte temporal

determinado (Jardine *et al.,* 2006). Este enfoque contrasta con el mantenimiento preventivo tradicional, al incorporar información dinámica y contextual.

Entre las técnicas más utilizadas para el monitoreo de condición en maquinaria rotativa se encuentran el análisis de vibraciones y la medición de temperatura. Como se muestra en la Figura 6, estas herramientas permiten identificar patrones anómalos asociados a fallas incipientes y cuentan con respaldo de normas internacionales (ISO, 2009), proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en materia de mantenimiento.



Figura 6. Análisis de vibraciones y la medición de temperatura.

Fuente: Elaboración propia con base en Mobley (2002) y Jardine et al. (2006).

En el presente trabajo se propone partir de un modelo conceptual sustentado en el análisis de variables operativas y registros históricos, con la finalidad de establecer una base para el desarrollo de herramientas predictivas aplicables a la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala.

2.6 Modelos de predicción de fallas

Jardine *et al*. (2006) destacan que la integración de datos históricos de mantenimiento con variables operativas posibilita el desarrollo de modelos predictivos, que pueden ir desde enfoques estadísticos simples hasta modelos más avanzados de clasificación y pronóstico. La elección del modelo depende de la disponibilidad y calidad de los datos, así como del objetivo del análisis.

En sistemas críticos como el Cutzamala, diversos autores recomiendan comenzar con

modelos interpretables y robustos, que permitan comprender la relación entre variables y fallas, antes de avanzar hacia enfoques más complejos (Mobley, 2002).

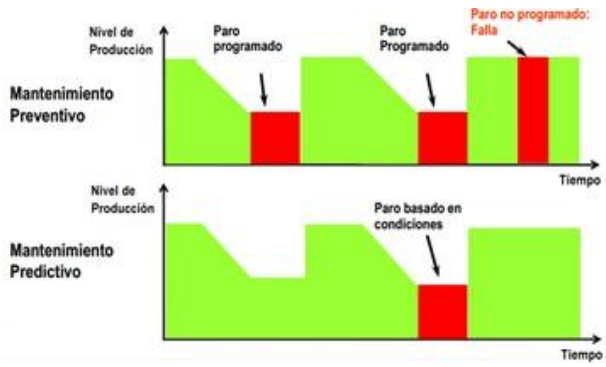

Figura 7. Modelos interpretables y robustos de fallas del Cutzamala.

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura.

2.7 Vacíos de investigación

A pesar de la abundante literatura sobre mantenimiento predictivo en sistemas industriales, existe una limitada cantidad de estudios aplicados específicamente a plantas de bombeo del Sistema Cutzamala. La mayoría de los reportes disponibles son de carácter técnico-institucional y no profundizan en propuestas metodológicas de predicción de fallas (UNAM, 2024). Lo anterior evidencia la pertinencia de desarrollar investigaciones aplicadas que contribuyan al diseño de metodologías orientadas a la predicción de fallas en infraestructuras hidráulicas estratégicas como la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala.

2.8 Relación del problema con el plan de estudios cursado (IAI, 2015)

Para satisfacer la necesidad expuesta, el plan de estudios de la Licenciatura de Ingeniero Agrónomo Industrial 2015, de la Facultad de Ciencias Agrícolas, de la UAEMex proporcionó las herramientas mediante diferentes Unidades de Aprendizaje. A continuación, en el Cuadro 1, se

exponen las principales Unidades de Aprendizaje que tienen relación con el trabajo expuesto.

Cuadro 1. Unidades de Aprendizaje relacionadas con la propuesta “Desarrollo de una propuesta metodológica para la identificación y priorización de fallas en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala mediante el análisis de registros históricos y la metodología

Unidad de Aprendizaje	Relación del plan de estudios con el tema de investigación propuesto
Matemáticas Aplicadas	Se encuentra estrechamente vinculado con las matemáticas aplicadas, ya que requiere el uso de herramientas estadísticas, modelos probabilísticos, algoritmos de aprendizaje automático y métodos de optimización para analizar variables operativas y datos históricos. A través de estos enfoques, es posible identificar patrones de comportamiento, estimar la probabilidad de falla de los equipos de bombeo y generar modelos predictivos que apoyen la toma de decisiones en mantenimiento y operación. En consecuencia, las matemáticas aplicadas constituyen el fundamento teórico y metodológico que permite transformar datos en información útil para mejorar la confiabilidad del sistema y, por ende, contribuir al abastecimiento eficiente de agua potable en la Ciudad de México.
Fisicoquímica y termodinámica	Se encuentra estrechamente relacionado con la Físicoquímica y la Termodinámica, ya que el funcionamiento de los sistemas de bombeo depende de principios fundamentales como la conservación de la energía, las propiedades de los fluidos y los procesos de transferencia y disipación de energía. A través de estos enfoques, es posible comprender fenómenos como la cavitación, la pérdida de eficiencia energética y la degradación de materiales, los cuales influyen directamente en el desempeño y la vida útil de los equipos. En este sentido, el análisis de variables operativas como presión, temperatura y caudal no solo permite la construcción de modelos predictivos, sino también la interpretación física de las causas de falla, lo que fortalece la toma de decisiones para mejorar la confiabilidad del sistema y garantizar el abastecimiento de agua potable.
Ingeniería de procesos	El desarrollo de una propuesta se encuentra estrechamente relacionado con la Ingeniería de Procesos, ya que implica el análisis, control y optimización de un sistema hidráulico continuo de gran escala. A través del estudio de variables operativas como

	presión, caudal, temperatura y consumo energético, es posible monitorear el desempeño del proceso, identificar desviaciones y anticipar fallas en los equipos de bombeo. En este contexto, la implementación de modelos predictivos permite mejorar la toma de decisiones, reducir interrupciones operativas y optimizar el mantenimiento, contribuyendo así a la eficiencia y confiabilidad del sistema de abastecimiento de agua potable. De esta manera, la Ingeniería de Procesos proporciona el enfoque metodológico necesario para integrar datos, operación y mejora continua en sistemas complejos.
Ingeniería Eléctrica y Mecánica	Se encuentra estrechamente vinculado con la Ingeniería Eléctrica y Mecánica, debido a que los sistemas de bombeo están conformados por equipos electromecánicos cuya operación depende de la interacción entre componentes eléctricos y mecánicos. El análisis de variables como corriente, voltaje, vibración, temperatura y consumo energético permite identificar patrones de comportamiento y detectar condiciones anómalas asociadas a fallas incipientes. En este sentido, la integración de principios eléctricos y mecánicos en la propuesta metodológica para el desarrollo de un modelo predictivo fortalece la capacidad de diagnóstico y anticipación de fallas, contribuyendo a la mejora de la eficiencia, confiabilidad y continuidad operativa del sistema de abastecimiento de agua potable.
Operaciones Unitarias	Se encuentra estrechamente vinculado con la asignatura de Operaciones Unitarias, ya que el proceso de bombeo constituye una operación fundamental de transporte de fluidos en la que se transfiere energía para movilizar agua a través de un sistema hidráulico. El análisis de variables como caudal, presión, pérdidas de carga y eficiencia permite evaluar el desempeño del sistema e identificar condiciones de operación fuera de diseño que pueden derivar en fallas. En este contexto, la implementación de modelos predictivos facilita la detección temprana de anomalías, contribuyendo a la optimización del proceso, la reducción de riesgos operativos y la mejora en la continuidad del abastecimiento de agua potable.
Sistemas de Tratamientos de Aguas	Se encuentra estrechamente relacionado con la asignatura de Sistemas de Tratamiento de Aguas, ya que el bombeo constituye una etapa fundamental dentro del sistema integral de abastecimiento de agua potable. La continuidad y eficiencia de

	esta operación son esenciales para garantizar el flujo adecuado hacia las plantas de tratamiento y, por ende, la calidad y disponibilidad del agua distribuida a la población. En este contexto, la implementación de modelos predictivos permite anticipar fallas, reducir interrupciones operativas y asegurar condiciones hidráulicas óptimas, contribuyendo así a la eficiencia, sostenibilidad y seguridad del sistema de suministro de agua potable.

Fuente: Elaboración propia con base en Universidad Autónoma del Estado de México (2015).

El presente Reporte de Aplicación de Conocimientos se vincula con el Plan de Estudios 2015 de la Licenciatura de Ingeniero Agrónomo Industrial de la Universidad Autónoma del Estado de México, particularmente con las áreas de ingeniería de procesos, matemáticas aplicadas, fenómenos de transporte, electricidad industrial, tratamiento de agua y mejora de procesos.

El Plan de Estudios 2015 orienta la formación del Ingeniero Agrónomo Industrial hacia la participación en proyectos que favorezcan la competitividad y eficiencia de las actividades agroindustriales, el análisis y optimización de procesos y la solución de problemas mediante herramientas de ingeniería, investigación y gestión. Esta orientación sustenta la pertinencia académica de aplicar conocimientos de análisis de procesos, confiabilidad y mantenimiento a una infraestructura de bombeo de alta complejidad.

La relación con el programa educativo se concreta en la capacidad de integrar conocimientos de matemáticas, física, termodinámica, operaciones unitarias, electricidad y tratamiento de agua para caracterizar un problema técnico, analizar información operativa y formular una propuesta de mejora sistemática.

De manera complementaria, la formación en planeación, organización y mejora continua permite valorar las acciones propuestas desde una perspectiva de operación y mantenimiento, vinculando el análisis técnico con la toma de decisiones y la continuidad del servicio.

III. Análisis de alternativas previas de solución.

Además de la propuesta basada en registros históricos y AMEF-VDA para identificar y priorizar fallas, existen alternativas que podrían complementar y fortalecer la gestión del mantenimiento en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala. De acuerdo con la información técnica utilizada en este trabajo, la planta cuenta con nueve conjuntos de bombeo: seis de mayor capacidad, cercanos a 4 000 L s^{-1}, y tres de menor capacidad, cercanos a 1 700 L s^{-1}. En un sistema con estas características resulta necesario priorizar componentes críticos, fortalecer el monitoreo de condición, estimar la degradación de los equipos e integrar la información operativa para mejorar la toma de decisiones.

