

# MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Optimización del monitoreo de parámetros de perfil en tanques de tratamiento de crudo mediante inteligencia artificial en una estación de producción de la región Orinoquía, Colombia

Mauricio Alberto Jiménez Castilla

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Fernando Enrique Calvete González

Magíster en Informática

Co-Director

Ramón Uriel Ochoa Delgado

Magister en Ingeniería en energía

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingeniería Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería de Petróleos  
Bucaramanga

2026

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por todas las bendiciones brindadas durante este proceso, el cual no fue nada fácil, pero que con esfuerzo, disciplina y dedicación se logró culminar satisfactoriamente.

Este logro está especialmente dedicado a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida y la principal motivación para alcanzar cada una de mis metas.

A mis padres, Edgar Mauricio Jiménez Hernández y Delia Rosa Castilla, quienes han sido mi motor principal en todo momento. Gracias por impulsarme a salir adelante y superarme en cada etapa de mi vida; su apoyo incondicional ha hecho que lo que parecía imposible se vuelva posible.

A mis hermanos, Cristian Orozco, quien, a pesar de la distancia, siempre está presente en mi corazón; Paula Jiménez, por estar siempre pendiente de mí; Catalina Jiménez, por su constante apoyo a lo largo de esta bonita carrera; y Rafael Jiménez, quien, aunque es el menor, me enseña cada día el valor de ganarse las cosas con esfuerzo y mérito propio. Gracias familia, son todo en mi vida y mi mayor inspiración para ser mejor.

A Chocorramito, por ser incondicional en todo momento y formar parte importante de mi vida.

Agradezco enormemente al Ingeniero Fernando Enrique Calvete por su disposición, sus enseñanzas a lo largo de la carrera y por brindarme su conocimiento y paciencia durante la realización de este proyecto.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

De igual manera, al Ingeniero Ramón Uriel Ochoa Delgado, por su apoyo desde el momento en que lo conocí durante mis prácticas en el Campo Castilla, por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto y por orientarme siempre de la mejor manera. Gracias por su calidad humana y por brindarme su confianza.

Finalmente, agradezco a mis profesores y compañeros de la universidad por el tiempo, el apoyo y el crecimiento brindado, tanto a nivel académico como personal.

# MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

## Tabla de Contenido

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Introducción .....  | 14          |
| 1. Objetivos.....   | 16          |
| 1.1 objetivo general.....   | 16          |
| 1.2 objetivos específicos .....   | 16          |
| 2. Cuerpo del trabajo .....   | 17          |
| 2.1 formaciones durante la producción de petróleo crudo.....                        | 17          |
| 2.2. Presencia de agua en el petróleo .....   | 18          |
| 2.3 tanques gun barrel .....  | 18          |
| 2.4 la ciencia de datos aplicada a industrias .....                                 | 19          |
| 2.5 marco legal.....  | 20          |
| 3. Metodología. ....  | 21          |
| 3.1 enfoque para el análisis de parámetros operacionales del tanque.....            | 22          |
| 3.2 procedimiento para el diseño conceptual del sistema de monitoreo sensorico..... | 23          |
| 3.3 proceso de desarrollo del modelo de inteligencia artificial. ....               | 24          |
| 3.4 estrategia de validación mediante simulación y comparación de datos.....        | 25          |
| 3.5 criterios para la definición de lineamientos de implementación.....             | 26          |
| 4. Desarrollo y análisis de resultados.....   | 27          |
| 4.1 parámetros operacionales críticos y su comportamiento en el proceso. ....       | 27          |
| 4.2 sistema sensorico propuesto y su funcionamiento dentro del tanque. ....         | 30          |
| 4.3 modelo de inteligencia artificial y su desempeño operativo. ....                | 34          |
| 4.3.1 selección del algoritmo de inteligencia artificial. ....                      | 35          |
| 4.3.2 desarrollo de la herramienta computacional .....                              | 39          |
| 4.4 validación del sistema y análisis de métricas de desempeño.....                 | 42          |
| 4.4.1 simulación bajo condiciones operacionales optimas .....                       | 43          |
| 4.4.2. Simulación bajo condiciones de alerta.....                                   | 45          |
| 4.4.3 simulación bajo condiciones operacionales/alerta .....                        | 48          |
| 4.4.4. Simulación bajo contingencia crítica. ....                                   | 50          |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

|   |    |
|---|----|
| 4.4.5 simulación bajo condiciones operacionales/criticas. ....                    | 53 |
| 4.4.6. Análisis comparativo entre datos de laboratorio y datos de simulación..... | 56 |
| 4.5 lineamientos técnicos para la implementación en condiciones reales. ....      | 61 |
| 4.5.1 análisis de pérdidas operativas a nivel de estación .....                   | 63 |
| 4.5.2 caso piloto de implementación en el tanque tk1707 .....                     | 64 |
| 4.5.3 inversión requerida (capex).....  | 65 |
| 4.5.4 construcción del flujo de caja del proyecto.....                            | 65 |
| 4.5.5 evaluación tecnoeconómica del sistema .....                                 | 67 |
| 5. Conclusiones .....   | 69 |
| 6. Recomendaciones.....   | 71 |
| Referencias bibliográficas.....   | 73 |
| Apéndices .....   | 74 |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Lista de Tablas**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1</b> Caracterización del tanque de estudio TK1707 .....  | 27 |
| <b>Tabla 2</b> Continuación caracterización del tanque de estudio TK1707.....                                    | 28 |
| <b>Tabla 3</b> Continuación caracterización del tanque de estudio TK1707.....                                    | 29 |
| <b>Tabla 4</b> Expresiones matemáticas implementadas por el sensor de monitoreo MJ24 .....                       | 33 |
| <b>Tabla 5</b> Comparación de modelos de inteligencia artificial evaluados.....                                  | 35 |
| <b>Tabla 6</b> Análisis matemático comparando perfil de laboratorio y simulación .....                           | 56 |
| <b>Tabla 7</b> Análisis de sensibilidad por zonas del tanque ATK 1707 .....                                      | 60 |
| <b>Tabla 8</b> Lineamientos técnicos para la implementación del sistema en campo.....                            | 62 |
| <b>Tabla 9</b> Pérdidas económicas asociadas a producción no conforme (PNC) .....                                | 63 |
| <b>Tabla 10</b> Parámetros operativos del tanque. ....   | 64 |
| <b>Tabla 11</b> Inversión Capex .....  | 65 |
| <b>Tabla 12</b> Flujo de caja (USD) .....  | 66 |
| <b>Tabla 13</b> Resultados de la evaluación económica.....   | 68 |
| <b>Tabla 14</b> Descripción detallada de expresiones implementadas por el sensor de estudio. ....                | 74 |
| <b>Tabla 15</b> Continuación de descripción detallada de expresiones implementadas por el sensor de estudio..... | 75 |
| <b>Tabla 16</b> Continuación de descripción detallada de expresiones implementadas por el sensor de estudio..... | 78 |
| <b>Tabla 17</b> Perfil del tanque en un día de operación óptimo.....   | 77 |
| <b>Tabla 18</b> Perfil del tanque en día de alerta operativa. ....   | 78 |
| <b>Tabla 19</b> Perfil del tanque en día de contingencia operativa .....   | 79 |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 20</b> Resultados simulación del tanque de estudio TK 1707 bajo condiciones operacionales .....  | 80 |
| <b>Tabla 21</b> Rangos operacionales y umbrales de clasificación para variables críticas del sistema utilizados en el modelo de inteligencia artificial. .... | 81 |
| <b>Tabla 22</b> Parámetros de recomendaciones caso 1 .....  | 85 |
| <b>Tabla 23</b> Datos del perfil de alerta tomados de la tabla 15 .....   | 86 |
| <b>Tabla 24</b> Clasificación y recomendaciones del caso 2.....   | 88 |
| <b>Tabla 25</b> Datos del perfil crítico tomados de la tabla 16 .....   | 89 |
| <b>Tabla 26</b> Parámetros de recomendaciones caso 3.....   | 91 |
| <b>Tabla 27</b> Datos de entrada tomados para análisis .....  | 92 |
| <b>Tabla 28</b> Parámetros de recomendaciones caso 4.....   | 93 |
| <b>Tabla 29</b> Resumen comparativo de los cuatro casos.....  | 94 |
| <b>Tabla 30</b> Datos de partida para el cálculo de VPN .....   | 95 |
| <b>Tabla 31</b> Continuación de datos de partida para el cálculo VPN.....   | 95 |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Lista de Figuras**

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Formación de emulsiones.   | 17 |
| <b>Figura 2</b> Ilustración Tanque vertical Gun Barrel. (Gallego López & Torres Mercado, 2017)   | 19 |
| <b>Figura 3</b> Multidisciplinariedad de la ciencia de dato.   | 20 |
| <b>Figura 4</b> Esquema general de la metodología llevada a cabo para la realización del presente estudio.   | 22 |
| <b>Figura 5</b> Fase 1 de desarrollo   | 22 |
| <b>Figura 6</b> Fase 2 de desarrollo   | 23 |
| <b>Figura 7</b> Fase 3 de desarrollo   | 24 |
| <b>Figura 8</b> Fase 4 de desarrollo   | 25 |
| <b>Figura 9</b> Fase 5 de desarrollo   | 26 |
| <b>Figura 10</b> Grafica explicativa del hardware del capturador de información  | 31 |
| <b>Figura 11</b> incorporación del sensor MJ24 en el tanque de lavado Gun Barrel TK1707  | 33 |
| <b>Figura 12</b> Arquitectura del modelo computacional basado en Gradient Boosting para el monitoreo inteligente y soporte a decisiones en el sistema de tratamiento de crudo. | 37 |
| <b>Figura 13</b> Imagen de entrada de la herramienta de inteligencia artificial desarrollada.  | 39 |
| <b>Figura 14</b> Sección detalle de válvulas.  | 40 |
| <b>Figura 15</b> Sección de tendencias.  | 41 |
| <b>Figura 16</b> Sección histórico de datos.   | 42 |
| <b>Figura 17</b> Especificaciones de ensayo.   | 42 |
| <b>Figura 18</b> Simulación tanque TK1707 bajo especificaciones operacionales.   | 43 |
| <b>Figura 19</b> Monitoreo de la zona de agua (Válvula 1 – Válvula 11), caso operacional   | 44 |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 20</b> Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), caso operacional                    | 44 |
| <b>Figura 21</b> Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones de alerta  | 45 |
| <b>Figura 22</b> Monitoreo de la zona de agua (Válvula 1 – Válvula 11), estado de alerta  | 46 |
| <b>Figura 23</b> Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), Estado de alerta                    | 47 |
| <b>Figura 24</b> Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones operacionales/ alerta                                | 48 |
| <b>Figura 25</b> Monitoreo de la zona de agua e interfase, crudo y rebose (Válvula 1 - Válvula 16), Estado operacional - alerta . | 49 |
| <b>Figura 26</b> Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones críticas.  | 50 |
| <b>Figura 27</b> Monitoreo de válvulas en la zona de agua (Válvula 1 - Válvula 11), Estado crítico                                | 51 |
| <b>Figura 28</b> Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), Estado de crítico                   | 52 |
| <b>Figura 29</b> Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones operacionales – críticas.                            | 53 |
| <b>Figura 30</b> Monitoreo de válvulas en la zona de agua (Válvula 1 - Válvula 11), Estado operacional – crítico.                 | 54 |
| <b>Figura 31</b> Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), Estado de operacional – crítico.    | 55 |
| <b>Figura 32</b> Comparación de BS&W real vs BS&W simulado mediante grafica de dispersión.  | 57 |
| <b>Figura 33</b> Comparación de emulsión real vs emulsión simulada mediante grafica de dispersión                                 | 58 |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 34** Comparación de solidos reales vs solidos simulados mediante grafica de dispersión

59

**Figura 35** Esquema conceptual del sistema de monitoreo inteligente en tanque tipo Gun Barrel

61

**Figura 36** Flujo de caja proyectado del sistema de monitoreo inteligente en el tanque TK1707.

67

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Lista de Apéndices**

|  |    |
|--|----|
| Apéndice a Descripción de las expresiones matemáticas usadas por el sensor MJ24.....               | 74 |
| Apéndice b Perfiles del tanque bajos los tres estados de operación (óptimo, alerta, critico) ..... | 77 |
| Apéndice c Procesamiento de datos sensóricos y validación del modelo. ....                         | 82 |
| Apéndice d Datos usados para el estudio VPN.....   | 95 |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### Resumen

**Título:** Optimización del monitoreo de parámetros de perfil en tanques de tratamiento de crudo mediante inteligencia artificial en una estación de producción de la región Orinoquía, Colombia\*

**Autor:** Mauricio Alberto Jiménez Castilla\*\*

**Palabras Clave:** Monitoreo de Procesos, Inteligencia Artificial, Tanques de Tratamiento, Tratamiento de Crudo.

En las estaciones de producción de la región Orinoquía, los tanques de tratamiento son la última etapa antes del transporte del crudo, donde se realizan procesos como la separación de fases, el control de temperatura y la verificación de calidad del fluido, definiendo si el crudo cumple con las condiciones para su entrega. Sin embargo, pese a su importancia, el monitoreo interno de estos tanques aún se basa en mediciones puntuales e indirectas, lo que limita la visión del proceso y dificulta la toma de decisiones a tiempo. En este contexto, este trabajo propone y valida una metodología de monitoreo inteligente que integra sensores internos con modelos de inteligencia artificial, con el fin de observar, interpretar y anticipar el comportamiento del sistema dentro del tanque. La propuesta se basa en el diseño conceptual de una herramienta sensorica distribuida, junto con un sistema de adquisición y procesamiento de datos que convierte señales físicas en variables del proceso. Además, se implementa un modelo de aprendizaje automático que clasifica el estado del sistema y genera recomendaciones operativas. La validación se realiza mediante simulaciones y comparación con datos de referencia, evaluando variables como nivel, temperatura, interfaces y emulsiones, demostrando la consistencia de la metodología.

---

\*Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Pregrado. Ingeniería de Petróleos. Director: Fernando Enrique Calvete Gonzales. MSc. en Informática. Co-Director: Ramón Uriel Ochoa Delgado. MSc en Ingeniería en energía.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### Abstract

**Title:** Optimization of the monitoring of profile parameters in crude oil treatment tanks using artificial intelligence at a production station in the Orinoquía region, Colombia\*

**Author:** Mauricio Alberto Jiménez Castilla\*\*

**Key Words:** Process Monitoring, Artificial Intelligence, Treatment Tanks, Crude Oil Treatment

In production stations in the Orinoquía region, treatment tanks represent the final stage before crude oil transportation, where phase separation, temperature control, and fluid quality verification are carried out, ultimately determining whether the crude meets delivery specifications. Despite their importance, internal monitoring of these tanks is still based on indirect and point measurements, which provide a limited view of the process and restrict timely decision-making. In this context, this work proposes and validates an intelligent monitoring methodology that integrates internal sensing with artificial intelligence models to observe, interpret, and anticipate the system's behavior within the tank. The proposal is based on the conceptual design of a distributed sensing tool, along with a data acquisition and processing system capable of transforming physical signals into process variables. Additionally, a machine learning model is implemented to classify the system's operational state and generate actionable recommendations. The validation is carried out through simulations and comparison with reference data, evaluating variables such as level, temperature, interfaces, and emulsion behavior, demonstrating the consistency and applicability of the proposed methodology.