3.1. Análisis de alternativas de solución

1) Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) con FMEA/FMECA

Una de las alternativas más sólidas para fortalecer la gestión del mantenimiento en la Planta de Bombeo No. 5 consiste en implementar un programa de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability Centered Maintenance, RCM), apoyado en herramientas como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA/FMECA). Como se muestra en la Figura 8, este enfoque parte del análisis de las funciones críticas del sistema para identificar los modos de falla, sus causas, sus efectos sobre la operación del bombeo y su nivel de criticidad operacional.

La literatura especializada señala que la implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) contribuye a incrementar la seguridad operacional, reducir los costos de mantenimiento y mejorar la disponibilidad de los equipos, al enfocar las estrategias de intervención en las funciones críticas del sistema y en las consecuencias de los diferentes modos de falla. Asimismo, este enfoque permite desarrollar programas de mantenimiento dinámicos, capaces de actualizarse conforme cambian las condiciones de operación de la infraestructura.

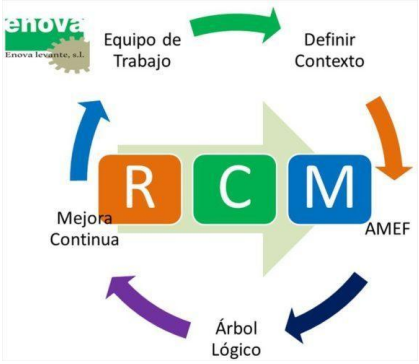

Figura 8. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) apoyado en el análisis FMEA/FMECA.

Fuente: Elaboración propia con base en literatura de RCM y AIAG-VDA (2019).

La implementación de este enfoque podría complementar la metodología desarrollada al incorporar criterios de confiabilidad y criticidad para la toma de decisiones en mantenimiento. De esta manera, además de identificar los modos de falla recurrentes, sería posible definir qué componentes requieren mayor prioridad de intervención y qué estrategias podrían generar el mayor beneficio para la continuidad operativa.

2) Sistema de monitoreo en línea con sensores de vibración, temperatura y corriente

Otra alternativa consiste en implementar una arquitectura de monitoreo de condición en tiempo real mediante sensores cableados e inalámbricos capaces de registrar variables como vibración, temperatura, corriente eléctrica, presión y caudal. Como se muestra en la Figura 9, este tipo de sistemas permite supervisar continuamente el estado de los equipos de bombeo y detectar oportunamente cambios asociados a fallas incipientes. Diversos estudios en bombas centrífugas han demostrado que muchas fallas se manifiestan inicialmente mediante variaciones en la vibración y la temperatura, por lo que el empleo de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) facilita la identificación temprana de problemas como desalineación, desgaste de rodamientos, desbalance del impulsor, cavitación y aflojamiento mecánico.

La literatura reciente sobre mantenimiento predictivo de bombas muestra que el monitoreo de vibraciones y otras señales de condición puede apoyar la detección y clasificación de fallas, siempre que exista una estrategia adecuada de adquisición, tratamiento e interpretación de datos (Gonçalves et al., 2021; Hallaji *et al*., 2022). Los sensores inalámbricos pueden facilitar el monitoreo continuo, aunque su selección debe considerar confiabilidad de comunicación, resolución, mantenimiento e integración con la infraestructura existente.



Figura 9. Sistema de monitoreo en línea mediante sensores de vibración, temperatura y corriente.

Fuente: Elaboración propia con base en literatura de monitoreo de condición.

A diferencia de la propuesta basada únicamente en variables operativas y registros históricos, esta alternativa incorpora variables físicas directamente relacionadas con el estado de los equipos, lo que incrementa la sensibilidad para detectar procesos de degradación antes de que las fallas sean evidentes en la operación del sistema. En infraestructura de bombeo, la literatura especializada destaca que el monitoreo continuo de variables como vibración, temperatura y ruido constituye una herramienta eficaz para la detección temprana de anomalías y el fortalecimiento de las estrategias de mantenimiento predictivo. No obstante, su implementación requiere inversiones adicionales en sensores, sistemas de adquisición de datos e infraestructura de comunicación, aspectos que deben considerarse al evaluar su viabilidad técnica y económica.

3) Detección de anomalías con aprendizaje no supervisado o semisupervisado

Cuando la Planta de Bombeo No. 5 no dispone de una base de datos amplia con fallas previamente clasificadas o etiquetadas, una alternativa viable consiste en aplicar técnicas de detección de anomalías en lugar de modelos tradicionales de clasificación. En instalaciones industriales es común disponer de grandes volúmenes de datos correspondientes a condiciones normales de operación, mientras que los registros de falla suelen ser escasos. En este contexto, el entrenamiento de modelos utilizando únicamente datos de funcionamiento normal para identificar desviaciones respecto a ese comportamiento representa una estrategia metodológicamente adecuada para la detección temprana de anomalías.

Cuando los eventos de falla etiquetados son escasos, la detección de anomalías mediante métodos no supervisados o semisupervisados puede complementar el análisis de condición, al modelar el comportamiento normal y señalar desviaciones que requieren evaluación técnica. Su aplicación exige validar los resultados con conocimiento del proceso para evitar confundir cambios operativos normales con condiciones de falla (Hallaji *et al*., 2022).

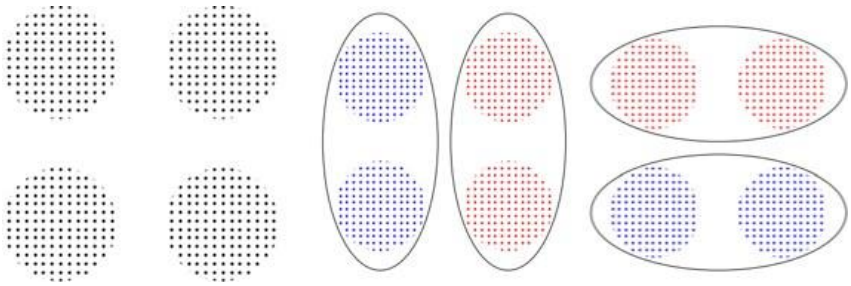

Figura 10. Detección de anomalías mediante técnicas de aprendizaje no supervisado y semisupervisado.

Fuente: Elaboración propia con base en Carrasco et al. y literatura de mantenimiento predictivo.

Esta alternativa resulta especialmente útil cuando los registros históricos contienen un número limitado de fallas documentadas o presentan información insuficiente para diferenciar claramente los distintos tipos de avería. Bajo estas condiciones, el objetivo del modelo deja de ser la clasificación de una falla específica y se orienta hacia la identificación de patrones de comportamiento anómalos que preceden a la pérdida de desempeño del sistema. Desde el punto de vista metodológico, este enfoque constituye una opción sólida para infraestructuras críticas como la Planta de Bombeo No. 5, donde la disponibilidad de datos de operación normal suele ser considerablemente mayor que la correspondiente a eventos de falla. Sin embargo, la correcta interpretación de las anomalías detectadas requiere conocimiento especializado del comportamiento operativo de los equipos, a fin de distinguir entre variaciones normales del proceso y condiciones que realmente representen un riesgo para la operación.

4) Predicción de vida útil remanente (RUL) de componentes críticos

Una alternativa de mayor nivel de desarrollo consiste en estimar la vida útil remanente (Remaining Useful Life, RUL) de los componentes críticos de la Planta de Bombeo No. 5,

particularmente de los rodamientos y demás elementos rotativos. A diferencia de los modelos orientados únicamente a detectar anomalías, este enfoque busca estimar el tiempo de operación restante antes de que un componente alcance una condición de falla, proporcionando información útil para la programación de actividades de mantenimiento y la planificación de la sustitución de componentes.

La estimación de vida útil remanente requiere historiales suficientemente extensos, variables de condición confiables y una caracterización del proceso de degradación. En bombas e infraestructura civil, la literatura de mantenimiento predictivo destaca que los modelos de pronóstico sólo son robustos cuando la calidad, frecuencia y trazabilidad de los datos permiten relacionar la evolución de la condición con eventos de mantenimiento o falla (Hallaji et al., 2022).

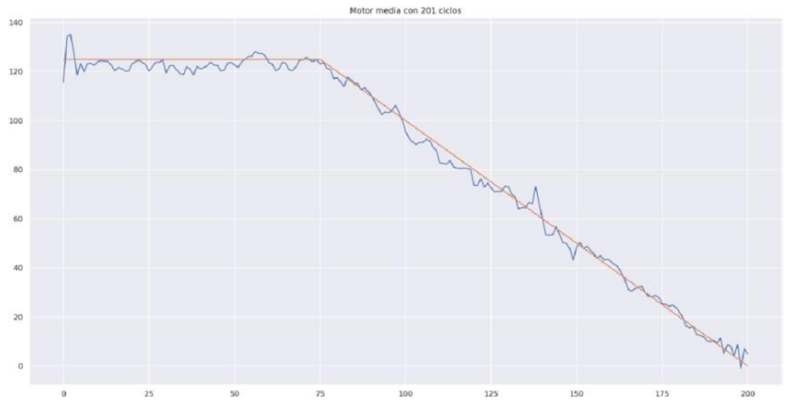

Figura 11. Esquema conceptual para la predicción de la vida útil remanente (Remaining Useful Life, RUL) de componentes críticos.

Fuente: Elaboración propia con base en literatura sobre mantenimiento predictivo/RUL.

La aplicación de esta alternativa proporcionaría una herramienta de mayor utilidad para la gestión del mantenimiento, ya que, además de identificar condiciones de riesgo, permitiría estimar una ventana de tiempo para la intervención de los equipos antes de que ocurra una falla. Esta información facilitaría la programación de paros planificados, la gestión de refacciones, la asignación de personal y la optimización de los recursos destinados al mantenimiento. No obstante, la implementación de modelos de predicción de vida útil remanente requiere bases de datos históricas extensas, información confiable sobre la degradación de los componentes y una adecuada caracterización de los mecanismos de falla,

condiciones que pueden representar una limitación en infraestructuras donde el historial de mantenimiento no se encuentra completamente sistematizado.

5) Gemelo digital y “soft sensors” para la estación de bombeo

Una alternativa de mayor alcance tecnológico consiste en desarrollar un gemelo digital (Digital Twin) para la Planta de Bombeo No. 5, entendido como una representación virtual que integra datos del activo físico y modelos de comportamiento. Existen aplicaciones de gemelos digitales para la estimación en tiempo real de estados de flujo en estaciones de bombeo y, de forma más amplia, para apoyar estrategias de mantenimiento predictivo (He *et al*., 2022; Chen *et al.,* 2023).