---

\*Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Undergraduate Program in Petroleum Engineering. Director: Fernando Enrique Calvete Gonzales, M.Sc. in Computer Science. Co-director: Ramón Uriel Ochoa Delgado. Master of Engineering in Energy.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### **Introducción**

La industria petrolera enfrenta actualmente el desafío de optimizar sus procesos operacionales mediante herramientas tecnológicas que permitan mejorar la eficiencia, reducir pérdidas y fortalecer la toma de decisiones en tiempo real. En este contexto, el monitoreo de variables críticas dentro de los tanques de tratamiento de crudo representa una necesidad operativa de alta relevancia, debido a su impacto directo sobre la calidad del crudo tratado, la estabilidad del proceso y el desempeño general de la operación. A partir de esta necesidad, el presente trabajo de grado se desarrolló con el propósito de proponer una metodología inteligente orientada al monitoreo y análisis de parámetros operacionales dentro de un tanque de tratamiento, integrando criterios técnicos, modelado conceptual e inteligencia artificial como soporte para la generación de alertas y recomendaciones operativas.

El desarrollo del documento parte de la contextualización del problema y de la fundamentación técnica necesaria para comprender el comportamiento del proceso de tratamiento de crudo, las variables que lo gobiernan y la importancia de su monitoreo continuo. Posteriormente, se aborda la metodología empleada para estructurar la propuesta, incluyendo la identificación de los parámetros operacionales críticos, el diseño conceptual de la herramienta sensorica, la formulación del sistema de adquisición de datos y la construcción del modelo de inteligencia artificial utilizado para el análisis del comportamiento del tanque.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos a partir del cumplimiento de los objetivos específicos, evidenciando la relación entre las variables monitoreadas, la lógica de funcionamiento del sistema propuesto y la capacidad del modelo desarrollado para clasificar condiciones operativas y apoyar la toma de decisiones. Asimismo, se

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

plantean lineamientos técnicos para una futura implementación industrial, considerando criterios de integración operativa, aplicabilidad técnica y viabilidad general del sistema dentro del contexto del tratamiento de crudo.

En términos generales, el trabajo permitió establecer una propuesta estructurada para el monitoreo inteligente de parámetros críticos en tanques de tratamiento, destacando la utilidad de herramientas basadas en inteligencia artificial para mejorar la interpretación operativa del proceso. Entre los hallazgos más relevantes se encuentra la priorización de variables como el BS&W, la emulsión, la interfase, la temperatura y los sólidos, así como la selección de un modelo de clasificación con desempeño favorable para apoyar el diagnóstico operacional. Finalmente, se recomienda como continuación del estudio la validación del sistema en condiciones reales de campo y el fortalecimiento de su aplicación a escenarios industriales de mayor escala.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 1. Objetivos

#### 1.1 Objetivo General

Diseñar y validar una metodología inteligente para el monitoreo en tiempo real de parámetros críticos en tanques de tratamiento de crudo mediante el desarrollo de una herramienta sensórica integrada con algoritmos de inteligencia artificial que permitan generar recomendaciones preventivas y correctivas en estaciones de producción de la región Orinoquía.

#### 1.2 Objetivos Específicos

Identificar y caracterizar los parámetros operacionales críticos dentro del tanque que afectan la eficiencia del proceso de tratamiento de crudo.

Diseñar conceptualmente una herramienta sensórica con capacidad de medición interna y continua en tiempo real de variables como nivel, temperatura, interfaces y formación de emulsiones.

Desarrollar un modelo computacional basado en inteligencia artificial que procese la información recolectada, reconozca patrones operativos y genere recomendaciones automáticas de acción.

Validar el sistema propuesto mediante simulaciones y análisis comparativos con datos históricos, evaluando métricas de desempeño como precisión, sensibilidad y capacidad de respuesta.

Documentar los lineamientos técnicos para su futura implementación en campo bajo condiciones reales de operación industrial.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

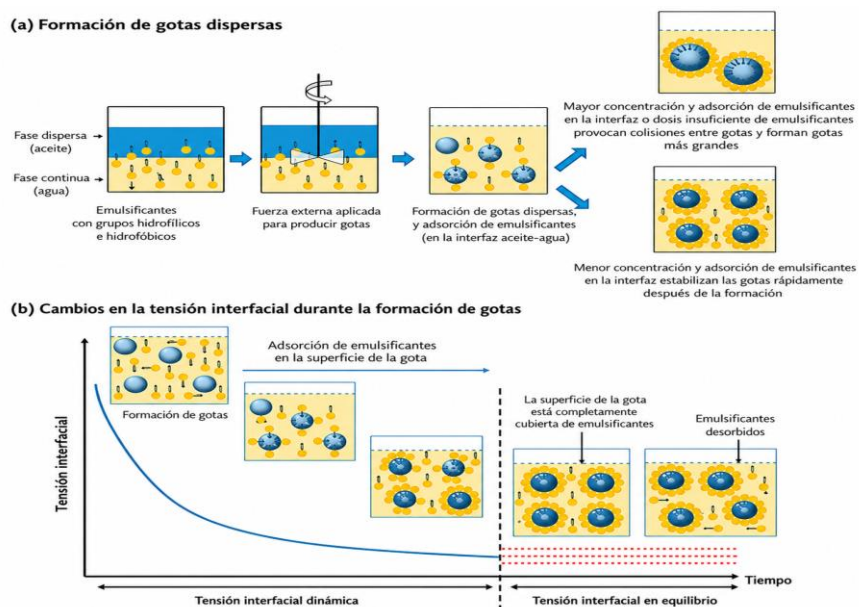
### 2. Cuerpo del Trabajo

#### 2.1 Formaciones Durante La Producción de Petróleo Crudo

Durante la producción de petróleo crudo es común la formación de emulsiones, las cuales son mezclas de líquidos inmiscibles como agua y petróleo. Estas se generan por condiciones de flujo, turbulencia y cambios de presión en el yacimiento, el pozo y las líneas de superficie, provocando la dispersión de gotas de agua dentro del crudo (Ahmadi y Khormali, 2025).

Las emulsiones se estabilizan por la presencia de compuestos naturales como asfaltenos, resinas y sólidos finos, los cuales forman una película interfacial alrededor de las gotas de agua, dificultando su coalescencia y separación (Velásquez y Pereira, 2014). Este fenómeno impacta directamente la eficiencia del proceso de tratamiento del crudo.

**Figura 1**  
*Formación de emulsiones.*



**Nota.** Imagen tomada de Ahmadi y Khormali, 2025.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### **2.2. Presencia De Agua En El Petróleo**

La presencia de agua y sólidos en el crudo afecta su calidad y genera problemas operativos como corrosión, incremento de viscosidad y mayores costos en refinación. Si estas impurezas no son removidas adecuadamente, pueden afectar tanto la operación como el valor comercial del crudo (Saavedra, 2025).

Por esta razón, es fundamental controlar el contenido de BS&W, ya que este parámetro define el cumplimiento de las especificaciones de calidad. Un tratamiento adecuado busca minimizar estas impurezas y maximizar la recuperación de hidrocarburos, haciendo del monitoreo de estas variables un aspecto clave en la operación.

### **2.3 Tanques Gun Barrel**

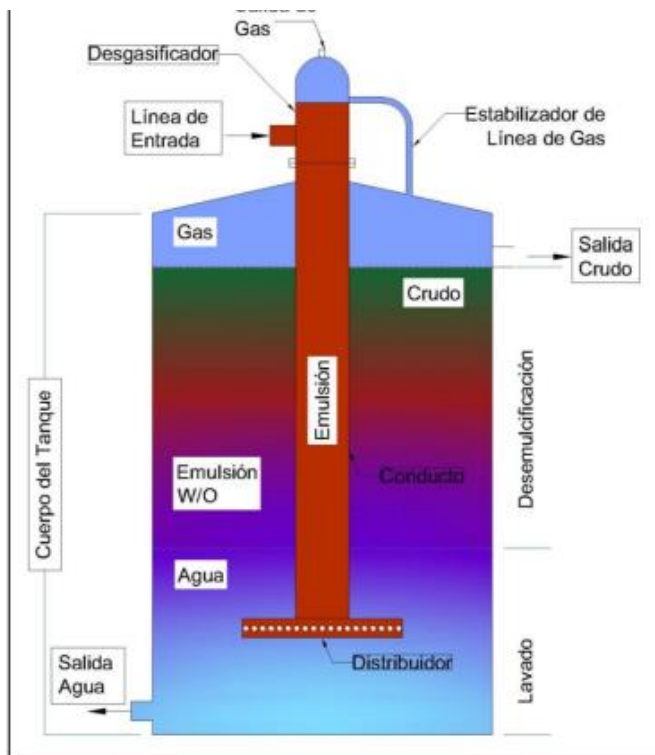
Los tanques tipo Gun Barrel son equipos de separación que operan a presión atmosférica y permiten la segregación de las fases agua-crudo mediante diferencias de densidad y tiempos de residencia. En estos sistemas, el agua se deposita en el fondo del tanque mientras el crudo se acumula en la parte superior (Bonilla y Sarmiento, 2018).

El desempeño del proceso depende de variables como temperatura, contenido de emulsión, sólidos y condiciones operativas, las cuales influyen directamente en la eficiencia de separación. Un adecuado control de estas variables permite mejorar la calidad del crudo tratado y optimizar el proceso.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 2**

*Ilustración Tanque vertical Gun Barrel.*



*Nota.* Imagen tomada de Gallego López y Torres Mercado, 2017.

### 2.4 La ciencia de datos aplicada a industrias

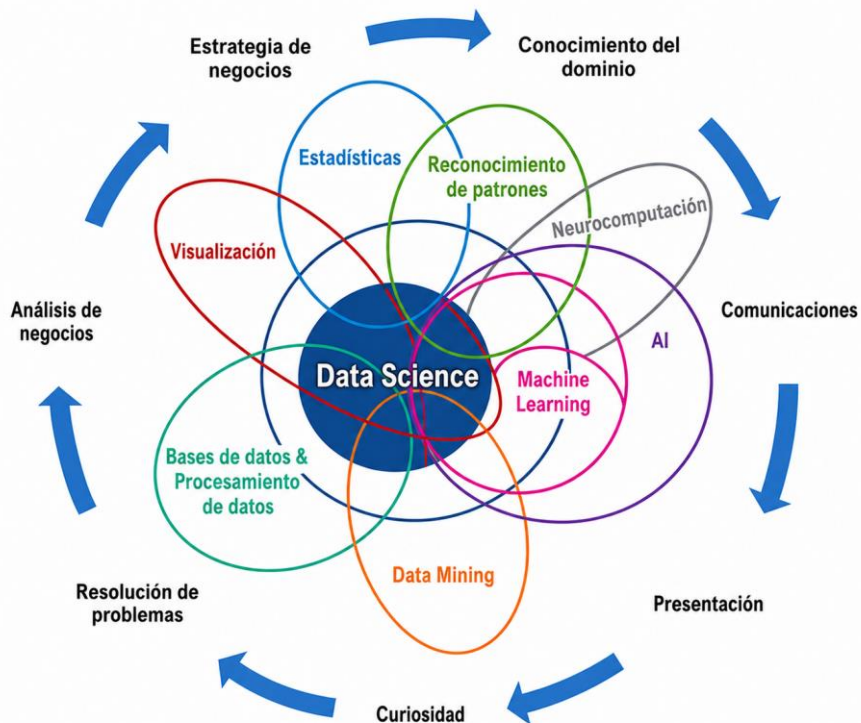
La ciencia de datos permite recolectar, procesar y analizar información con el fin de transformarla en conocimiento útil para la toma de decisiones. En entornos industriales, facilita la identificación de patrones y el análisis de variables operativas a partir de grandes volúmenes de datos (Vizcaya et al., 2023).

Dentro de este enfoque, la inteligencia artificial permite desarrollar modelos capaces de reconocer patrones, clasificar estados del sistema y generar predicciones a partir de datos operacionales. Su aplicación en la industria del petróleo ha demostrado mejoras en eficiencia operativa, reducción de pérdidas y optimización de procesos (Meza, 2023).

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 3**

*Multidisciplinarietà de la ciencia de dato.*



*Nota.* Imagen tomada de Ballesteros y Sánchez 2021.

### 2.5 Marco Legal

La Resolución 651 de 2025, emitida por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), define un marco regulatorio orientado a la modernización de los procesos de medición y seguimiento de los volúmenes de producción de hidrocarburos, incorporando el uso de tecnologías avanzadas, entre ellas la inteligencia artificial (IA). En este contexto, la resolución define la IA como un campo de la informática enfocado en el desarrollo de sistemas capaces de imitar capacidades humanas, analizar grandes volúmenes de datos y generar recomendaciones que respalden la toma de decisiones. Dentro de estas tecnologías se incluyen metodologías como el *Machine Learning*, las cuales permiten que los sistemas aprendan y mejoren su desempeño de manera autónoma a partir de la experiencia, sin requerir una intervención humana constante.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

La normativa también regula los escenarios en los que es permitido el uso de este tipo de herramientas tecnológicas. Su aplicación es permitida para la interpretación de datos de producción en tiempo real, la identificación de patrones y anomalías que contribuyan a mejorar la exactitud y confiabilidad de la información sujeta a fiscalización, así como para la optimización de decisiones operativas y de control, mediante el uso de modelos predictivos y algoritmos que aprovechan los datos generados por sensores y sistemas de monitoreo.

Desde el punto de vista legal, la resolución otorga flexibilidad en la selección de tecnologías y proveedores, siempre que estos cumplan con los requisitos técnicos mínimos establecidos, garantizando así la integridad, trazabilidad y confiabilidad de la información utilizada en los procesos de medición y control.

### **3. Metodología.**

En esta sección se describe la metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo de investigación, la cual se estructuró 5 fases orientadas al cumplimiento de los objetivos propuestos. Dichas etapas abarcan desde la identificación de los parámetros operacionales relevantes dentro del tanque hasta la formulación del diseño conceptual del sistema sensorico y el desarrollo del modelo computacional basado en inteligencia artificial para el análisis de la información obtenida, en la figura 7 se ilustra de manera general la metodología propuesta.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 4**

*Esquema general de la metodología llevada a cabo para la realización del presente estudio.*

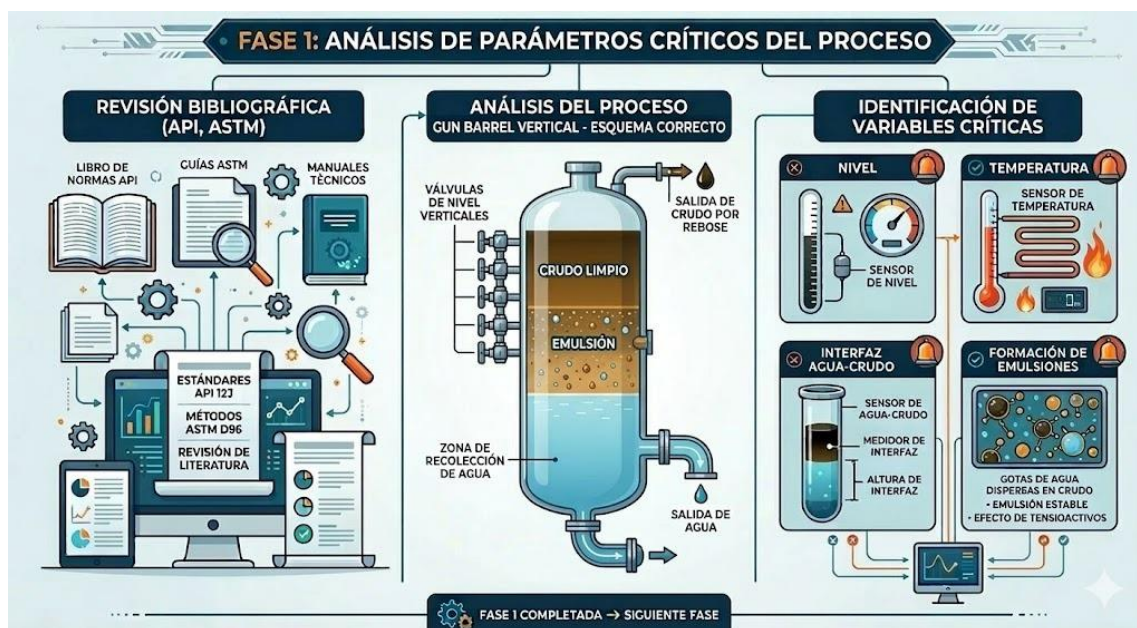


**Nota.** Esquema de la metodología general empleada.

### 3.1 Enfoque para el análisis de parámetros operacionales del tanque.

**Figura 5**

*Fase 1 de desarrollo*



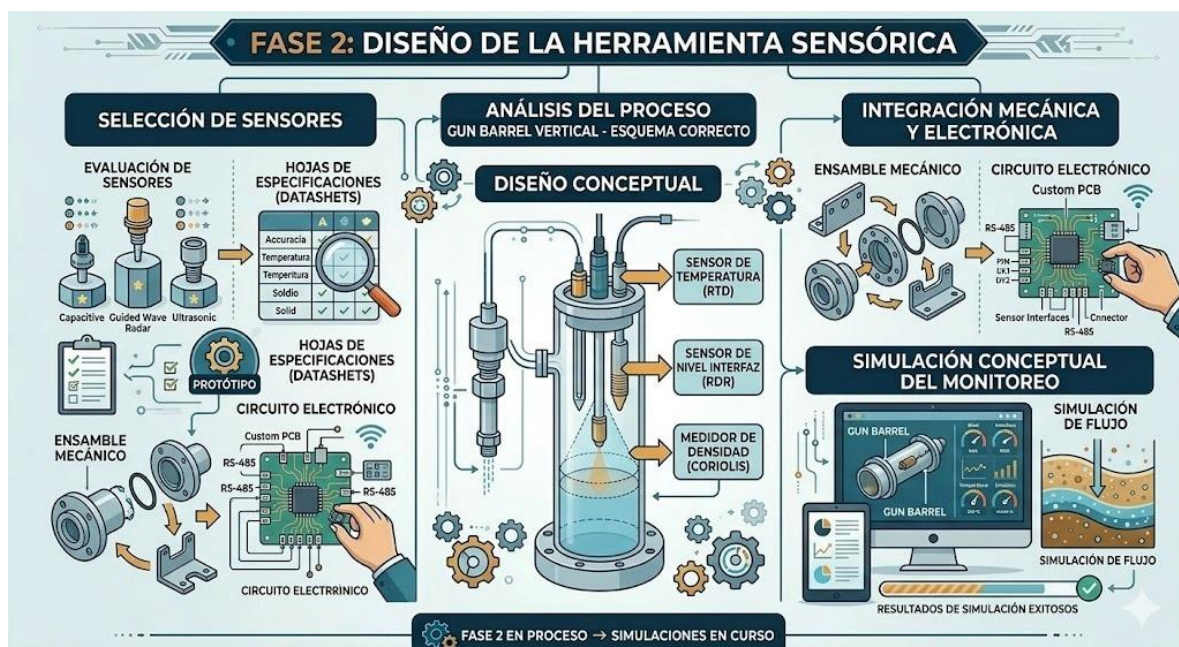
## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

*Nota.* Imagen creada con IA, Esta fase se enfoca en la identificación y caracterización de las variables operacionales que influyen en la eficiencia del proceso de tratamiento de crudo dentro del tanque. Para ello, se realizó inicialmente una revisión bibliográfica basada en normas y estándares técnicos, complementada con manuales y literatura especializada del sector petrolero. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis del proceso dentro del separador tipo *Gun Barrel* vertical, con el fin de comprender el comportamiento de las diferentes fases presentes en el sistema. Finalmente, se identificaron las variables críticas de operación, entre las que destacan el nivel de fluido, la temperatura, la interfaz agua crudo y la formación de emulsiones, las cuales constituyen los parámetros principales a monitorear en el sistema propuesto.

### 3.2 Procedimiento para el diseño conceptual del sistema de monitoreo sensorico.

**Figura 6**

*Fase 2 de desarrollo*



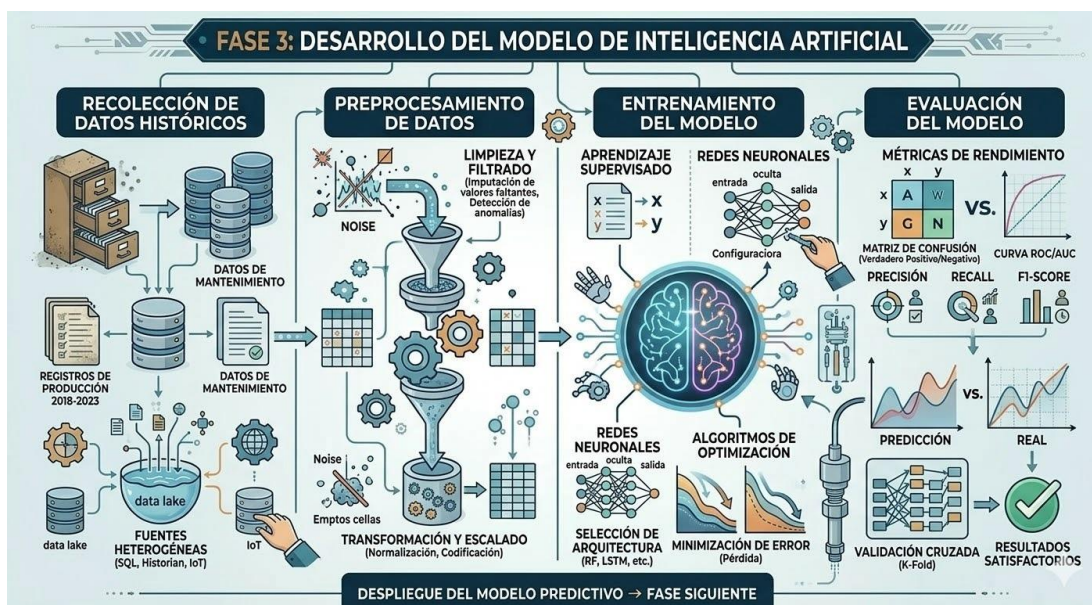
## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

*Nota.* Imagen creada con IA, En esta fase se desarrolló el diseño conceptual de la herramienta sensorica destinada a monitorear las variables críticas identificadas previamente. El proceso inició con la selección de sensores, evaluando diferentes tecnologías y revisando sus hojas de especificaciones técnicas para determinar su idoneidad en condiciones de operación industrial. Posteriormente, se definió el diseño conceptual del sistema de medición, incluyendo sensores de temperatura, nivel, interfaz y densidad. Además, se planteó la integración mecánica y electrónica del sistema, considerando la arquitectura del circuito electrónico y la comunicación entre sensores. Finalmente, se realizó una simulación conceptual del monitoreo, con el propósito de analizar el comportamiento esperado del sistema antes de su implementación.

### 3.3 Proceso de desarrollo del modelo de inteligencia artificial.

**Figura 7**

*Fase 3 de desarrollo*



*Nota.* Imagen creada con IA, Esta fase corresponde al desarrollo del modelo computacional basado en inteligencia artificial, encargado de procesar la información obtenida

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

por el sistema sensorico. En primer lugar, se realizo la recolección de datos históricos provenientes de registros operacionales y sistemas de monitoreo industrial. Posteriormente, estos datos fueron sometidos a un proceso de preprocesamiento, que incluyó limpieza, filtrado de ruido, tratamiento de valores faltantes y normalización de la información. A continuación, se llevo a cabo el entrenamiento del modelo de aprendizaje automatico, mediante la selección de arquitecturas de redes neuronales y algoritmos de optimización. Finalmente, el modelo fue evaluado utilizando métricas de desempeño como precisión, *recall* y F1-score, con el fin de validar su capacidad para identificar patrones operativos y generar predicciones confiables.

### 3.4 Estrategia de validación mediante simulación y comparación de datos.

**Figura 8**

*Fase 4 de desarrollo*



*Nota.* Imagen creada con IA, En esta etapa se realizó la validación del sistema desarrollado, mediante la simulación de diferentes escenarios operacionales. Estas simulaciones permitieron analizar el comportamiento del modelo frente a condiciones normales y posibles

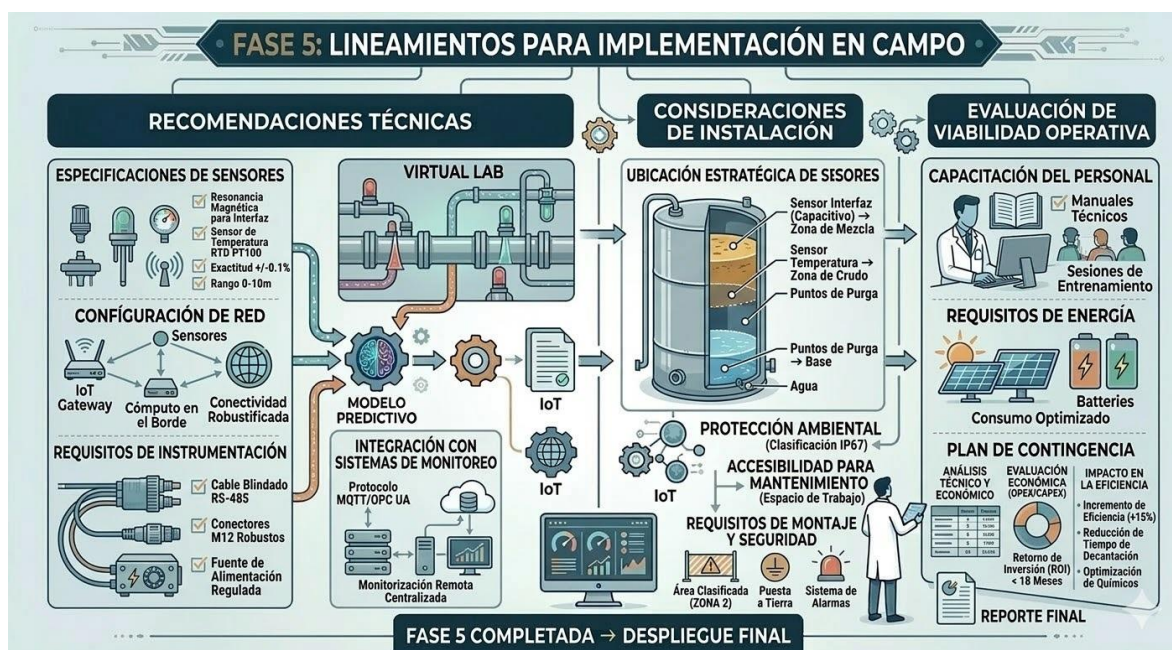
## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

anomalías en el proceso. Posteriormente, se efectuó una comparación entre los resultados obtenidos por el modelo y los datos históricos disponibles, con el fin de verificar la concordancia entre ambos. Finalmente, se evaluó el desempeño del sistema utilizando métricas cuantitativas como precisión, sensibilidad y error del modelo, lo que permitió determinar la confiabilidad y capacidad de respuesta del sistema propuesto.

### 3.5 Criterios para la definición de lineamientos de implementación.

**Figura 9**

*Fase 5 de desarrollo*



*Nota.* Imagen creada con IA, La última fase corresponde a la definición de los lineamientos técnicos necesarios para la futura implementación del sistema en condiciones reales de operación industrial. En esta etapa se establecieron recomendaciones técnicas relacionadas con la selección de sensores, la configuración de la red de comunicación y los requisitos de instrumentación. Asimismo, se consideraron aspectos clave para la instalación, como la

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

ubicación estratégica de los sensores dentro del tanque, las condiciones ambientales y los requisitos de seguridad industrial. Finalmente, se evaluó la viabilidad operativa del sistema, incluyendo aspectos como capacitación del personal, requerimientos energéticos y análisis de impacto en la eficiencia del proceso.

### 4. Desarrollo y análisis de resultados.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las actividades desarrolladas para el cumplimiento de los objetivos propuestos. Para ello, se tomaron como referencia datos suministrados por la compañía Ecopetrol, los cuales fueron adaptados y ajustados con el fin de ser utilizados en el desarrollo del presente estudio de investigación.