Figura 12. Esquema conceptual de un gemelo digital (Digital Twin) aplicado a sistemas de bombeo.

Fuente: Elaboración propia con base en He et al. (2022) y [artículo MDPI, 2024].

La implementación de un gemelo digital permitiría ampliar el alcance de la propuesta al incorporar herramientas de simulación capaces de evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de operación. De esta manera, sería posible analizar escenarios asociados a la disminución de la eficiencia de una bomba, incrementos en los niveles de vibración o la salida de operación de una unidad de bombeo, estimando el impacto de estos eventos sobre la continuidad del abastecimiento de agua potable. No obstante, el desarrollo de un gemelo digital requiere una infraestructura tecnológica robusta, integración de múltiples fuentes de datos y una elevada capacidad de procesamiento, por lo que actualmente representa una alternativa de implementación a mediano o largo plazo para sistemas como la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala.

6) Optimización conjunta de mantenimiento, operación y costo del ciclo de vida

Una sexta alternativa consiste en abordar el problema mediante un modelo de optimización multiobjetivo, cuyo propósito sea minimizar simultáneamente la probabilidad de falla, el costo total del ciclo de vida de los equipos y el impacto de las intervenciones de mantenimiento sobre la continuidad del servicio. Como se muestra en la Figura 13, la literatura reciente en sistemas de bombeo ha desarrollado modelos que, una vez identificados los procesos de degradación, comparan diferentes estrategias de mantenimiento con el fin de minimizar el costo del ciclo de vida (Life Cycle Cost, LCC) y determinar el momento más conveniente para intervenir los equipos.

Este enfoque resulta especialmente útil en infraestructuras donde las fallas no generan el mismo nivel de impacto operativo. En sistemas críticos como la Planta de Bombeo No. 5, la indisponibilidad de un equipo puede ocasionar consecuencias considerablemente mayores que el costo directo de la reparación, debido a las afectaciones que provoca sobre la continuidad del abastecimiento de agua potable. Por ello, la optimización conjunta del mantenimiento y la operación permite establecer prioridades de intervención considerando tanto el estado de los equipos como las implicaciones técnicas, económicas y operativas de cada decisión.

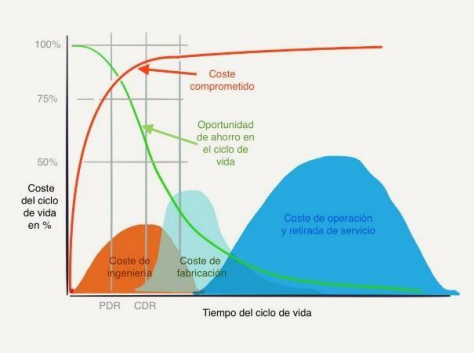

Figura 13. Optimización conjunta del mantenimiento, la operación y el costo del ciclo de vida de los equipos.

Fuente: Hernández, D. / La-Lista (2021).

La aplicación de esta alternativa permitiría integrar criterios de ingeniería, operación y gestión económica para apoyar la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento de los equipos críticos. De esta manera, sería posible justificar técnicamente la prioridad de intervención de determinados activos, considerando no solo su condición mecánica, sino también su influencia

sobre la continuidad del servicio y el costo total asociado a su operación. No obstante, la implementación de este tipo de modelos requiere información confiable sobre costos de mantenimiento, operación, disponibilidad de los equipos y consecuencias de las fallas, aspectos que pueden representar una limitación cuando dichos registros no se encuentran completamente sistematizados.

IV. Solución propuesta o implementada

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado, cuantitativo, no experimental y retrospectivo, con el propósito de formular una metodología para la identificación y priorización de fallas a partir de registros históricos de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala. La investigación es no experimental debido a que no se manipularon deliberadamente las variables de estudio; se analizaron datos existentes bajo condiciones reales de operación (Hernández-Sampieri *et al*., 2014).



Figura 14. Vista interior de los equipos de bombeo de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala.

Fuente: Milenio, con fotografías de la Planta de Bombeo No. 5

Asimismo, el estudio presenta un alcance descriptivo-analítico. En una primera etapa se identificaron y describieron los eventos y modos de falla presentes en los registros históricos; posteriormente se priorizaron los modos seleccionados mediante AMEF-VDA. Las variables operativas y de condición reportadas en la literatura se incorporaron como referentes técnicos para una fase futura de monitoreo, debido a que la base histórica disponible no contiene series completas y continuas de dichas variables.

4.1 Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala, infraestructura estratégica para el abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México y la zona conurbada del Estado de México. El Sistema Cutzamala se localiza en la región centro del país y se extiende a lo largo de más de 160 km, atravesando los estados de Michoacán y Estado de México hasta llegar a la Zona Metropolitana del Valle de México (CONAGUA, 2023).



Figura 15. Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala.

Fuente: Elaboración propia

La Planta de Bombeo No. 5 se localiza aproximadamente a 2 700 m s. n. m. y constituye el punto de mayor elevación del Sistema Cutzamala. A partir de esta estación el agua es conducida por gravedad hacia la Zona Metropolitana del Valle de México. Debido a la magnitud del desnivel que debe vencer el sistema, la planta opera mediante equipos electromecánicos de gran capacidad sometidos a elevadas exigencias hidráulicas, mecánicas y eléctricas. Su funcionamiento continuo resulta indispensable para garantizar los volúmenes de agua requeridos en las etapas posteriores del abastecimiento (UNAM, 2024).

Desde el punto de vista operativo, la Planta de Bombeo No. 5 cuenta con nueve conjuntos de bombeo instalados en una estructura de acero y concreto reforzado. Seis de estos equipos están conformados por motores asíncronos marca Jeumont-Schneider, con rotor tipo jaula de ardilla, una potencia nominal de 7 960 kW (10 670 HP), tensión de alimentación de 13.2 kV y velocidad de operación de 1 195 rpm, acoplados a bombas centrífugas horizontales con capacidad de 4 $m^3 s^{-1}$. Los tres equipos restantes incorporan motores asíncronos de la misma

marca, con potencia de 3 170 kW (4 251 HP), tensión de 4.16 kV y velocidad de 1 788 rpm, acoplados a bombas centrífugas horizontales con capacidad de 1.7 $m^3 s^{-1}$.

En conjunto, estos nueve equipos vencen una carga aproximada de 174 m de columna de agua y reciben alimentación eléctrica mediante una subestación que reduce la tensión de 115 kV a 13.2 kV por medio de tres transformadores de potencia, además de dos transformadores adicionales que suministran energía a los equipos de 4.16 kV. Las condiciones de operación de esta infraestructura implican elevados esfuerzos hidráulicos, mecánicos y eléctricos, por lo que la Planta de Bombeo No. 5 constituye un escenario adecuado para el análisis de fallas y el desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo orientadas a incrementar la confiabilidad del sistema.

4.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde a la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala, considerando como elementos principales de estudio los conjuntos motor–bomba y sus componentes críticos, entre ellos los cojinetes, el sistema hidráulico, el sistema eléctrico y los sistemas auxiliares. Estos equipos fueron seleccionados debido a su relevancia dentro del proceso de bombeo y al impacto que sus fallas pueden generar sobre la continuidad del abastecimiento de agua potable hacia la Ciudad de México y su zona metropolitana (UNAM, 2024).

4.3. Variables de estudio

4.3.1. Variables independientes (operativas y de condición)

De acuerdo con la literatura especializada, las variables operativas que presentan mayor potencial para el desarrollo de modelos de predicción de fallas en sistemas de bombeo incluyen la vibración mecánica, la temperatura de operación, el consumo energético, el caudal, la presión y las horas acumuladas de operación (Mobley, 2002; Jardine *et al.,* 2006). No obstante, para el desarrollo de la presente investigación dichas variables se consideran como referentes para la construcción de la propuesta metodológica, debido a que los registros históricos disponibles no contienen información completa para todas ellas.

Cuadro 2. Variables operativas y de condición consideradas para una etapa posterior de mantenimiento predictivo.

Variable	Unidad de medida	Fundamentación técnica
Vibración mecánica	mm/s o g	Indicador temprano del desgaste y desbalance de componentes rotativos (Mobley, 2002).
Temperatura de rodamientos	°C	Permite identificar sobrecalentamiento, problemas de lubricación y fricción anormal (Mobley, 2002).
Consumo energético	kW, kWh	Refleja variaciones en la carga y eficiencia de operación del equipo (Jardine *et al.,* 2006).
Caudal bombeado	m^3/s	Permite evaluar el desempeño hidráulico del sistema y detectar pérdidas de eficiencia (Jardine *et al.,* 2006).
Presión de operación	MPa o bar	Facilita la identificación de alteraciones hidráulicas durante la operación (Jardine *et al.,* 2006).
Horas acumuladas de operación	h	Se relacionan con el desgaste progresivo y la programación del mantenimiento (Mobley, 2002).

Fuente: Elaboración propia con base en Mobley (2002) y Jardine *et al.* (2006).

4.3.2. Variable dependiente

La variable dependiente corresponde a la ocurrencia de fallas en los equipos de la Planta de Bombeo No. 5, entendida como cualquier evento que origine un paro no programado, una disminución significativa del desempeño operativo o la necesidad de una intervención correctiva no planificada. La identificación de estas fallas se realizó a partir de los registros históricos de operación disponibles para la presente investigación, tomando como referencia los criterios generales de confiabilidad y mantenimiento descritos por Mobley (2002).

4.4 Fuentes de información y recopilación de datos

La información utilizada en la presente investigación se obtuvo a partir de fuentes secundarias relacionadas con la operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala. Entre las principales fuentes de información se consideran los registros históricos de operación de los equipos de bombeo, los reportes técnicos emitidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la información institucional disponible sobre la operación del sistema y la literatura

científica especializada en mantenimiento predictivo, confiabilidad y análisis de fallas (CONAGUA, 2023; UNAM, 2024; Hernández-Sampieri *et al*., 2014).

Como parte del proceso de recopilación de datos se revisó un universo aproximado de 5 000 turnos de operación correspondientes al periodo 2021–2025. Se incluyeron los turnos que contaban con fecha o periodo identificable, condición de operación del equipo y descripción suficiente del evento para clasificar la presencia o ausencia de una falla. Se excluyeron registros duplicados, ilegibles o sin información mínima para identificar la condición operativa. Con estos criterios se integró una muestra documental de 359 turnos. La selección fue no probabilística y estuvo determinada por la disponibilidad y completitud de los registros históricos.

La muestra analizada incluyó 274 turnos con eventos de falla durante las maniobras de arranque u operación continua y 85 turnos en los que la operación se desarrolló sin incidentes. Los registros con falla se clasificaron en cuatro tipos principales: arranque bloqueado, arranque negativo, paro normal no programado y paro de emergencia.

Cuadro 3. Principales tipos de eventos de falla identificados en la muestra analizada

Tipo de evento	**Número de turnos**
Arranque bloqueado	67
Arranque negativo	75
Paro normal no programado	62
Paro de emergencia	70
Operación sin incidentes	85
Total	359

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025).

Los resultados muestran que el mayor número de eventos correspondió al arranque negativo (75 turnos), seguido del paro de emergencia (70 turnos), el arranque bloqueado (67 turnos) y el paro normal no programado (62 turnos). Esta distribución permitió identificar los escenarios

operativos con mayor incidencia de fallas y establecer la base para el análisis detallado de los modos de falla asociados a cada tipo de evento.

Para el caso del arranque bloqueado se identificaron cinco modos de falla principales, cuya frecuencia de ocurrencia se presenta en el Cuadro 4. Estos eventos representan las condiciones que con mayor frecuencia impidieron el arranque adecuado de los equipos de bombeo durante el periodo analizado.

Cuadro 4. Modos de falla asociados al arranque bloqueado

Código	Modo de falla	Frecuencia
BFAC	Bajo flujo de aceite en cojinetes	18
BPAA	Baja presión de aceite en el acumulador	11
F13.8KVB	Falla de 13.8 kV en barras	6
DCFM	Desbalanceo de corriente de fases	14
NRP2	No retroaviso de bomba de aceite P2 operando	18

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025).

Dentro de este tipo de evento destacan el bajo flujo de aceite en cojinetes (BFAC) y el no retroaviso de la bomba de aceite P2 operando (NRP2), ambos con 18 registros, seguidos por el desbalanceo de corriente de fases (DCFM). Estos resultados sugieren que las fallas relacionadas con los sistemas de lubricación y alimentación eléctrica representan factores críticos durante el proceso de arranque de los equipos.

En el arranque negativo se identificaron cuatro modos de falla predominantes, los cuales se presentan en el Cuadro 5. Estos eventos corresponden a situaciones en las que el equipo no logró completar satisfactoriamente la secuencia de arranque debido a diferentes condiciones operativas.

Cuadro 5. Modos de falla asociados al arranque negativo

Código	Modo de falla	Frecuencia
NRI	No retro del interruptor 52MX	29
VMNA	Velocidad máxima no alcanzada	16
AVTB	Alta vibración en el tope de bomba	18
PAET	Presión de aceite en la extremidad de la tubería	12

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025).

El modo de falla con mayor frecuencia fue el no retro del interruptor 52MX (NRI), con 29 registros, seguido por la alta vibración en el tope de bomba (AVTB). La presencia de estos eventos evidencia la importancia de los sistemas de control eléctrico y del monitoreo de vibraciones para mantener la confiabilidad del proceso de arranque.

Los modos de falla asociados al paro normal no programado se presentan en el Cuadro 6. Este tipo de evento comprende aquellas condiciones que provocaron la interrupción de la operación sin que existiera una condición de emergencia.

Cuadro 6. Modos de falla asociados al paro normal no programado

Código	Modo de falla	Frecuencia
FSVE	Falla de sostenimiento de válvula esférica	14
ATD	Alta temperatura en devanados	11
BPAS	Baja presión de aceite en servomotor	4
ATAEA	Alta temperatura de agua de enfriamiento de aceite	13
MBNATS	Muy bajo nivel de agua en tanque de sumergencia	15
FAVD	Fuga de aceite en válvula de descarga	5

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025).

Los resultados muestran que el muy bajo nivel de agua en el tanque de sumergencia (MBNATS)

y la falla de sostenimiento de la válvula esférica (FSVE) fueron los eventos más frecuentes. Asimismo, se identificaron fallas relacionadas con la temperatura de los devanados, el sistema de enfriamiento y la presión de aceite, lo que refleja la interacción entre componentes hidráulicos, mecánicos y eléctricos durante la operación continua de la planta.

Finalmente, los modos de falla correspondientes al paro de emergencia se presentan en el Cuadro 7. Estos eventos representan las condiciones de mayor impacto operativo, debido a que implican la interrupción inmediata del funcionamiento de los equipos de bombeo.

Cuadro 7. Modos de falla asociados al paro de emergencia

Código	**Modo de falla**	**Frecuencia**
ABCE	Apertura de bobina de cierre de emergencia	17
FSVE	Falla de sostenimiento en válvula esférica	15
FPLC	Falla en PLC	11
VMC	Válvula de mariposa cerrada	5
BPAS	Baja presión de aceite en servomotor	18
—	Registros adicionales sujetos a verificación contra la base original	4

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025).

Entre los modos de falla desglosados destacan la baja presión de aceite en el servomotor (BPAS), la apertura de la bobina de cierre de emergencia (ABCE) y la falla de sostenimiento de la válvula esférica (FSVE). Los cinco modos de falla detallados suman 66 registros; la categoría general de paro de emergencia contiene 70, por lo que cuatro registros deben verificarse contra la base original antes de cerrar la versión definitiva. Esta diferencia se conserva de forma explícita para evitar atribuir una clasificación no sustentada por la información disponible en el documento.

4.5 Aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF-VDA)

Una vez identificados y clasificados los principales modos de falla presentes en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5, se aplicó la metodología Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Manual AIAG-VDA (2019). Esta metodología permitió evaluar de manera sistemática los modos de falla identificados, analizar sus posibles causas y efectos, así como establecer la prioridad de las acciones orientadas a reducir el riesgo y mejorar la confiabilidad del proceso de bombeo.

El AMEF de Proceso fue seleccionado debido a que el objeto de estudio corresponde a un proceso operativo y no al diseño de un producto. En este contexto, la metodología se empleó para identificar los componentes críticos del sistema, establecer las relaciones entre funciones, modos de falla y causas potenciales, así como evaluar el nivel de riesgo asociado a cada evento mediante el criterio de Prioridad de Acción (AP), clasificado en niveles alto, medio y bajo, de acuerdo con el Manual AIAG-VDA (2019).

La aplicación del AMEF-VDA se desarrolló de forma secuencial considerando las etapas de análisis de estructura, análisis funcional, análisis de modos de falla, evaluación del riesgo y optimización. Cada una de estas etapas se adaptó a las características operativas de la Planta de Bombeo No. 5 con el propósito de identificar oportunidades de mejora que contribuyan a incrementar la confiabilidad del sistema de bombeo.

4.5.1 Análisis de estructura

El análisis de estructura constituye la primera etapa del AMEF de Proceso y tiene como finalidad definir la organización jerárquica del sistema bajo estudio, identificando el proceso principal, los elementos de enfoque y los elementos de trabajo que intervienen en la operación. En la presente investigación, la estructura se desarrolló considerando el proceso de bombeo de agua potable de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala, diferenciando los subprocesos de arranque y operación continua, así como los principales componentes asociados a cada modo de falla identificado. La estructura jerárquica obtenida se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Estructura jerárquica del proceso de bombeo de agua potable para el desarrollo del AMEF-VDA

Proceso	Subproceso	Modo de falla	Elemento de trabajo
Bombeo de agua potable	Arranque	AB-BFAC	Sistema de lubricación
		AB-NRP2	Bomba de aceite P2
		AN-NRI	Interruptor 52MX
		AN-AVTB	Sensor de vibración
		PNNP-FSVE	Válvula esférica
	Operación continua	PNNP-MBNATS	Tanque de sumergencia
		PE-ABCE	Bobina de cierre de emergencia
		PE-BPAS	Sistema de lubricación

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025) y en la metodología AIAG-VDA (2019).

Cuadro 9. Equivalencia de códigos utilizados para identificar los elementos de trabajo

Código	Elemento de trabajo
SG-G	Sistema de lubricación general
FP2-A	Bomba de aceite P2
BI-R	Interruptor 52MX
SV-R	Sensor de vibración
BA-R	Válvula esférica
SU-N	Tanque de sumergencia
BCE-R	Bobina de cierre de emergencia
STL-P	Sistema de lubricación

Nota: Códigos utilizados durante el desarrollo del AMEF para identificar los elementos de trabajo correspondientes a la Planta de Bombeo No. 5.

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025) y en la metodología AIAG-VDA (2019).

La estructura jerárquica permitió identificar la relación entre el proceso de bombeo, los subprocesos analizados y los elementos de trabajo asociados a cada modo de falla. Esta

organización constituyó la base para el desarrollo del análisis funcional, en el cual se definieron las funciones que debe cumplir cada uno de los elementos considerados en el estudio.

4.5.2 Análisis funcional

El análisis funcional constituye la segunda etapa del AMEF de Proceso y tiene como propósito identificar las funciones que deben cumplir el proceso, los elementos de enfoque y los elementos de trabajo definidos durante el análisis de estructura. Esta etapa permite establecer la relación entre las funciones esperadas de cada elemento y los requisitos necesarios para garantizar el correcto funcionamiento del proceso de bombeo de agua potable. En la presente investigación, el análisis funcional se desarrolló considerando los subprocesos de arranque y operación continua de la Planta de Bombeo No. 5, así como las funciones específicas de los elementos de trabajo asociados a los modos de falla identificados. Los resultados se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Análisis funcional del proceso de bombeo de agua potable de la Planta de Bombeo No. 5 mediante la metodología AMEF-VDA.