#### 4.1 Parámetros operacionales críticos y su comportamiento en el proceso.

**Tabla 1**

*Caracterización del tanque de estudio TK1707*

| <b>Categoría</b>  | <b>Parámetro</b>                   | <b>Descripción</b>   | <b>Unidades</b> | <b>Valor medido</b> | <b>Importancia / Caracterización</b>                            |
|-------------------|------------------------------------|--|-----------------|---------------------|---|
| <b>Geométrico</b> | Altura total del tanque            | Distancia desde el fondo hasta la parte superior del tanque    | Ft              | 40                  | Determina el volumen total y el tiempo de residencia del fluido |
| <b>Geométrico</b> | Diámetro del tanque                | Ancho del tanque cilíndrico                                    | Ft              | 95                  | Define el volumen de almacenamiento y capacidad de separación   |
| <b>Geométrico</b> | Volumen del tanque                 | Capacidad total del tanque                                     | Bbl             | 50000               | Indica la capacidad máxima de almacenamiento                    |
| <b>Geométrico</b> | Espacio libre superior (freeboard) | Espacio entre el nivel máximo del fluido y el techo del tanque | Ft              | 5                   | Evita sobrellenado y permite expansión del fluido               |
| <b>Geométrico</b> | Altura de salida de crudo          | Nivel donde se ubica la tubería de salida del petróleo         | Ft              | 32                  | Permite retirar el petróleo separado sin arrastrar agua         |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

|                   |                           |  |    |     |   |
|-------------------|---------------------------|--|----|-----|---|
| <b>Geométrico</b> | Altura de drenaje de agua | Posición de la válvula de drenaje de agua              | Ft | 3   | Permite retirar el agua acumulada en el fondo     |
| <b>Geométrico</b> | Altura de la interfase    | Distancia desde el fondo hasta la interfase agua-crudo | Ft | 17  | Permite controlar la correcta separación de fases |
| <b>Geométrico</b> | Espesor de emulsión       | Altura de la capa de emulsión entre agua y petróleo    | Ft | 1,5 | Indica problemas de separación o emulsión estable |

*Nota.* Fuente: Elaboración propia a partir de diagramas P&ID del tanque ATK-7212 y datos operacionales provenientes de reportes de producción de la Estación Castilla 2 (Ecopetrol).

| <b>Categoría</b>         | <b>Parámetro</b>                  | <b>Descripción</b>                                     | <b>Unidades</b> | <b>Valor medido</b> | <b>Importancia / Caracterización</b>                  |
|--------------------------|-----------------------------------|--|-----------------|---------------------|---|
| <b>Geométrico</b>        | Distancia entre válvulas          | Separación vertical entre válvulas de drenaje y salida | in              | 25                  | Permite un control adecuado del nivel de líquidos     |
| <b>Geométrico</b>        | Distancia entre sensores de nivel | Separación entre sensores de control de nivel          | in              | 25                  | Permite detectar niveles bajo, normal, alto y crítico |
| <b>Proceso</b>           | Nivel total del tanque            | Altura total del fluido dentro del tanque              | ft              | 35                  | Controla el tiempo de residencia del fluido           |
| <b>Proceso</b>           | Nivel de agua                     | Altura de la capa de agua separada                     | ft              | 15                  | Permite controlar el drenaje de agua                  |
| <b>Proceso</b>           | Nivel de petróleo                 | Altura de la capa de crudo separado                    | ft              | 20                  | Indica volumen de petróleo tratado                    |
| <b>Proceso</b>           | Nivel de emulsión                 | Espesor de la zona emulsificada                        | ft              | 1,5                 | Indica estabilidad de emulsiones                      |
| <b>Proceso</b>           | Tiempo de residencia              | Tiempo que permanece el fluido dentro del tanque       | hr              | 12                  | Fundamental para la separación gravitacional          |
| <b>Proceso</b>           | Caudal de entrada                 | Flujo de mezcla agua-crudo que entra al tanque         | bpd             | 160000              | Determina la carga del sistema                        |
| <b>Proceso</b>           | Caudal de salida de crudo         | Flujo de petróleo tratado que sale del tanque          | bpd             | 50000               | Permite mantener balance de masa                      |
| <b>Proceso</b>           | Caudal de drenaje de agua         | Flujo de agua retirada del tanque                      | bpd             | 115000              | Evita acumulación de agua                             |
| <b>Calidad del crudo</b> | BS&W                              | Porcentaje de agua y sedimentos en el petróleo         | %               | 0,45                | Indicador principal de eficiencia de separación       |
| <b>Calidad del crudo</b> | Contenido de agua                 | Agua presente en el crudo                              | %               | 0,38                | Indica eficiencia del proceso de separación           |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

|                          |                         |  |      |      |  |
|--------------------------|-------------------------|--|------|------|--|
| <b>Calidad del crudo</b> | Contenido de sedimentos | Cantidad de sólidos presentes              | %    | 0,07 | Indica presencia de arena o partículas       |
| <b>Fisicoquímico</b>     | Temperatura del fluido  | Temperatura de la mezcla dentro del tanque | °F   | 185  | Influye en viscosidad y separación           |
| <b>Fisicoquímico</b>     | Densidad del crudo      | Masa por volumen del petróleo              | °API | 14   | Determina diferencia de densidad con el agua |
| <b>Fisicoquímico</b>     | Viscosidad del crudo    | Resistencia al flujo del petróleo          | cP   | 150  | Crudos viscosos separan más lento            |
| <b>Fisicoquímico</b>     | pH del agua producida   | Acidez o alcalinidad del agua              | pH   | 7,5  | Afecta corrosión y estabilidad química       |

**Tabla 3**

*Continuación caracterización del tanque de estudio TK1707*

| <b>Categoría</b>     | <b>Parámetro</b>               | <b>Descripción</b>                               | <b>Unidades</b>           | <b>Valor medido</b> | <b>Importancia / Caracterización</b>       |
|----------------------|--------------------------------|--|---------------------------|---------------------|--|
| <b>Químico</b>       | Dosificación de demulsificante | Cantidad de químico usado para romper emulsiones | ppm                       | 40                  | Mejora la separación agua-aceite           |
| <b>Operacional</b>   | Presión del tanque             | Presión interna del tanque                       | psi                       | 14,7                | Generalmente cercana a presión atmosférica |
| <b>Operacional</b>   | Estado de válvulas             | Posición de válvulas de drenaje y salida         | binario (abierta/cerrada) | abierta             | Controla el flujo de fluidos               |
| <b>Operacional</b>   | Nivel máximo operativo         | Nivel máximo permitido para operación segura     | ft                        | 38                  | Evita sobrellenado                         |
| <b>Operacional</b>   | Nivel mínimo operativo         | Nivel mínimo para mantener operación             | ft                        | 16                  | Evita entrada de aire o vacío              |
| <b>Mantenimiento</b> | Acumulación de sedimentos      | Cantidad de sólidos depositados en el fondo      | in                        | 10                  | Reduce volumen efectivo del tanque         |
| <b>Mantenimiento</b> | Corrosión del tanque           | Estado del material del tanque                   | mpy (mils per year)       | 2                   | Indica deterioro estructural               |

*Nota.* Fuente: Elaboración propia a partir de diagramas P&ID del tanque ATK-7212 y datos operacionales provenientes de reportes de producción de la Estación Castilla 2 (Ecopetrol).

A partir de la caracterización presentada, se determinó que las variables de mayor relevancia para el monitoreo del tanque TK1707 son aquellas que influyen directamente en la

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

calidad del crudo tratado y en la estabilidad interna del proceso de separación. Entre ellas, se destacan el BS&W en rebose, la emulsión, la interfase agua-crudo, la temperatura del fluido y la presencia de sólidos, por ser las variables que mejor representan el estado operacional del sistema y el desempeño del tratamiento.

Estas variables fueron priorizadas debido a que sus variaciones pueden generar pérdida de eficiencia en la separación, alteraciones en la calidad del crudo y mayores riesgos de operación fuera de especificación. En particular, el BS&W se asumió como el principal indicador de calidad, mientras que la emulsión, la interfase y la temperatura se consideraron variables clave para detectar cambios internos del proceso antes de que se reflejen en el rebose. En consecuencia, esta etapa permitió definir los parámetros base sobre los cuales se estructuró tanto el diseño conceptual de la herramienta sensorica como el modelo de inteligencia artificial desarrollado en el presente trabajo

### **4.2 Sistema sensorico propuesto y su funcionamiento dentro del tanque.**

Para la elaboración de la herramienta sensorica se tomó como referencia el sensor KAMControls, para ello, se realizaron adaptaciones al sensor, creando una herramienta enfocada en lectores dieléctricos distribuidos a lo largo del tanque, que permiten realizar mediciones en tiempo real de parámetros críticos de control como perfiles de fluido, detección de interfaz, medición de emulsión, niveles de temperatura, mediciones de nivel, y adquisición y comunicación de datos.

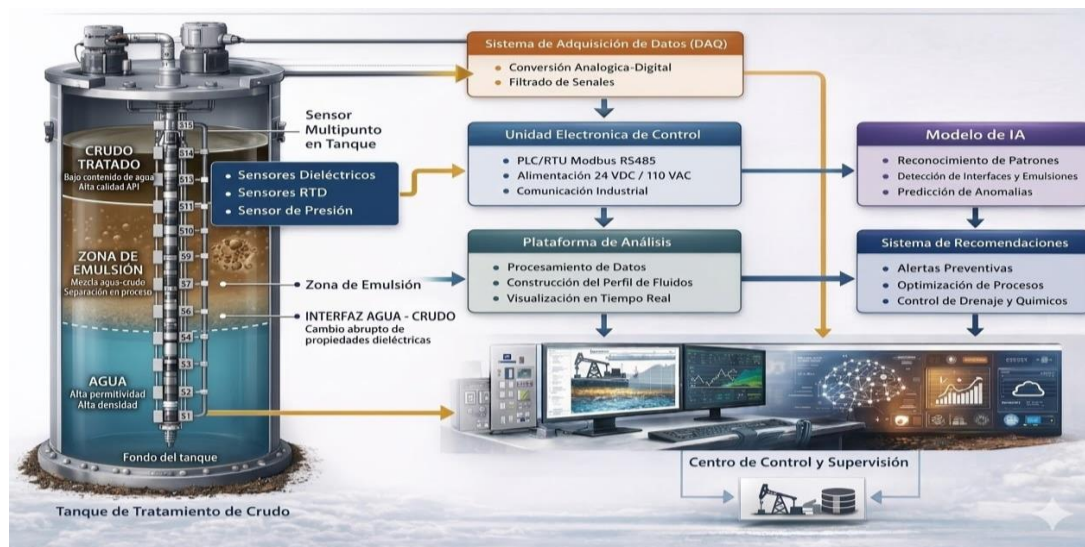
*Nota.* Imagen creada con IA, la siguiente representación gráfica presenta de manera esquemática la arquitectura de elaboración de la herramienta sensorica estructurada para el presente estudio.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

La herramienta diseñada integra un arreglo vertical de 15 sensores de perfil de fluido basados en tecnología dieléctrico-capacitiva multipunto. Estos sensores se encuentran distribuidos a lo largo del tanque con una separación de entre 400 y 500 mm, permitiendo registrar la variación de la constante dieléctrica entre el agua y el petróleo. Gracias a su disposición a distintas alturas, el sistema es capaz de localizar la interfaz agua-crudo al identificar cambios abruptos de permitividad entre dos sensores consecutivos. Asimismo, para la caracterización de emulsiones, se analizan los datos de los sensores ubicados en la zona intermedia del tanque; esto permite determinar el porcentaje de agua emulsionada mediante un modelo de mezcla dieléctrica definida.

**Figura 10**

*Grafica explicativa del hardware del capturador de información*



El monitoreo térmico se realiza a través de sensores RTD (Resistance Temperature Detector), los cuales evalúan el perfil de temperatura del fluido estableciendo una relación resistencia-temperatura. Complementariamente, la medición del nivel total se efectúa mediante un sensor de presión hidrostática instalado en la base del tanque. Este dispositivo calcula la altura

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

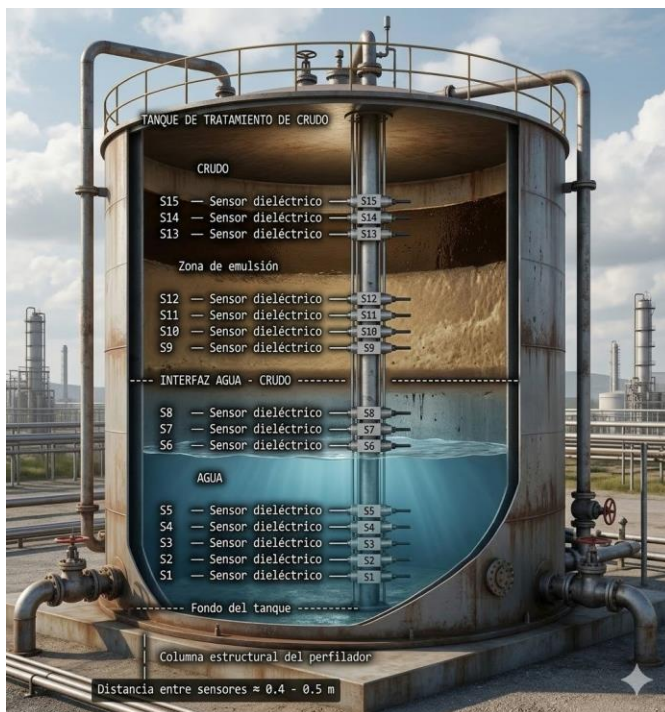
de la columna de fluido a partir de la presión ejercida, incorporando un ajuste de densidad dinámico que compensa las variaciones de la masa volumétrica del crudo y el agua en función de la temperatura medida por los RTD, asegurando así la precisión de la lectura de nivel. Las evaluaciones llevadas a cabo por el sensor se realizan mediante expresiones matemáticas, las cuales están relacionadas según la variable en la tabla 4. Antes de su uso, las señales críticas, como la presión y las capacitancias cerca de las interfaces, pasan por un filtro de estabilidad digital para eliminar ruido de alta frecuencia y fluctuaciones espúreas, garantizando datos consistentes para el control.

Finalmente, el sistema integra una tarjeta electrónica de adquisición y comunicación. Este módulo recibe las señales analógicas de los sensores y los datos operacionales, transformándolos a un formato digital. Como paso previo al análisis avanzado en un sistema de Inteligencia Artificial (IA), los datos son sometidos a un proceso de normalización para ML, escalando las diferentes variables (temperatura, presión, permitividad) a rangos uniformes para optimizar el entrenamiento y la capacidad predictiva de los modelos de aprendizaje automático. La figura 14 ilustra la acomodación del sensor dentro del tanque de lavado, permitiendo observar la posición de los sensores y su funcionalidad dentro del sistema.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 11**

*incorporación del sensor MJ24 en el tanque de lavado Gun Barrel TK1707*



*Nota.* Imagen creada con IA, la siguiente imagen permite obtener una simulación gráfica del proceso de incorporación del sensor elaborado (MJ24), dentro del tanque de lavado de estudio, reflejando la posición y tipo de sensor dentro del tanque.

**Tabla 4**

*Expresiones matemáticas implementadas por el sensor de monitoreo MJ24*

|   |  |
|---|--|
| Constante dieléctrica entre agua y petróleo | $C = \frac{\epsilon A}{d}$                           |
| Permitividad                                | $\Delta\epsilon = \epsilon_{i+1} - \epsilon_i$       |
| Mezcla dieléctrica                          | $\epsilon_m = \Phi_w \epsilon_w + \Phi_o \epsilon_o$ |
| Relación resistencia – temperatura          | $R_T = R_0(1 + \alpha T)$                            |
| Presión generada por columna de fluido      | $P = \rho g h$                                       |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Ajuste de Densidad</b>    | $\rho_T = \rho_{ref}[1 - \beta(T - T_{ref})]$      |
| <b>Filtro de Estabilidad</b> | $y[n] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x[n - i]$     |
| <b>Normalización para ML</b> | $x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$ |

*Nota.* Fuente: Elaboración propia con base en principios físicos de instrumentación y en pruebas de perfilamiento realizadas con sensor de referencia en el tanque ATK-7212 (Campo Castilla, Ecopetrol).