Subproceso	Función del subproceso	Elemento de trabajo	Función
Arranque	Bombear agua potable conforme al programa de CONAGUA	Sistema de lubricación	Garantizar un flujo de 8 L/min de aceite para la lubricación y enfriamiento de los cojinetes.
		Bomba de aceite P2	Suministrar aceite a los cojinetes antes del arranque del motor.
		Interruptor 52MX	Confirmar mediante señal eléctrica que el motor principal se encuentra energizado.
		Sensor de vibración	Detectar el desplazamiento axial del eje del motor y de la bomba.
Operación continua	Mantener el bombeo continuo	Válvula esférica	Mantener abierta la válvula mediante presión hidráulica.
		Tanque de sumergencia	Proporcionar información del nivel de agua disponible.
		Bobina de cierre	Accionar el cierre de emergencia

Subproceso	Función del subproceso	Elemento de trabajo	Función
		de emergencia	cuando sea requerido.
		Sistema de lubricación	Mantener la presión y estanqueidad del circuito hidráulico.

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología AIAG-VDA (2019) y en la información técnica de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala.

El análisis funcional permitió identificar las funciones que debe cumplir cada elemento de trabajo para garantizar el correcto funcionamiento del proceso de bombeo de agua potable. La definición de estas funciones constituyó la base para identificar los posibles modos de falla, sus causas y efectos potenciales, así como para establecer la relación entre dichos elementos durante la evaluación del riesgo mediante la metodología AMEF-VDA.

4.5.3 Análisis de modos de falla

El análisis de modos de falla constituye la tercera etapa del AMEF de Proceso y tiene como finalidad identificar las posibles desviaciones que pueden impedir el cumplimiento de las funciones definidas para cada elemento de trabajo. En esta etapa se establecieron las relaciones entre el modo de falla, sus causas potenciales y los efectos que pueden generar sobre el proceso de bombeo de agua potable, permitiendo comprender cómo una falla en un componente puede afectar el desempeño global de la Planta de Bombeo No. 5. Los resultados del análisis se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Análisis de modos de falla del proceso de bombeo de agua potable de la Planta de Bombeo No. 5 mediante la metodología AMEF-VDA.

Subproceso	Función	Modo de falla	Causa potencial	Efecto potencial	Severidad (S)
Arranque	Bombear agua potable conforme al programa de	AB-BFAC	Bajo flujo de aceite en cojinetes	Interrupción o retraso del bombeo	7

Subproceso	Función	Modo de falla	Causa potencial	Efecto potencial	Severidad (S)
	CONAGUA				
Arranque	Bombear agua potable conforme al programa de CONAGUA	AB-NRP2	Falla en bomba de aceite P2	Falta de prelubricación	7
Arranque	Bombear agua potable conforme al programa de CONAGUA	AN-NRI	No retro del interruptor 52MX	El motor no confirma su energización	7
Arranque	Bombear agua potable conforme al programa de CONAGUA	AN-AVTB	Alta vibración en el tope de bomba	Riesgo de daño mecánico	7
Operación continua	Mantener el bombeo continuo	PNNP-FSVE	Falla de sostenimiento de válvula esférica	Interrupción del bombeo	7
Operación continua	Mantener el bombeo continuo	PNNP-MBNATS	Muy bajo nivel de agua en tanque de sumergencia	Interrupción del bombeo por condición de nivel insuficiente	7
Operación continua	Mantener el bombeo continuo	PE-ABCE	Apertura de bobina de cierre de emergencia	Paro de emergencia del equipo	7
Operación continua	Mantener el bombeo continuo	PE-BPAS	Baja presión de aceite en servomotor	Pérdida de la condición hidráulica requerida y paro de emergencia	7

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología AIAG-VDA (2019), los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025) y la información técnica del proceso.

El análisis de los modos de falla permitió identificar las principales causas potenciales asociadas a cada elemento de trabajo, así como los efectos que dichas fallas pueden generar sobre el proceso de bombeo de agua potable. La asignación del nivel de severidad permitió establecer la importancia relativa de cada evento y proporcionó la información necesaria para desarrollar la evaluación del riesgo mediante los criterios de ocurrencia, detección y prioridad de acción

establecidos en la metodología AIAG-VDA.

4.5.4 Análisis de riesgo

El análisis de riesgo constituye la cuarta etapa del AMEF de Proceso y tiene como finalidad evaluar el nivel de riesgo asociado a cada modo de falla identificado, considerando la probabilidad de ocurrencia, la capacidad de detección y la prioridad de acción (AP), de acuerdo con los lineamientos establecidos en la metodología AIAG-VDA (2019). Esta etapa permite identificar los modos de falla que requieren una atención inmediata y establecer prioridades para la implementación de acciones orientadas a mejorar la confiabilidad del proceso de bombeo. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Análisis de riesgo de los modos de falla mediante la metodología AMEF-VDA

Subproceso	Modo de falla	Control de ocurrencia	O	Mecanismo de detección	D	AP
Arranque	AB-BFAC	Mantenimiento preventivo	7	Instructivo 33 e inspección por ingeniero especializado (3 veces al día)	8	H
Arranque	AB-NRP2	Mantenimiento preventivo	7	Verificación local por ayudante general	9	H
Arranque	AN-NRI	Mantenimiento correctivo	9	Instructivo 33 e inspección por ingeniero especializado	8	H
Arranque	AN-AVTB	Mantenimiento preventivo	7	Revisión de parámetros por el operador	9	H
Operación continua	PNNP-FSVE	Mantenimiento correctivo	9	Revisión de parámetros por el operador	9	H
Operación continua	PNNP-MBNATS	No existe control	10	No existe mecanismo de detección	10	H
Operación continua	PE-ABCE	Mantenimiento preventivo	7	Revisión de parámetros por el operador	9	H
Operación continua	PE-BPAS	No existe control	10	Revisión de parámetros por el operador	9	H

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología AIAG-VDA (2019), los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025) y

la información técnica del proceso.

La evaluación de riesgo mostró que todos los modos de falla analizados presentaron una Prioridad de Acción alta (AP = H), lo que indica la necesidad de implementar medidas de mejora orientadas a reducir la probabilidad de ocurrencia de las fallas o incrementar la capacidad de detección de estas. Particularmente, los modos de falla PNNP-MBNATS y PE-BPAS obtuvieron las calificaciones más elevadas de ocurrencia y detección debido a la ausencia de controles preventivos específicos, lo que incrementa su nivel de criticidad dentro del proceso de bombeo.

Con base en los resultados del análisis de riesgo se definieron acciones de mejora para los ocho modos prioritarios. El Cuadro 13 presenta las acciones propuestas; las columnas de ocurrencia, detección y Prioridad de Acción posteriores se mantienen sin calificación porque las medidas no fueron implementadas durante el periodo de estudio y, por tanto, no existe evidencia empírica para asignar un riesgo residual.

4.5.5 Optimización

La etapa de optimización constituye el último paso del AMEF de Proceso y tiene como finalidad definir acciones orientadas a reducir el nivel de riesgo de los modos de falla identificados durante el análisis. Conforme a la metodología AIAG-VDA (2019), las acciones de mejora pueden dirigirse a disminuir la probabilidad de ocurrencia de la falla, fortalecer los mecanismos de detección o ambas estrategias de manera simultánea. En la presente investigación, las propuestas de optimización se enfocaron en los modos de falla que presentaron mayor impacto sobre la continuidad del proceso de bombeo y mayores posibilidades de mejora desde el punto de vista operativo. Las acciones propuestas se presentan en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Acciones de optimización propuestas para los modos de falla prioritarios

Modo de falla	Elemento de trabajo	Acción propuesta	Evaluación posterior
AB-BFAC	Sistema de lubricación	Programa de revisión del sistema de lubricación	No evaluada
AB-NRP2	Bomba de aceite P2	Inspección preventiva de la bomba P2	No

Modo de falla	Elemento de trabajo	Acción propuesta	Evaluación posterior
			evaluada
AN-NRI	Interruptor 52MX	Implementación de alarma visual de confirmación	No evaluada
AN-AVTB	Sensor de vibración	Programa de revisión periódica del sistema de monitoreo de vibraciones	No evaluada
PNNP-FSVE	Válvula esférica	Programa de inspección de la válvula esférica	No evaluada
PNNP-MBNATS	Tanque de sumergencia	Revisión de niveles y ajuste del programa de operación	No evaluada
PE-ABCE	Bobina de cierre de emergencia	Sustitución preventiva de la bobina de cierre	No evaluada
PE-BPAS	Sistema de lubricación	Inspección sistemática y registro fotográfico de componentes críticos	No evaluada

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología AIAG-VDA (2019), los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025) y la información técnica del proceso.

Las acciones propuestas se orientan a fortalecer los mecanismos de prevención y detección de los ocho modos de falla prioritarios. Debido a que las medidas no fueron implementadas durante el periodo de estudio, no se asignaron valores posteriores de ocurrencia, detección ni Prioridad de Acción. Una reevaluación del riesgo deberá realizarse una vez que las acciones hayan sido implementadas y exista evidencia operativa suficiente para valorar su efecto.

4.5.5.1 Implementación de una alarma visual

Como acción de mejora para el modo de falla AN-NRI (No retro del interruptor 52MX), se propone la implementación de una alarma visual que permita identificar de manera inmediata la ausencia de la señal de retroaviso del interruptor principal. La propuesta consiste en incorporar un circuito de señalización mediante una lámpara indicadora conectada a uno de los contactos auxiliares del relevador encargado de confirmar la energización del motor principal.

Cuando la señal luminosa no se active durante la secuencia de arranque, el personal de operación podrá identificar rápidamente la anomalía y verificar el funcionamiento del interruptor, del relevador o del circuito de control, reduciendo el tiempo requerido para el diagnóstico de la

falla. Adicionalmente, se propone registrar la ocurrencia de este tipo de eventos para generar una base de datos que permita analizar su comportamiento a lo largo del tiempo y apoyar el desarrollo futuro de modelos de predicción de fallas.

4.5.5.2 Programa de revisión periódica

Para reducir el riesgo asociado al modo de falla AN-AVTB (Alta vibración en el tope de bomba), se propone establecer un programa de revisión periódica del sistema de monitoreo de vibraciones y de los dispositivos encargados de medir el desplazamiento axial del conjunto motor-bomba.

Las actividades de inspección comprenderán la verificación del estado del sensor de vibración (proximitor), la medición de la resistencia de su bobina inductiva y la comprobación del desplazamiento axial del eje del motor durante condiciones normales de operación. La información obtenida permitirá generar registros históricos del comportamiento del sistema y establecer tendencias que faciliten la detección temprana de anomalías mecánicas, contribuyendo al fortalecimiento de un esquema de mantenimiento predictivo.