La tabla muestra las expresiones matemáticas utilizadas por el sensor conceptual para la captura, lectura y transmisión de los datos obtenidos dentro del tanque. La descripción detallada de dichas expresiones se encuentra en el **Apéndice A**. Con el fin de ilustrar el funcionamiento cuantitativo de la herramienta sensorica propuesta, en el **Apéndice C** se presentan casos numéricos aplicados al tanque de estudio TK1707, en los cuales se muestra el procesamiento de variables captadas por los sensores, su interpretación operativa y su aporte a la lógica de decisión del sistema.

### 4.3 Modelo de inteligencia artificial y su desempeño operativo.

Con el propósito de cumplir el objetivo de desarrollar un modelo computacional basado en inteligencia artificial que procese la información recolectada, reconozca patrones operativos y genere recomendaciones automáticas de acción, se diseñó una arquitectura integral de análisis de datos. Este modelo permite transformar datos históricos y operacionales en información relevante para la toma de decisiones en tiempo real. Para ello, se empleó un enfoque de aprendizaje supervisado basado en *Gradient Boosting*, seleccionado por su alta capacidad para modelar relaciones no lineales, su robustez frente a ruido en los datos y su desempeño superior en problemas de clasificación multivariable.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 4.3.1 Selección del algoritmo de inteligencia artificial.

Con el propósito de desarrollar un modelo computacional capaz de procesar la información recolectada, reconocer patrones operativos y generar recomendaciones automáticas de acción, se llevó a cabo una etapa inicial de selección del algoritmo de inteligencia artificial más adecuado para el problema de clasificación planteado en este estudio.

Para ello, se evaluaron cuatro algoritmos de aprendizaje supervisado comúnmente utilizados en problemas de clasificación sobre datos tabulares industriales: árbol de decisión, *Random Forest*, *Gradient Boosting* y Red Neuronal tipo *Multilayer Perceptron* (MLP). Todos los modelos fueron entrenados y evaluados sobre el mismo conjunto de datos, construido a partir de variables críticas del sistema como BS&W, contenido de emulsión, sólidos y temperatura, asociadas al estado operacional de cada válvula del tanque. El conjunto de datos fue dividido mediante una participación 80/20 para entrenamiento y prueba, garantizando que no existiera cruce de información entre ambos subconjuntos. La comparación de desempeño se realizó mediante métricas Accuracy y F1-score macro, por tratarse de un problema de clasificación multiclase orientado a distinguir estados operacionales de alerta y críticos.

La tabla 5 presenta los resultados comparativos obtenidos para cada uno de los algoritmos evaluados.

**Tabla 5**

*Comparación de modelos de inteligencia artificial evaluados.*

| <b>Algoritmo</b>         | <b>Accuracy (%)</b> | <b>F1-macro (%)</b> | <b>Resultado</b> | <b>Observación</b>   |
|--------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--|
| <b>Árbol de Decisión</b> | ~94                 | ~93                 | Descartado       | Tendencia al sobreajuste con profundidades altas y límites de decisión rígidos |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

|                          |     |     |                     |  |
|--------------------------|-----|-----|---------------------|--|
| <b>Random Forest</b>     | ~96 | ~95 | Segunda opción      | Alto desempeño en datos industriales tabulares y buena estabilidad general             |
| <b>Gradient Boosting</b> | ~96 | ~95 | <b>Seleccionado</b> | Mejor comportamiento en transiciones críticas y construcción secuencial autocorrectiva |
| <b>Red Neuronal MLP</b>  | ~79 | ~70 | Descartado          | Menor desempeño y menor interpretabilidad para el contexto industrial                  |

*Nota.* Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales de laboratorio del tanque ATK-7212 (Campo Castilla, Ecopetrol), utilizados para el entrenamiento, validación y comparación de modelos de inteligencia artificial.

que estas representan la región de mayor sensibilidad operacional para la toma de decisiones preventivas.

A partir de los resultados obtenidos, se observó que tanto *Random Forest* como *Gradient Boosting* presentaron desempeños globales muy similares en términos de Accuracy y F1-score. Sin embargo, la selección final no se basó únicamente en estas métricas, sino también en el comportamiento del modelo frente a las clases de mayor criticidad operacional.

En este sentido, *Gradient Boosting* mostró un mejor desempeño en la diferenciación entre los estados de alerta y crítico, reduciendo errores de clasificación en una zona clave para la operación del tanque. Esta ventaja se asocia a su construcción secuencial, en la que cada árbol corrige progresivamente los errores del anterior, permitiéndole captar con mayor sensibilidad transiciones graduales entre estados operacionales.

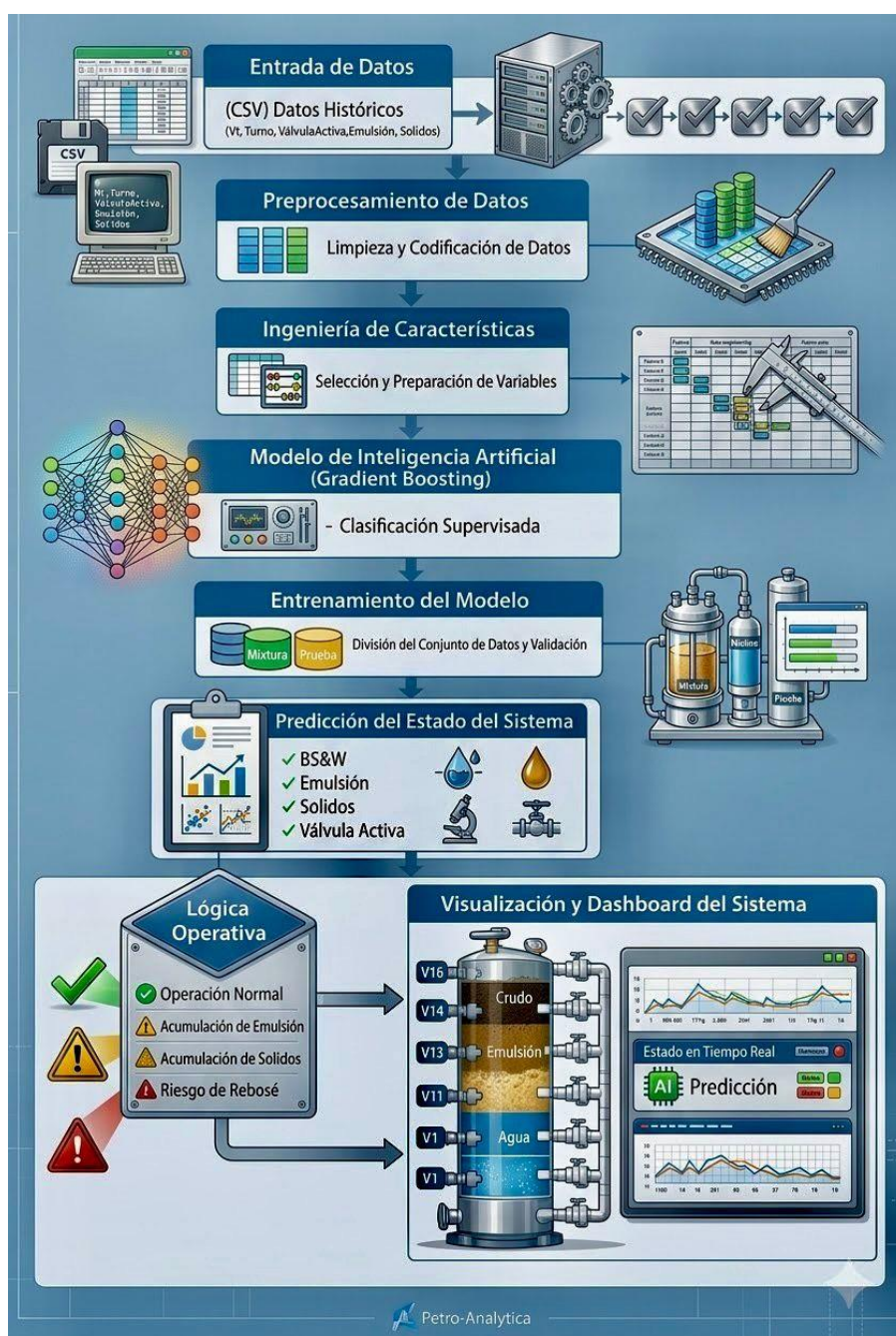
Además, su aplicación resultó adecuada para este estudio debido a que trabaja eficientemente con datos tabulares industriales de tamaño moderado, ofrece robustez frente al ruido, no requiere un escalamiento estricto de variables y permite interpretar la importancia relativa de cada variable de entrada.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Por el contrario, la Red Neuronal MLP presentó el menor desempeño entre los modelos evaluados, lo que confirmó que no era la alternativa más conveniente para este caso. En consecuencia, se seleccionó *Gradient Boosting* como el algoritmo más apropiado para el desarrollo del sistema inteligente de monitoreo.

**Figura 12**

*Arquitectura del modelo computacional basado en Gradient Boosting para el monitoreo inteligente y soporte a decisiones en el sistema de tratamiento de crudo.*



## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

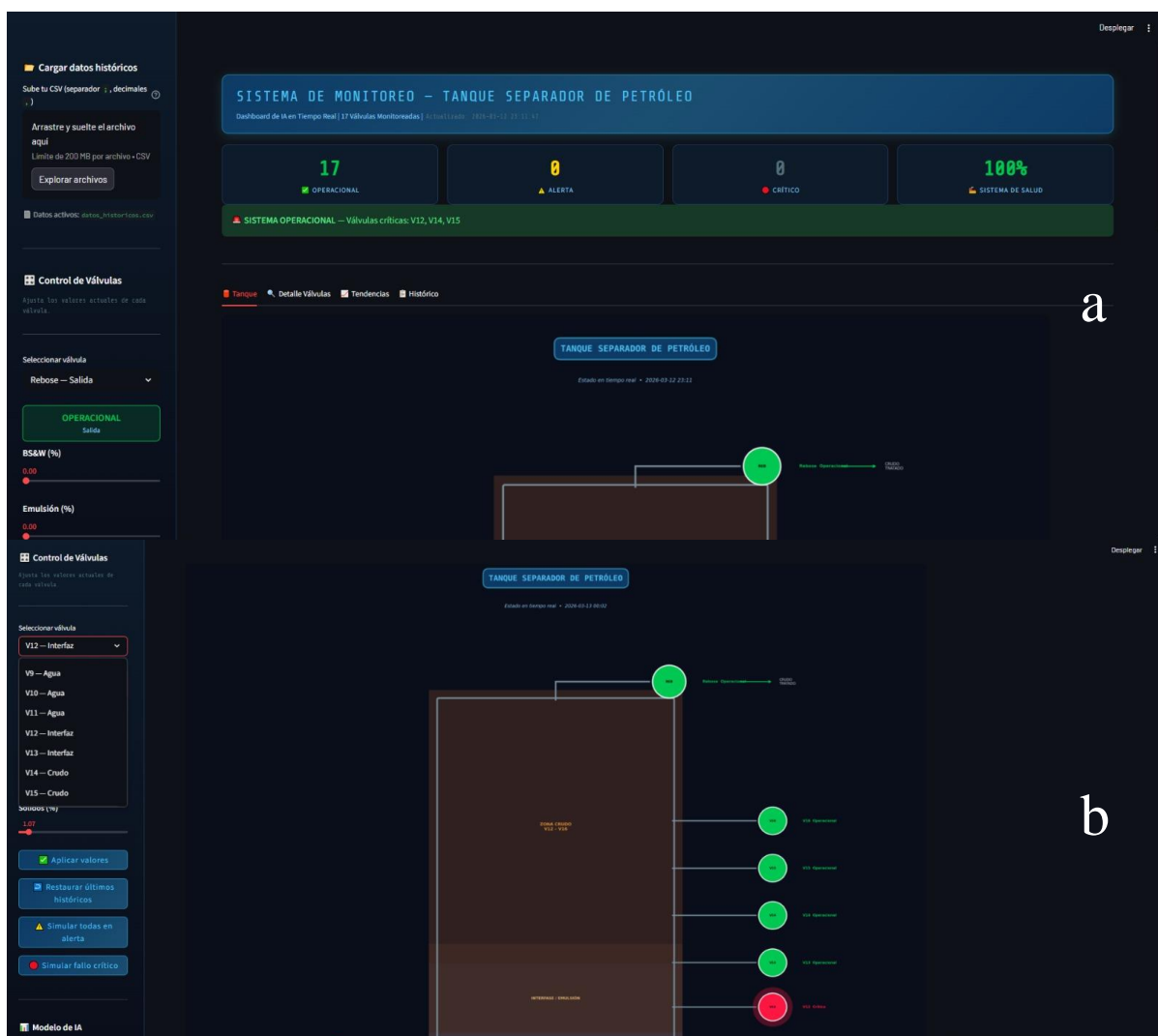
*Nota.* Imagen creada con IA, La figura presenta la arquitectura del modelo computacional, desde la adquisición y preprocesamiento de datos hasta la predicción del estado del sistema mediante un modelo de *Gradient Boosting*. El sistema permite identificar patrones operativos y generar recomendaciones automáticas en tiempo real para la toma de decisiones. El **Apéndice C** incluye casos numéricos representativos del flujo de datos desde la medición sensorica hasta la clasificación operativa, con el propósito de evidenciar cómo los parámetros físicos medidos se convierten en variables de entrada para el modelo de inteligencia artificial y, posteriormente, en recomendaciones automáticas de operación.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 4.3.2 Desarrollo de la herramienta computacional

**Figura 13**

*Imagen de entrada de la herramienta de inteligencia artificial desarrollada.*

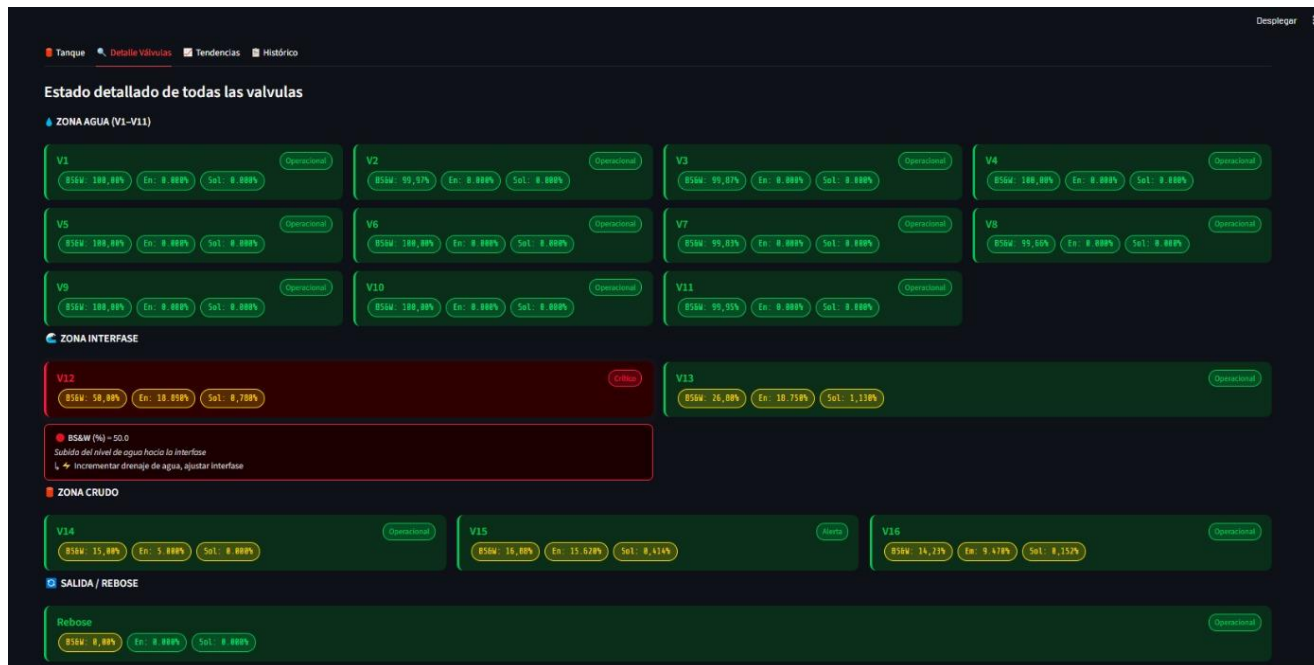


*Nota. Fuente: Autor. (a) Imagen de entrada de la herramienta basada en IA elaborada. (b) proceso de incorporación de datos.*

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 14**

*Sección detalle de válvulas.*

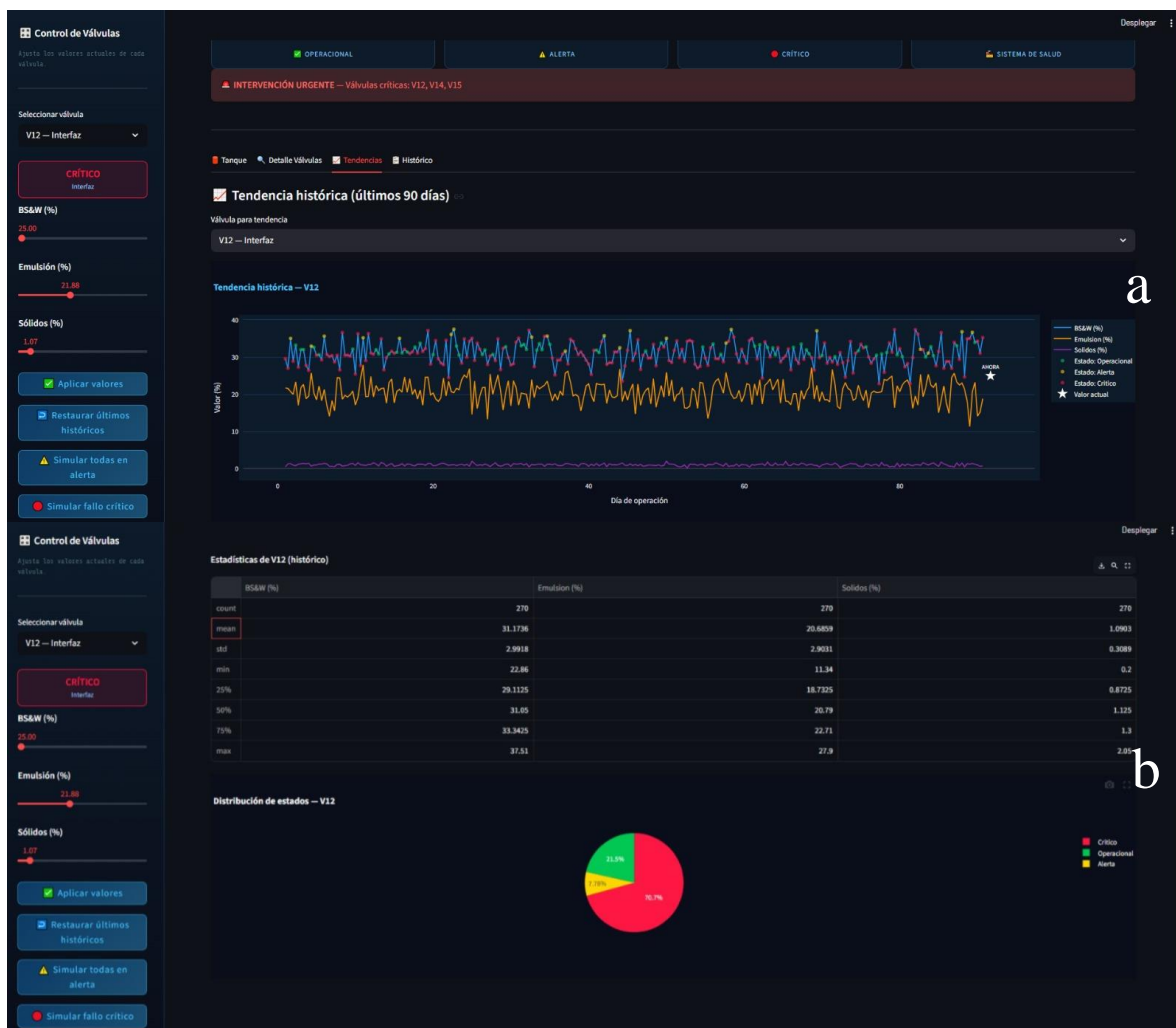


*Nota.* Fuente: Autor. Aquí se observa el estado de las válvulas y su distribución en el tanque, ilustrándose en color verde, aquellas que se encuentran dentro rangos, por su parte, en amarillo se detallan aquellas válvulas operacionales pero que se encuentran en estado de alerta. Finalmente, en rojo se presentan las válvulas fuera de rangos aceptables, y sus recomendaciones operacionales respectivas.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 15**

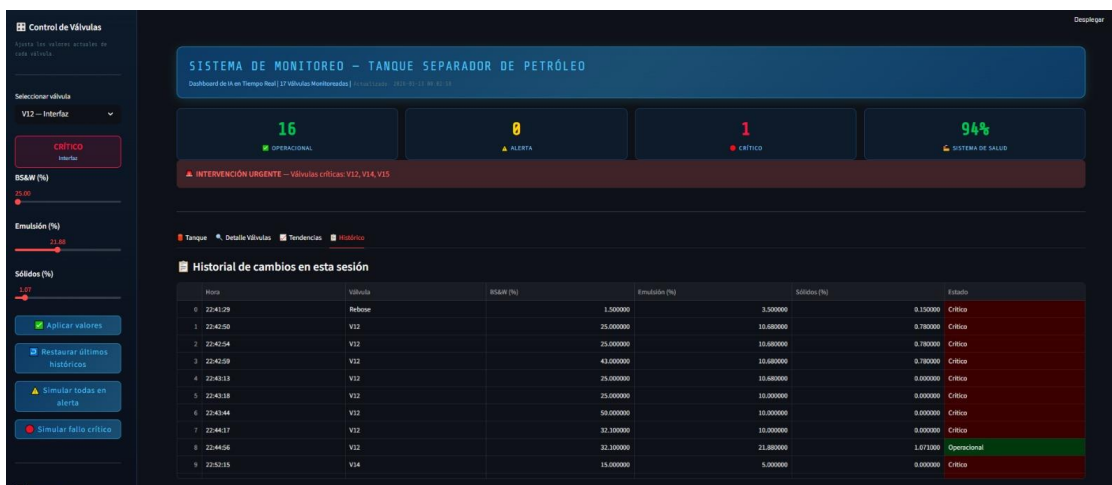
*Sección de tendencias.*



Nota. Fuente: Autor. (a) Esta sección ilustra la tendencia y comportamiento del tanque en la válvula seleccionada, durante un periodo de tiempo transcurrido de 90 días. (b) se ilustra el número de datos en cada uno de los parámetros junto con ciertos valores estadísticos – valor mínimo y valor máximo, entre otros- para el histórico de datos; el diagrama circular representa los porcentajes de datos en cada una de sus especificaciones (operacional, alerta y crítico).

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

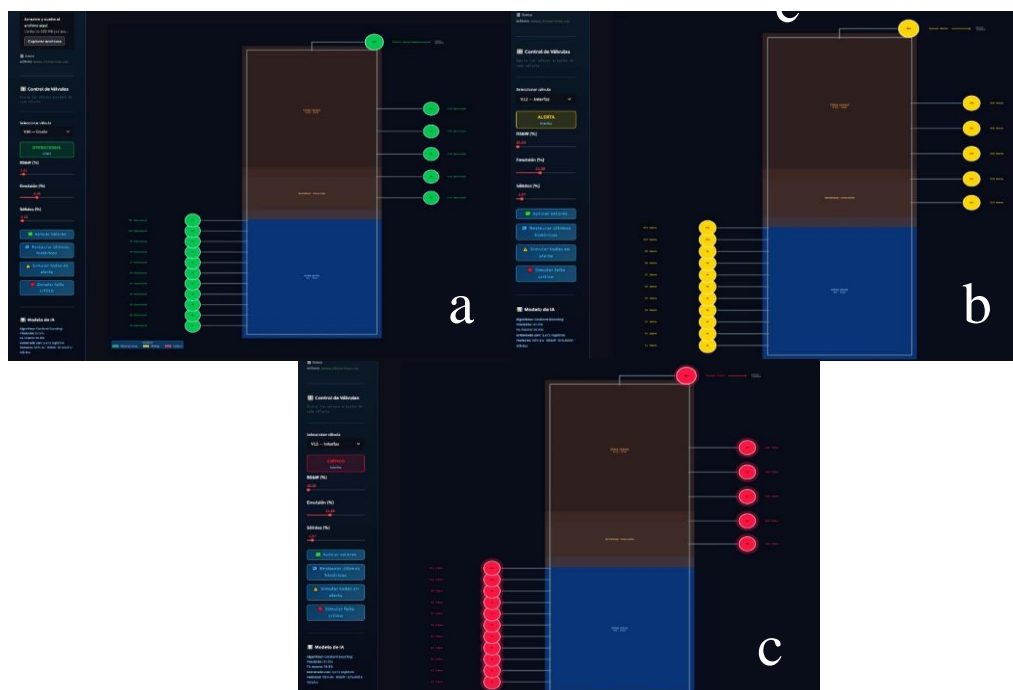
Figura 16  
Sección histórica de datos.



Nota. Fuente: autor. Esta sección plasma el historial de los cambios presentados por cada válvula

Figura 17

Especificaciones de ensayo.



Nota. Fuente: Autor. Válvulas dentro de rangos operacionales. (b) válvulas en estado de alerta. (c) válvulas

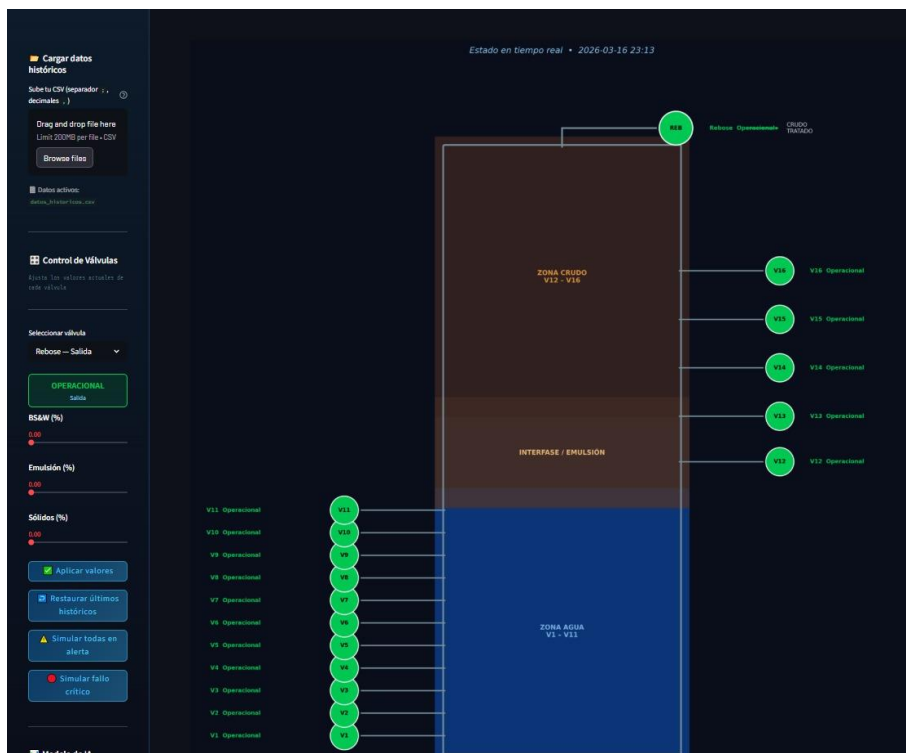
## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 4.4 Validación del sistema y análisis de métricas de desempeño.

#### 4.4.1 Simulación bajo condiciones operacionales óptimas

**Figura 18**

*Simulación tanque TK1707 bajo especificaciones operacionales.*

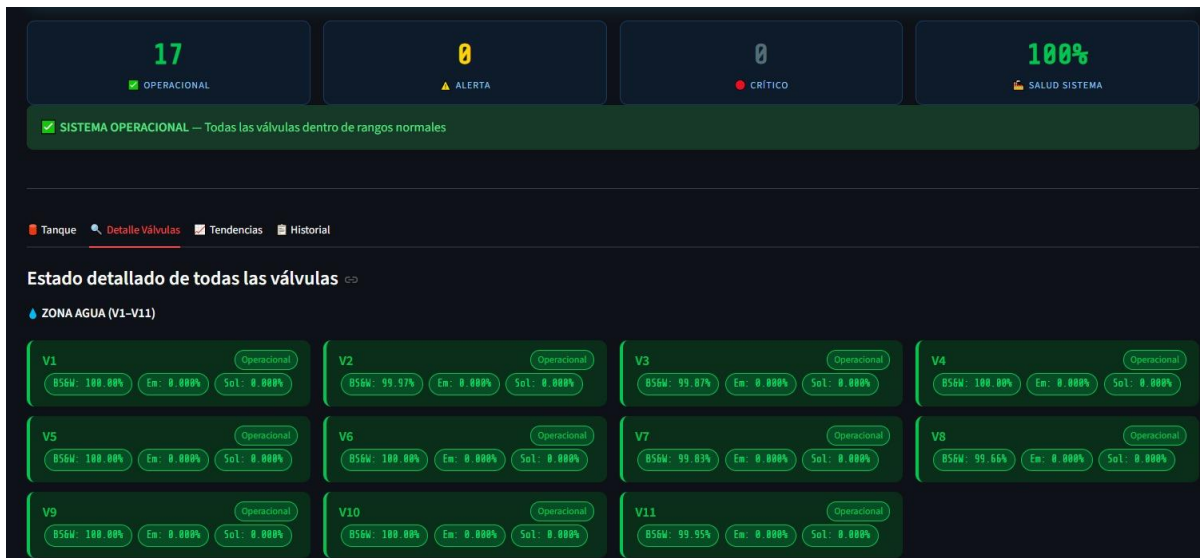


*Nota. Fuente: Autor.* Simulación realizada en tanque de estudio TK 1707 con todas las válvulas dentro de los rangos operacionales.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 19**

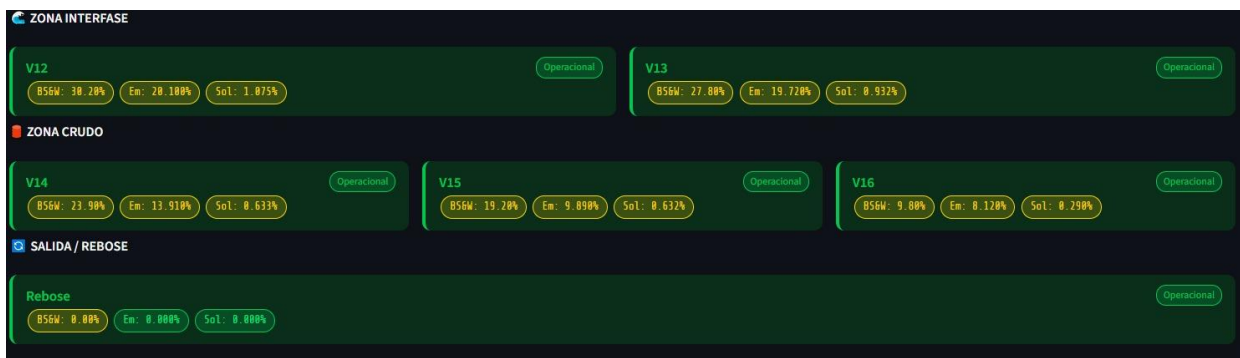
*Monitoreo de la zona de agua (Válvula 1 – Válvula 11), caso operacional*



*Nota.* Fuente: Autor. Detalle del estado de las válvulas inferiores bajo condiciones óptimas, se observa un BS&W cercano al 100%, lo cual confirma una separación eficiente y la ausencia de crudo en la sección de drenaje de agua.