4.5.5.3 Modificación del programa de operación

Como medida de optimización para el modo de falla PNNP-MBNATS (Muy bajo nivel de agua en el tanque de sumergencia), se propone ajustar el programa de operación de la Planta de Bombeo No. 5 mediante la redefinición de los niveles de operación que determinan el arranque y paro de los equipos de bombeo.

Esta modificación permitiría mantener niveles adecuados de agua en el tanque de sumergencia, reduciendo la probabilidad de interrupciones por insuficiencia de suministro y favoreciendo la continuidad del proceso de bombeo. Asimismo, se recomienda registrar de manera sistemática las condiciones de operación de los equipos, con el propósito de generar información que facilite el análisis de diferentes escenarios operativos y el desarrollo de futuros modelos predictivos.

4.5.5.4 Sustitución de la bobina de cierre

Para disminuir el riesgo asociado al modo de falla PE-ABCE (Apertura de bobina de cierre de emergencia), se propone sustituir la bobina actualmente instalada por un componente diseñado para operación continua, con características técnicas que permitan soportar las condiciones de servicio presentes en la Planta de Bombeo No. 5.

La sustitución contribuiría a reducir la probabilidad de fallas derivadas del sobrecalentamiento y del desgaste prematuro del componente, disminuyendo la posibilidad de paros de emergencia y mejorando la confiabilidad del sistema. Como complemento, se recomienda implementar un registro periódico de variables operativas, tales como temperatura, corriente eléctrica, resistencia y horas de servicio, con la finalidad de identificar patrones de degradación que apoyen futuras estrategias de mantenimiento predictivo.

4.5.5.5 Implementación de evidencia fotográfica

Como estrategia complementaria para el modo de falla PE-BPAS (Baja presión de aceite en el servomotor), se propone implementar un sistema de registro fotográfico de las inspecciones realizadas durante las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo.

El sistema permitirá documentar de manera objetiva el estado físico de componentes críticos, como sellos, conexiones, fugas de aceite y elementos de lubricación, generando un historial visual que facilite el seguimiento de su degradación. Se recomienda que cada registro incorpore información de fecha y hora mediante herramientas digitales que garanticen la trazabilidad de la evidencia recopilada. La integración de esta información con los registros de mantenimiento fortalecerá la identificación de tendencias de deterioro y proporcionará información útil para el desarrollo de modelos de predicción de fallas en componentes sometidos a desgaste progresivo.

4.6 Desarrollo de la propuesta metodológica como base para el mantenimiento predictivo

La aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF-VDA) permitió identificar los componentes críticos de la Planta de Bombeo No. 5 y los modos de falla con mayor impacto sobre la continuidad del proceso de bombeo. A partir de esta información se estructuró una propuesta metodológica que integra la frecuencia histórica de eventos, la priorización AMEF y la selección de variables de condición necesarias para una etapa posterior de mantenimiento predictivo.

La propuesta metodológica integra la información obtenida de los registros históricos de operación, los resultados del análisis AMEF y las variables de condición reportadas como relevantes para el monitoreo de maquinaria rotativa, entre ellas la vibración mecánica, la temperatura, el consumo energético, el caudal, la presión y las horas acumuladas de operación. La integración de estos elementos constituye una base técnica para el desarrollo futuro de modelos predictivos orientados al mantenimiento basado en condición.

Figura 16. Propuesta metodológica para la identificación y priorización de fallas como base para el mantenimiento predictivo en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala.



Fuente: Elaboración propia

4.7 Consideraciones éticas y limitaciones

La presente investigación se desarrolló respetando la confidencialidad de la información técnica correspondiente a la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala. Los registros históricos utilizados fueron analizados exclusivamente con fines académicos, evitando la divulgación de información considerada sensible para la operación de la infraestructura hidráulica.

Como principal limitación del estudio se reconoce que la propuesta metodológica se fundamenta en registros históricos de eventos de falla y en la aplicación de la metodología AMEF-VDA, sin contar con información continua de variables de condición, como vibración, temperatura, presión o consumo energético. En consecuencia, la propuesta de predicción

desarrollada constituye una base metodológica susceptible de fortalecerse mediante la incorporación futura de sistemas de monitoreo en tiempo real y técnicas avanzadas de análisis de datos.

No obstante, la metodología desarrollada proporciona un procedimiento sistemático para la identificación, priorización y análisis de modos de falla aplicable a procesos de mantenimiento en infraestructura hidráulica crítica.

V. Evaluación de la solución

5.1 Resultados del análisis de los registros históricos

Con base en la muestra de 359 turnos de operación correspondientes al periodo 2021–2025, se identificaron cuatro tipos principales de eventos de falla: arranque bloqueado, arranque negativo, paro normal no programado y paro de emergencia. Estos registros constituyeron la base para la aplicación del AMEF-VDA y para la identificación de los componentes críticos del proceso de bombeo.

Cuadro 14. Distribución de eventos de falla identificados

Tipo de evento	Frecuencia
Arranque bloqueado	67
Arranque negativo	75
Paro normal no programado	62
Paro de emergencia	70
Operación sin incidentes	85
Total	359

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025).

Los resultados muestran que el arranque negativo fue el evento con mayor frecuencia durante el periodo analizado, seguido del paro de emergencia, el arranque bloqueado y el paro normal no programado. Esta distribución permitió identificar los procesos con mayor incidencia de fallas

y orientar el análisis hacia los modos de falla con mayor impacto operativo.

A partir del análisis de los registros históricos de operación se seleccionaron los modos de falla de mayor recurrencia dentro de cada tipo de evento, los cuales fueron considerados para su posterior evaluación mediante la metodología AMEF-VDA. Como se presenta en el Cuadro 15, se identificaron ocho modos de falla asociados con los eventos de arranque bloqueado, arranque negativo, paro normal no programado y paro de emergencia.

5.2 Modos de falla críticos identificados

Cuadro 15. Modos de falla críticos identificados durante el periodo de estudio

Tipo de evento	Modo de falla	Frecuencia
Arranque bloqueado	BFAC	18
Arranque bloqueado	NRP2	18
Arranque negativo	NRI	29
Arranque negativo	AVTB	18
Paro normal no programado	FSVE	14
Paro normal no programado	MBNATS	15
Paro de emergencia	ABCE	17
Paro de emergencia	BPAS	18

Fuente: Elaboración propia con base en los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala (2021–2025) y en la metodología AIAG-VDA (2019).

El análisis permitió identificar ocho modos de falla con mayor frecuencia de ocurrencia. Destaca el no retro del interruptor 52MX (NRI), con 29 registros, seguido del bajo flujo de aceite en cojinetes (BFAC), el no retroaviso de la bomba de aceite P2 (NRP2), la alta vibración en el tope de bomba (AVTB) y la baja presión de aceite en el servomotor (BPAS). Estos resultados muestran que las fallas asociadas a los sistemas de lubricación, control eléctrico y monitoreo representan los principales puntos críticos del proceso de bombeo.

5.3 Evaluación del riesgo mediante AMEF-VDA

La aplicación de la metodología AMEF-VDA permitió evaluar el nivel de riesgo asociado a los

principales modos de falla identificados durante el análisis de los registros históricos de operación de la Planta de Bombeo No. 5. Para ello se asignaron los valores de severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D) conforme a los criterios establecidos en el Manual AIAG-VDA (2019), obteniendo posteriormente la Prioridad de Acción (AP) para cada modo de falla.

La evaluación mostró que los modos de falla relacionados con el sistema de lubricación, los dispositivos de control eléctrico y los mecanismos de protección presentaron los mayores niveles de riesgo, debido a la combinación de su frecuencia de ocurrencia, el impacto que generan sobre la continuidad del bombeo y la dificultad para detectar oportunamente algunas de sus causas. En consecuencia, estos modos de falla fueron considerados prioritarios para la implementación de acciones de mejora orientadas a incrementar la confiabilidad del proceso.

Cuadro 16. Evaluación del riesgo de los principales modos de falla mediante AMEF-VDA

Modo de falla	**S**	**O**	**D**	**AP**
BFAC	7	7	8	H
NRP2	7	7	9	H
NRI	7	9	8	H
AVTB	7	7	9	H
FSVE	7	9	9	H
MBNATS	7	10	10	H
ABCE	7	7	9	H

Modo de falla	S	O	D	AP
BPAS	7	10	9	H

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología AIAG-VDA (2019).

Los resultados obtenidos permitieron establecer un orden de prioridad para la atención de los diferentes modos de falla. Esta jerarquización constituye una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en mantenimiento, ya que facilita concentrar los recursos disponibles en aquellos eventos que representan un mayor riesgo para la continuidad del proceso de bombeo.

5.4 Evaluación de las acciones de mejora

Con base en los resultados del AMEF-VDA se propusieron diversas acciones de mejora orientadas a disminuir la probabilidad de ocurrencia de los modos de falla más críticos y fortalecer los mecanismos de detección temprana. Las acciones fueron diseñadas considerando su factibilidad técnica, facilidad de implementación y el impacto esperado sobre la confiabilidad de la Planta de Bombeo No. 5.

Entre las principales acciones propuestas destacan la implementación de alarmas visuales para condiciones críticas de operación, el establecimiento de programas de revisión periódica de componentes, la actualización del programa operativo de mantenimiento, la sustitución preventiva de componentes con alta incidencia de falla y la incorporación de evidencia fotográfica como apoyo para el seguimiento de inspecciones y actividades de mantenimiento.

Cuadro 17. Acciones de mejora propuestas para los principales modos de falla

Modo de falla	Acción propuesta	Objetivo
BFAC	Programa de revisión del sistema de lubricación	Reducir fallas por falta de lubricación

Modo de falla	Acción propuesta	Objetivo
NRP2	Inspección preventiva de la bomba P2	Garantizar la prelubricación
NRI	Alarma visual de confirmación de energización	Detectar fallas del interruptor
AVTB	Monitoreo periódico de vibraciones	Detectar desalineaciones
FSVE	Inspección de válvula esférica	Mejorar continuidad del bombeo
MBNATS	Monitoreo del nivel del tanque	Evitar interrupciones
ABCE	Sustitución preventiva de bobinas	Reducir paros de emergencia
BPAS	Revisión del sistema hidráulico	Mantener presión adecuada

Fuente: Elaboración propia.