**Figura 20**

*Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), caso operacional*



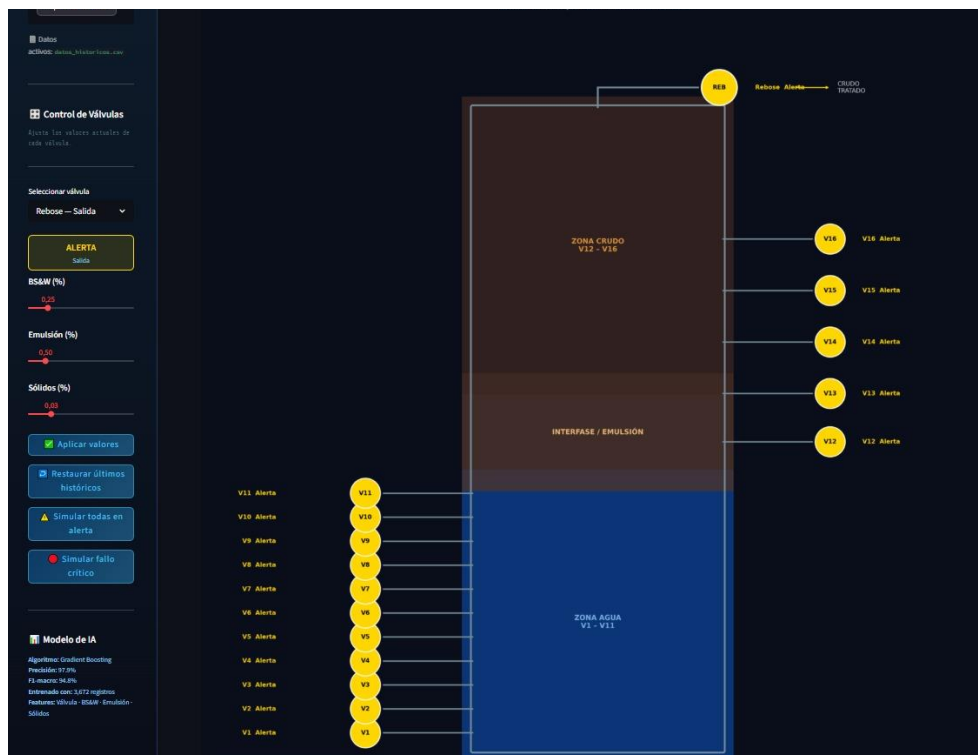
*Nota.* Fuente: Autor. En esta ilustración se valida la calidad del producto final, con caídas de BS&W a 0 en la sección de rebose, garantizando crudo libre de impurezas.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 4.4.2. Simulación bajo condiciones de alerta

**Figura 21**

*Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones de alerta*

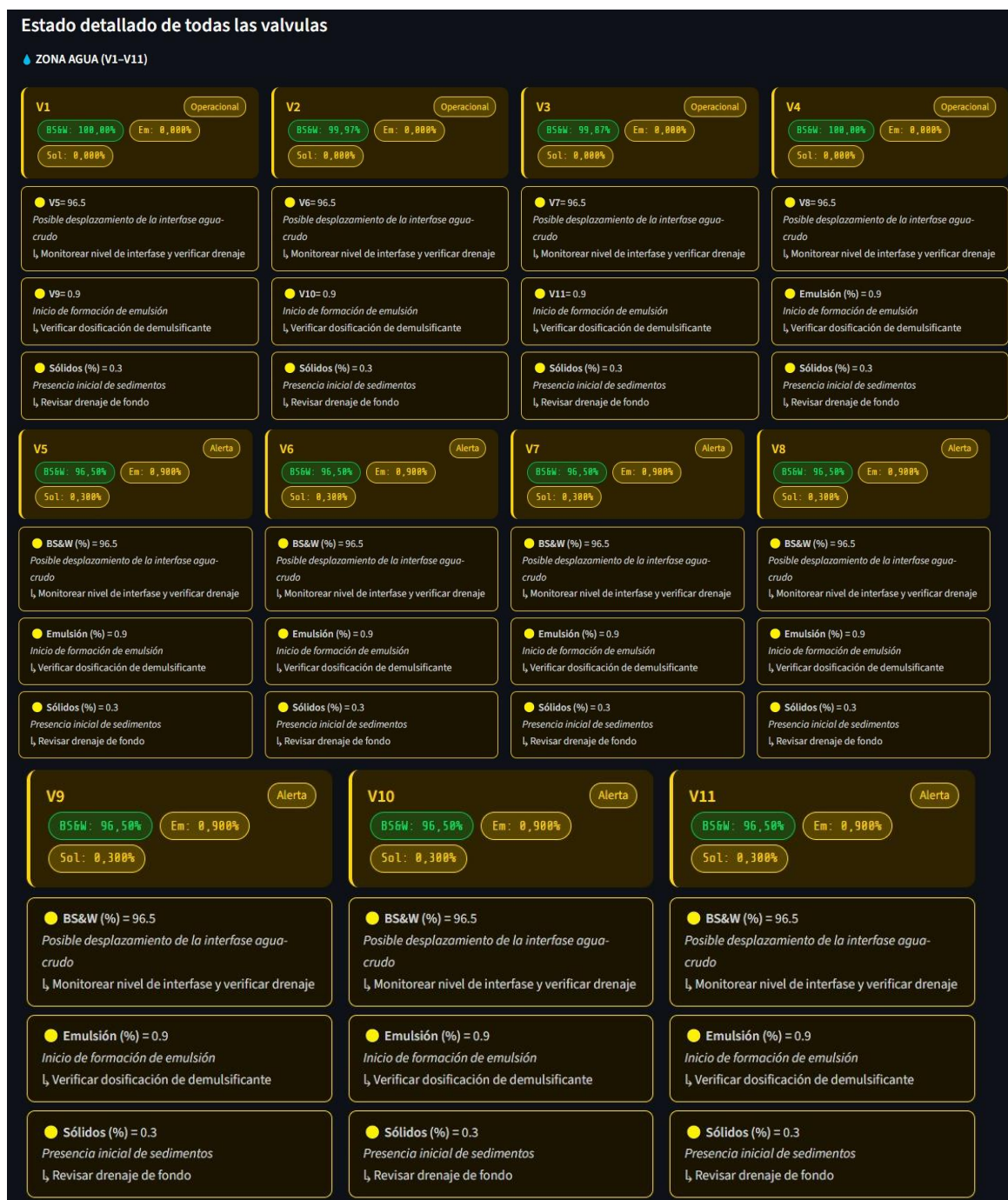


*Nota.* Fuente: Autor. Se realizó una simulación en el tanque de estudio TK 1707, en la cual se modelaron las válvulas operando dentro de rangos de alerta. El objetivo fue permitir que el modelo de *gradient boosting* identificara dichos incrementos y generara las alertas correspondientes.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 22**

*Monitoreo de la zona de agua (Válvula 1 – Válvula 11), estado de alerta*

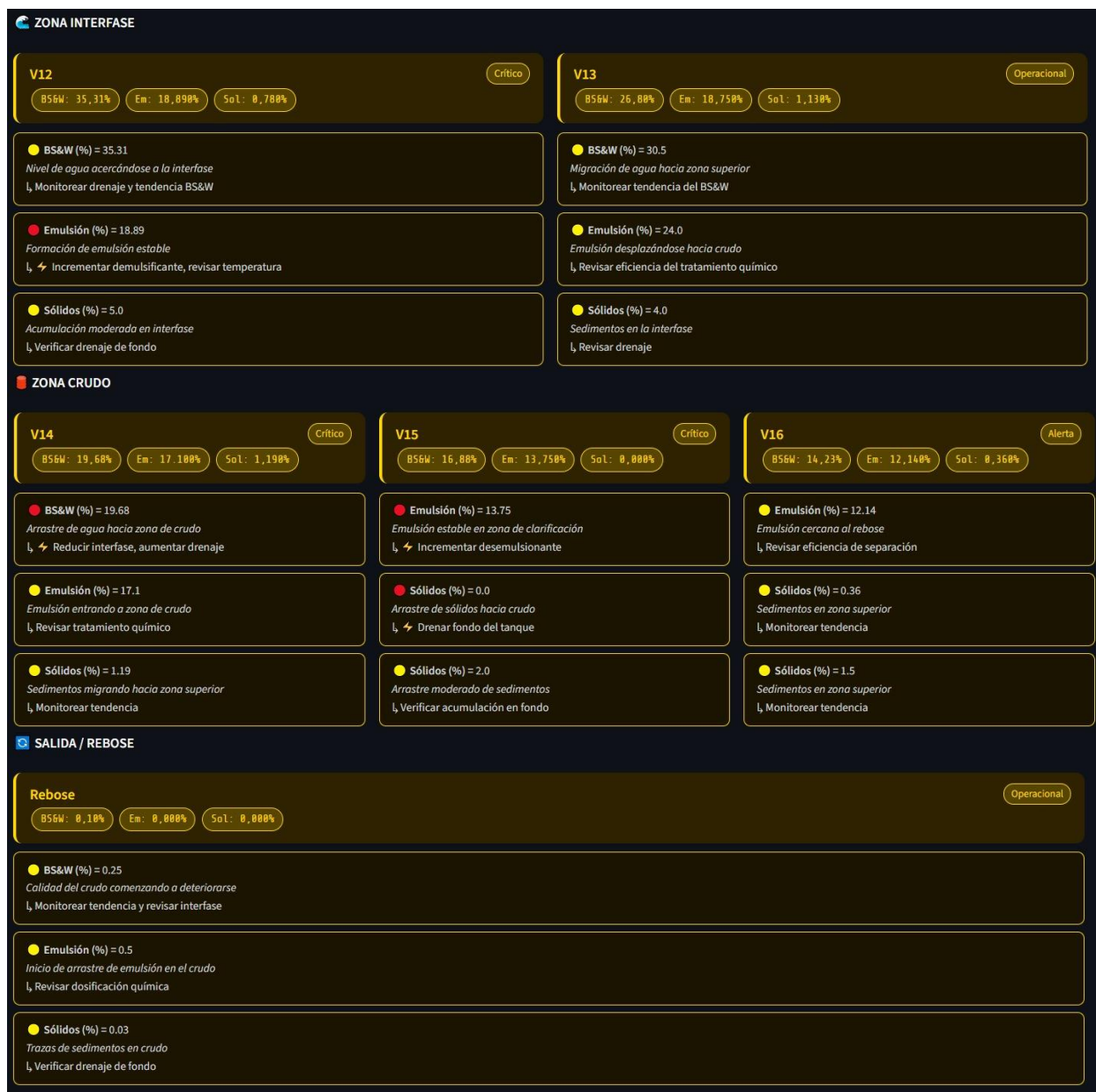


Nota. Fuente: Autor. Se observa un incremento leve en los parámetros críticos; por tal motivo, se activa el protocolo de monitoreo preventivo y recomendaciones, con el fin de evitar la superación de los límites establecidos y prevenir la entrada en un estado de contingencia.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 23**

Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), Estado de alerta



*Nota.* Fuente: Autor. Se detecta una inestabilidad en la zona de interfase y un desplazamiento de la capa de emulsión hacia los niveles superiores del tanque. Este fenómeno genera un arrastre preventivo hacia la sección de crudo y la línea de rebose, activando las alarmas del sistema para

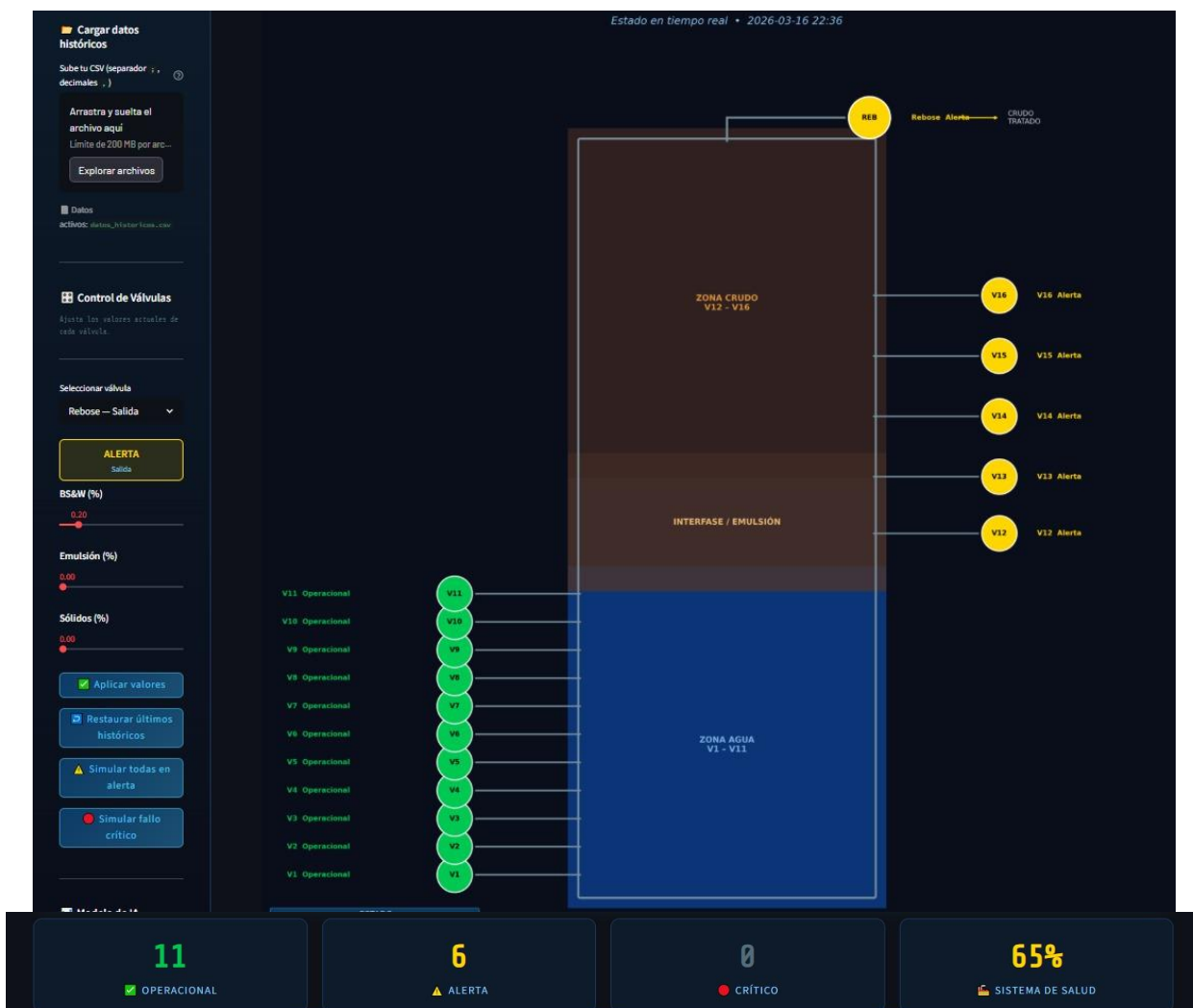
## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

evitar que el hidrocarburo de salida pierda las especificaciones de calidad comercial y requiera reprocesamiento.