La implementación de estas acciones permitiría disminuir la probabilidad de ocurrencia de los principales modos de falla identificados, incrementar la capacidad de detección temprana y fortalecer la confiabilidad operativa de la Planta de Bombeo No. 5.

5.5 Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de la metodología AMEF-VDA constituye una herramienta eficaz para identificar y priorizar los modos de falla más relevantes en sistemas de bombeo de infraestructura crítica. Los modos de falla asociados al sistema de lubricación, los dispositivos de control eléctrico y los sistemas de protección presentaron las mayores frecuencias de ocurrencia, coincidiendo con lo reportado por Mobley (2002), quien señala que las fallas en sistemas de lubricación, rodamientos y equipos auxiliares representan una de las principales causas de indisponibilidad en maquinaria rotativa.

Asimismo, los resultados son consistentes con lo señalado por Jardine et al. (2006), quienes destacan que la identificación temprana de los mecanismos de degradación constituye el punto de partida para el desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo. En este sentido, la información obtenida mediante el AMEF permite establecer prioridades para futuras etapas de monitoreo de condición, incorporando variables como vibración, temperatura, presión y consumo energético.

Desde la perspectiva de la gestión del mantenimiento, la metodología AIAG-VDA permitió sustituir un enfoque basado únicamente en la ocurrencia histórica de fallas por un esquema de evaluación integral del riesgo, considerando simultáneamente la severidad de los efectos, la probabilidad de ocurrencia y la capacidad de detección de cada modo de falla. Este enfoque proporciona criterios objetivos para priorizar acciones de mantenimiento y optimizar la asignación de recursos en instalaciones hidráulicas de alta importancia estratégica.

Finalmente, la propuesta desarrollada constituye una base metodológica para una etapa posterior de mantenimiento predictivo en la Planta de Bombeo No. 5. El estudio no desarrolló ni validó un algoritmo de predicción, ya que no se dispuso de series continuas de variables de condición. Su aportación consiste en estructurar los registros históricos, identificar modos críticos y establecer qué variables deberían monitorearse para generar, en el futuro, modelos de pronóstico con información suficiente y trazable.

VI. Conclusiones y sugerencias.

6.1 Conclusiones

La presente investigación cumplió el objetivo general al desarrollar una propuesta metodológica para la identificación y priorización de fallas en la Planta de Bombeo No. 5 del Sistema Cutzamala, mediante la integración de registros históricos de operación y la aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla conforme al enfoque AIAG-VDA. El procedimiento permitió transformar registros dispersos de operación en una estructura de análisis útil para priorizar acciones de mantenimiento.

En relación con el primer objetivo específico, el análisis de los registros históricos de 2021–2025 permitió caracterizar cuatro tipos principales de eventos de falla: arranque bloqueado, arranque negativo, paro normal no programado y paro de emergencia. El arranque negativo presentó la mayor frecuencia, y el no retro del interruptor 52MX (NRI) fue el modo individual más recurrente. También se observó una presencia relevante de eventos vinculados con lubricación, control eléctrico, vibración, nivel hidráulico y mecanismos de protección.

Respecto del segundo objetivo específico, la aplicación del AMEF-VDA permitió relacionar funciones, modos de falla, causas, efectos, severidad, ocurrencia y mecanismos de detección. Los ocho modos priorizados obtuvieron Prioridad de Acción alta en la evaluación inicial, lo que justifica su atención dentro de la gestión del mantenimiento.

En cumplimiento del tercer objetivo específico, se formularon acciones de mejora para los modos prioritarios, entre ellas programas de revisión e inspección, una alarma visual de confirmación, monitoreo periódico de vibraciones, revisión de la válvula esférica, seguimiento de nivel del tanque, sustitución preventiva de la bobina de cierre y registro sistemático de componentes críticos. Al tratarse de acciones propuestas y no implementadas durante el estudio, su eficacia deberá validarse posteriormente con evidencia de operación.

En relación con el cuarto objetivo específico, se estableció que una etapa posterior de mantenimiento predictivo deberá incorporar, de forma continua y trazable, variables como vibración, temperatura, presión, caudal, consumo energético y horas acumuladas de operación. Por tanto, el presente trabajo no constituye un modelo predictivo validado; proporciona una base metodológica y criterios de priorización para orientar su desarrollo futuro.

6.2 Sugerencias

Implementar un sistema permanente de monitoreo de condición que permita registrar variables operativas como vibración, temperatura, presión, caudal y consumo energético de los equipos de bombeo.

Incorporar sistemas digitales para el almacenamiento y gestión de registros históricos de mantenimiento, con el propósito de mejorar la disponibilidad y calidad de la información utilizada para la toma de decisiones.

Aplicar la metodología AMEF-VDA de manera periódica, actualizando la evaluación de riesgos conforme cambien las condiciones de operación o se incorporen nuevos equipos al sistema.

Desarrollar investigaciones futuras orientadas a la construcción de modelos predictivos basados en técnicas estadísticas y algoritmos de aprendizaje automático, utilizando información proveniente de sensores instalados en tiempo real.

Extender la metodología propuesta a otras plantas de bombeo que integran el Sistema

Cutzamala, con el propósito de comparar patrones de falla y fortalecer la gestión integral del mantenimiento de la infraestructura hidráulica.

VII. Fuentes bibliográficas consultadas.

Automotive Industry Action Group, & Verband der Automobilindustrie. (2019). AIAG & VDA FMEA handbook: Failure mode and effects analysis (1st ed.). AIAG.

Chen, C., Fu, H., Zheng, Y., Tao, F., & Liu, Y. (2023). The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning. Journal of Manufacturing Systems, 71, 581–594. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.10.010

Comisión Nacional del Agua. (2023). Presentan Conagua, Gobierno de la Ciudad de México y del Estado de México estrategia de atención ante la temporada de estiaje 2023. Gobierno de México.

Gonçalves, J. P. S., Fruett, F., Dalfré Filho, J. G., & Giesbrecht, M. (2021). Faults detection and classification in a centrifugal pump from vibration data using Markov parameters. Mechanical Systems and Signal Processing, 158, 107694. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107694

Hallaji, S. M., Fang, Y., & Winfrey, B. K. (2022). Predictive maintenance of pumps in civil infrastructure: State-of-the-art, challenges and future directions. Automation in Construction, 134, 104049. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104049

He, L., Wen, K., Gong, J., & Wu, C. (2022). A multi-model ensemble digital twin solution for real-time unsteady flow state estimation of a pumping station. ISA Transactions, 126, 242–253. Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

International Organization for Standardization. (2009). ISO 10816-7:2009. Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts—Part 7: Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts. ISO.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal

Processing, 20(7), 1483–1510. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012

Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Universidad Autónoma del Estado de México. (2015). Licenciatura de Ingeniero Agrónomo Industrial: Reestructuración 2015. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México.

Universidad Nacional Autónoma de México. (2024). Informe de actividades de las prácticas foráneas del Departamento de Hidráulica al Sistema Cutzamala, semestre 2024-2. Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica.

ANEXOS

Anexo 3 Tabla de severidad

Tabla. Criterio de severidad (S) para evaluación general de los procesos (AMEF)

Criterio de Severidad (S) para Evaluación general de los Procesos (AMEFPs)				
Efectos de fallas potenciales calificadas de acuerdo a criterios abajo indicados				
S	**Efecto**	**Impacto en su planta**	**Impacto en el envío a planta (cuando se conozca)**	**Impacto en el usuario final (cuando se conozca)**
10	**Alto**	La falla puede resultar en un riesgo agudo en la salud y/o seguridad para el operador de manufactura o ensamble.	La falla puede resultar en un riesgo agudo en la salud y/o seguridad para el operador de manufactura o ensamble.	Afecta la operación segura del vehículo y/u otros vehículos, la salud del conductor o pasajero(s), o usuarios de carreteras o peatones.
9		La falla puede resultar en un incumplimiento regulatorio en planta.	La falla puede resultar en un incumplimiento regulatorio en planta.	Incumplimiento con regulaciones.
8	**Moderadamente alto**	El 100% de la corrida de producción afectada puede desecharse. La falla puede resultar en un incumplimiento regulatorio en planta o un riesgo crónico en la salud y/o seguridad para el operador de manufactura o ensamble.	Paro de producción mayor que un turno completo de producción; posible paro de un envío; reparación o remplazo en campo requerido (Ensamble en el Usuario Final) diferente a algún incumplimiento regulatorio. La falla puede resultar en un incumplimiento regulatorio en planta o un riesgo crónico en la salud y/o seguridad para el operador de manufactura o ensamble.	**Pérdida** de alguna función primaria del vehículo, necesaria para el manejo normal durante su vida de servicio esperada.
7		El producto pudiera tener que clasificarse en una proporción para desecho/scrap (menor del 100%); decrementarse la velocidad de la línea o agregar mano de obra.	Paro de línea desde 1 hora hasta un turno de producción completo; posible paro de un envío; reparación o reemplazo en campo requerido (Ensamble en el Usuario Final) diferente a algún incumplimiento regulatorio.	**Degradamiento** de alguna función primaria del vehículo necesaria para el manejo normal durante su vida de servicio esperada.
6	**Moderadamente bajo**	El 100% de la corrida de producción tendría que re trabajarse fuera de la línea y ser aceptada.	Paro de línea de hasta 1 hora.	**Pérdida** de alguna función secundaria del vehículo.
5		Una proporción de la corrida de producción tendría que re trabajarse fuera de la línea y ser aceptada.	Menos del 100% del producto afectado; fuerte posibilidad de producto defectuoso adicional; se requiere clasificación; sin paro de línea.	**Degradamiento** de alguna función secundaria de vehículo.
4		El 100% de la corrida de la producción tendría que re trabajarse en la estación antes de procesarse.	Producto defectuoso provoca planes de reacción significativos; producto defectuoso adicional no probable; clasificación no se requiere.	Es muy objetable la apariencia, sonido, vibración, dureza o tacto.
3	**Bajo**	Una proporción de la corrida de la producción tendría que re trabajarse en la estación antes de procesarse.	Producto defectuoso provoca planes de reacción menores; producto defectuoso adicional no probable; clasificación no se requiere.	Es moderadamente objetable la apariencia, sonido, vibración, dureza o tacto.
2		Leve inconveniencia al proceso, operación, u operador.	Producto defectuoso no provoca planes de reacción; producto defectuoso adicional no probable; clasificación no se requiere; se requiere retroalimentación al proveedor.	Es levemente objetable la apariencia, sonido, vibración, dureza o tacto.
1	**Muy bajo**	Sin efecto discernible.	Efecto no discernible o sin efecto.	Sin efecto discernible.

Anexo 4 Tabla de ocurrencia

Tabla. Criterio de ocurrencia (O) para evaluación general de los procesos (AMEF)
(creación propia)

AMEF-1-AIAG-VDA (Julio-2019) [AMEF-1-2019-Pags. 111, 197, 198 y 199]

Potencial de Ocurrencia (O) para el Proceso (AMEFPs)						
Causas de fallas potenciales calificadas de acuerdo con los criterios siguientes. Se consideran controles de prevención cuando se determina el mejor estimativo de ocurrencia. Ocurrencia es un rango predictivo y cualitativo hecho en el tiempo de la evaluación y puede no reflejar la ocurrencia actual. El número de rango de ocurrencia es un rango relativo dentro del alcance del AMEF (proceso siendo evaluado) para controles de prevención con rangos de ocurrencia múltiples, usar el rango que mejor refleje la robustez del control mismo.						Vacío hasta ser llenado por el usuario
O	**Predicción de Ocurrencia de las Causas de la Falla**	**Incidentes por 1000 ítems/partes /vehículos**	**Predicción de Ocurrencia de las Causas de la falla en base a tiempo**	**Tipos de Controles**	**Controles de Prevención**	**Ejemplos Corporativos o de las Líneas de Producto**
10	**Extremada-mente alta**	**≥ 100 por mil 1 en 10**	**Todo el tiempo**	Ninguno.	Sin Controles de prevención.	
9	**Muy alta**	**50 por mil 1 en 20**	**Casi todo el tiempo**	De comportamiento.	Los controles de prevención tienen un ligero efecto en la prevención de las causas de la falla.	
8		**20 por mil 1 en 50**	**Más de una vez por turno**			
7	**Alta**	**10 por mil 1 en 100**	**Más de una vez por día**	De comportamiento o técnicos.	Los controles de prevención son un tanto efectivos en la prevención de las causas de la falla.	
6		**2 por mil 1 en 500**	**Más de una vez por semana**			
5	**Moderada**	**.5 por mil 1 en 2000**	**Más de una vez por mes**		Los controles de prevención son efectivos en la prevención de las causas de la falla.	
4		**.1 por mil 1 en 10000**	**Más de una vez por año**			
3	**Baja**	**.01 por mil 1 en 100000**	**Una vez por año**	Mejores prácticas: De comportamiento o técnicos.	Los controles de prevención son altamente efectivos en la prevención de las causas de la falla.	
2	**Muy baja**	**<.001 por mil 1 en 1000000**	**Menos de una vez por año**			
1	**Extremada-mente bajo**	**La falla es eliminada a través de controles de prevención**	**Nunca**	Técnicos.	Los controles de prevención son extremadamente efectivos en la prevención de las causas de la falla, de que ocurran debido al diseño (ej., geometría de la parte) o proceso (ej., diseño del dispositivo o herramental). Intención de los controles de prevención – los modos de falla no pueden ser producidos físicamente debido a las causas de la falla misma.	

Anexo 5 Tabla de detección

Tabla. Criterio de detección (D) para evaluación general de los procesos (AMEF)

AMEF-1-AIAG-VDA (Julio-2019) [AMEF-1-2019-Pags. 112, 113, 200 y 201]

Potencial de Detección (D) para la Validación del Diseño del Proceso (AMEFPs)				
Controles de Detección calificados de acuerdo a la Madurez del Método de Detección y a las Oportunidades de Detección.				Vacío hasta ser llenado por el usuario
D	**Habilidad de Detectar**	**Madurez del Método de Detección**	**Oportunidades para Detección**	**Ejemplos Corporativos o de las Líneas de Producto**
10	Muy bajo	Método de inspección o prueba no se ha establecido o no se conoce.	El modo de la falla no es o no puede ser detectado.	
9		No es probable que el método de inspección o prueba detecte el modo de la falla.	El modo de la falla no es fácilmente detectado a través de auditorías aleatorias o esporádicas.	
8	Bajo	El método de inspección o prueba **no ha sido** probado para ser efectivo y confiable (ej., la planta tiene poca o no experiencia con el método, resultados marginales de estudios R&R de gages en procesos comparables o en esta aplicación, etc.).	Inspección humana (visual, táctil, audible), o uso manual de gages (atributos o variables) que debieran detectar el modo o causas de la falla.	
7			Detección en base a un equipo/máquina (automatizado o semi automatizado con notificación por una luz, alarma, etc.), o uso de un equipo de inspección tal como, una máquina de medición por coordenadas (CMM) que debiera detectar el modo o causas de la falla.	
6	Moderado	El método de inspección o prueba **ha sido** probado para ser efectivo y confiable (ej., la planta tiene poca o no experiencia con el método, resultados marginales de estudios R&R de gages en procesos comparables o en esta aplicación, etc.).	Inspección humana (visual, táctil, audible), o uso manual de gages (atributos o variables) que detectan el modo o causas de la falla (incluyendo chequeos de muestras del producto).	
5			Detección en base a un equipo/máquina (semi automatizado con notificación por una luz, alarma, etc.), o uso de un equipo de inspección tal como, una máquina de medición por coordenadas (CMM) que detecte el modo o causas de la falla (incluyendo chequeos de muestras del producto).	
4	Alto	El sistema ha sido probado ser efectivo y confiable (ej., la planta cuenta con experiencia en el método con procesos idénticos o en esta aplicación), resultados de estudios R&R de gages son aceptables, etc.	Método de detección automatizado en base a un equipo/máquina que detecte el modo de la falla **flujo abajo**, que previene algún procesamiento adicional o un sistema que identifique el producto como discrepante y le permita flui a delante en forma automática en el proceso hasta un área de rechazo y descarga designada. El producto discrepante es controlado robusto que previene el flujo del producto fuera de las instalaciones.	
3			Método de detección automatizado en base a un equipo/máquina, que detecta el modo de la falla **en la estación**, previene algún procesamiento adicional o un sistema que identifique el producto como discrepante y le permita fluir adelante en forma automática en el proceso hasta un área de rechazo y descarga designada. El producto discrepante es controlado robusto que previene el flujo del producto fuera de las instalaciones.	
2		El método de detección ha sido efectivo y confiable (ej., la planta tiene experiencia en el método, en verificaciones a prueba de errores, etc.).	Método de detección/máquina que detecta las causas y previene el modo de la falla (parte discrepante) al ser producida.	
1	Muy alto	El modo de la falla no puede producirse físicamente conforme ha sido diseñado o procesado, o los métodos de detección probados **siempre** detectan el modo o las causas de la falla.		

S	O	D	AP	PFMEA Action Priority Logic
9-10	6-10	2-10	H	High priority due to safety and/or regulatory effects that have a **high** or **very high** occurrence rating
9-10	4-5	7-10	H	High priority due to safety and/or regulatory effects that have a **moderate** occurrence rating and **high** detection rating
9-10	4-5	5-6	H	High priority due to safety and/or regulatory effects that have a **moderate** occurrence rating and **moderate** detection rating
9-10	4-5	2-4	M	Medium priority due to safety and/or regulatory effects that have a **moderate** occurrence rating and **low** detection rating
9-10	2-3	7-10	H	High priority due to safety and/or regulatory effects that have a **low** occurrence rating and **high** detection rating
9-10	2-3	5-6	M	Medium priority due to safety and/or regulatory effects that have a **low** occurrence rating and **moderate** detection rating
9-10	2-3	2-4	L	Low priority due to safety and/or regulatory effects that have a **low** occurrence and **low** detection rating
5-8	8-10	2-10	H	High priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **very high** occurrence rating
5-8	6-7	7-10	H	High priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **high** occurrence rating and **high** detection rating
5-8	6-7	5-6	H	High priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **high** occurrence and **moderate** detection rating
5-8	6-7	2-4	M	Medium priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **high** occurrence rating and **low** detection rating
5-8	4-5	7-10	H	High priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **moderate** occurrence rating and **high** detection rating
5-8	4-5	5-6	H	High priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **moderate** occurrence rating and **moderate** detection rating
5-8	4-5	2-4	M	Medium priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **moderate** occurrence and **low** detection rating
5-8	2-3	7-10	M	Medium priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **low** occurrence and **high** detection rating
5-8	2-3	5-6	M	Medium priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **low** occurrence and **moderate** detection rating
5-8	2-3	2-4	L	Low priority due to the loss or degradation of a primary or secondary vehicle function or a manufacturing disruption that has a **low** occurrence and a **low** detection rating
2-4	8-10	2-10	H	High priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **high** occurrence rating
2-4	6-7	7-10	H	High priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **high** occurrence rating and **high** detection rating
2-4	6-7	5-6	H	High priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruptionwith a **high** occurrence and **moderate** detection rating
2-4	6-7	2-4	M	Medium priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **high** occurrence rating and **low** detection rating
2-4	4-5	7-10	H	High priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **moderate** occurrence and **high** detection rating
2-4	4-5	5-6	M	Medium priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **moderate** occurrence and **moderate** detection rating
2-4	4-5	2-4	L	Low priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **moderate** occurrence and **low** detection rating
2-4	2-3	7-10	M	Medium priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **low** occurrence and **high** detection rating
2-4	2-3	5-6	L	Low priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **low** occurrence and **moderate** detection rating
2-4	2-3	2-4	L	Low priority due to perceived quality (appearance, sound, haptics) or a manufacturing disruption with a **low** occurrence and **low** detection rating
2-10	1	1	L	Low priority due to the failure being virtually eliminated through prevention controls
1	1-10	1-10	L	Low priority due to no discernible effect
2-10	1	2-10	Error	O=1 implausible without D=1
2-10	2-10	1	Error	D=1 implausible without O=1

Figure 3.5-3 Action Priority for PFMEA