### 4.4.3 Simulación bajo condiciones Operacionales/Alerta

**Figura 24**

*Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones operacionales/ alerta.*

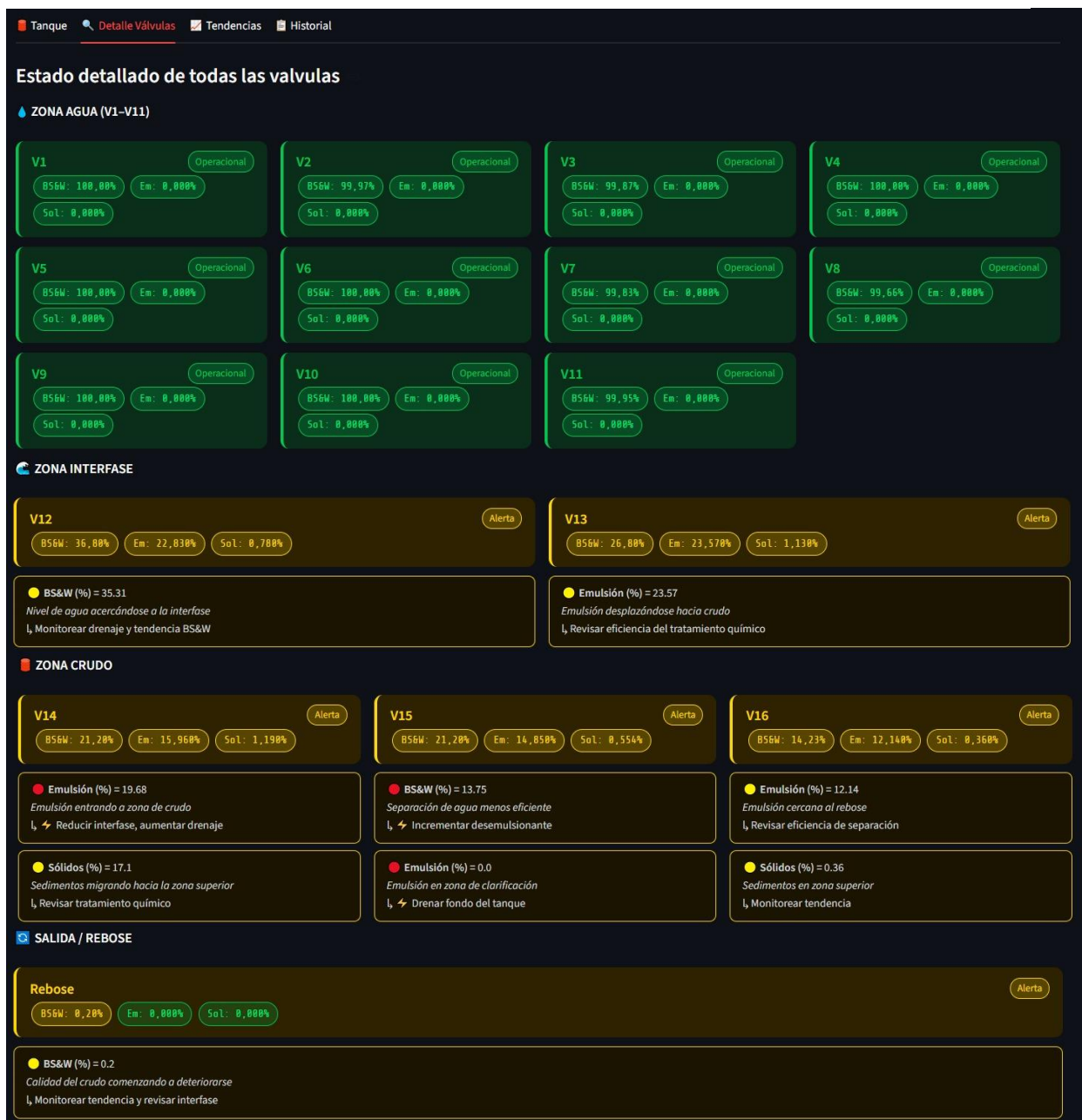


*Nota.* Fuente: Autor. Se llevó a cabo una simulación que abarca la transición desde un estado operacional hasta un estado de alerta, buscando evaluar el desempeño y la eficiencia del modelo en la detección oportuna de anomalías. Esto permitió analizar la capacidad del modelo para emitir alertas tempranas

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 25**

Monitoreo de la zona de agua e interfase, crudo y rebose (Válvula 1 - Válvula 16), Estado operacional - alerta.



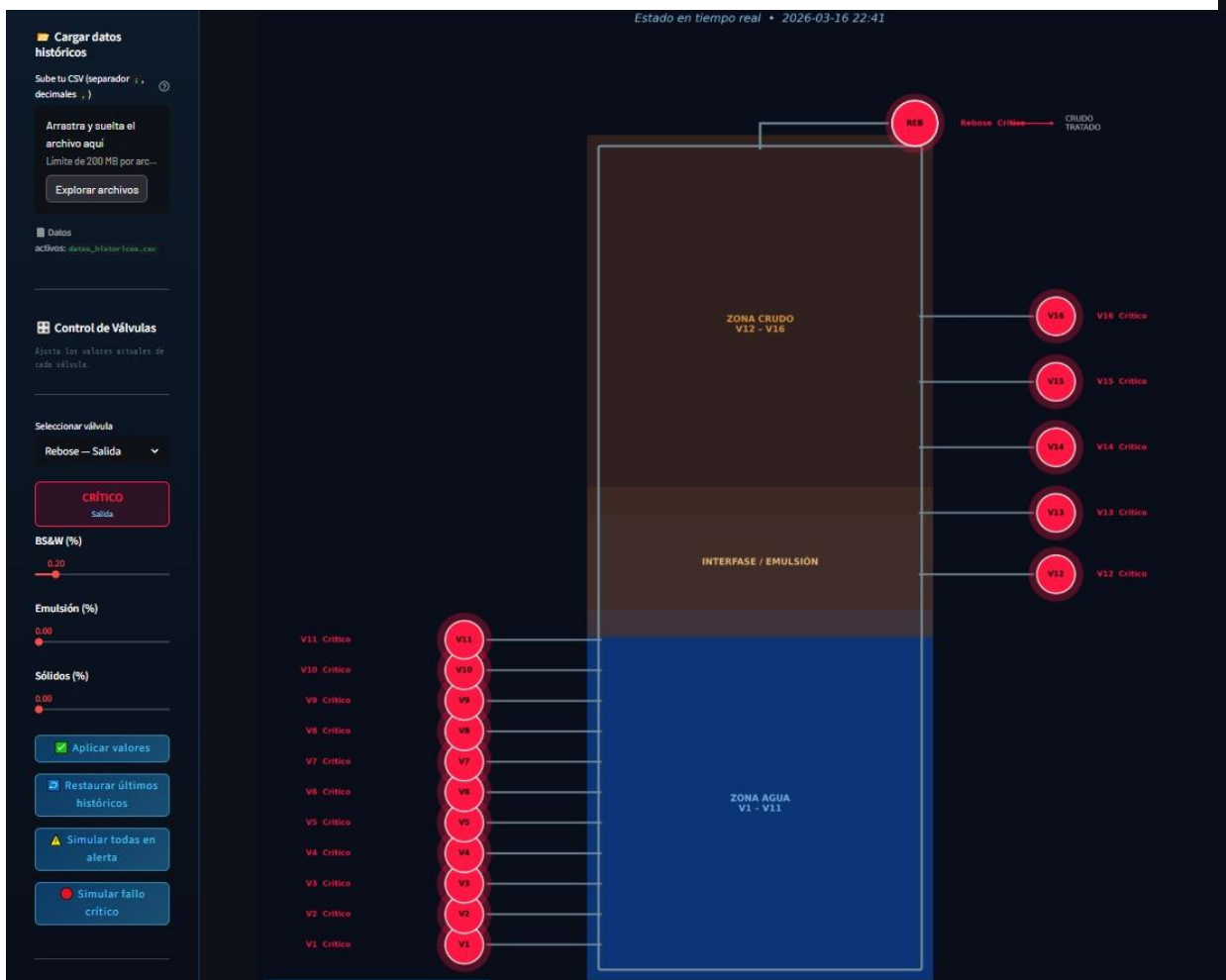
*Nota.* Fuente: Autor. Se observa una zona de agua estable, con un incremento en ciertos parámetros críticos hacia las regiones de interfase, crudo y rebose. Por lo cual, se procede a realizar una revisión preventiva con el fin de evitar la evolución hacia condiciones críticas.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 4.4.4. Simulación bajo contingencia crítica.

**Figura 26**

*Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones críticas.*

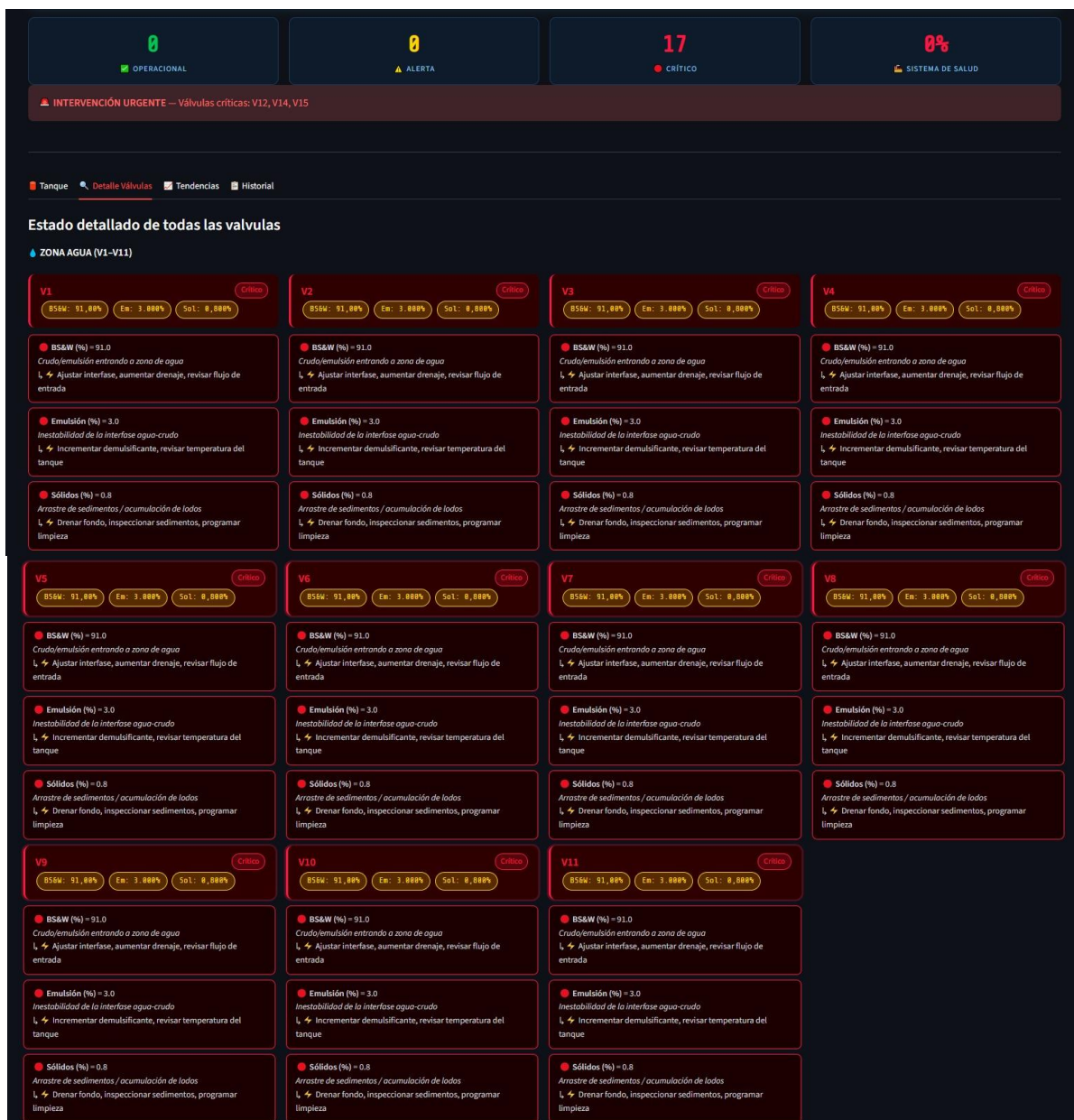


*Nota.* Fuente: Autor. Se realizó una simulación en el tanque de estudio TK 1707, en la cual se modelaron las válvulas operando dentro de rangos críticos, con el objetivo de analizar las recomendaciones inmediatas generadas por el modelo diseñado.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 27**

*Monitoreo de válvulas en la zona de agua (Válvula 1 - Válvula 11), Estado crítico*

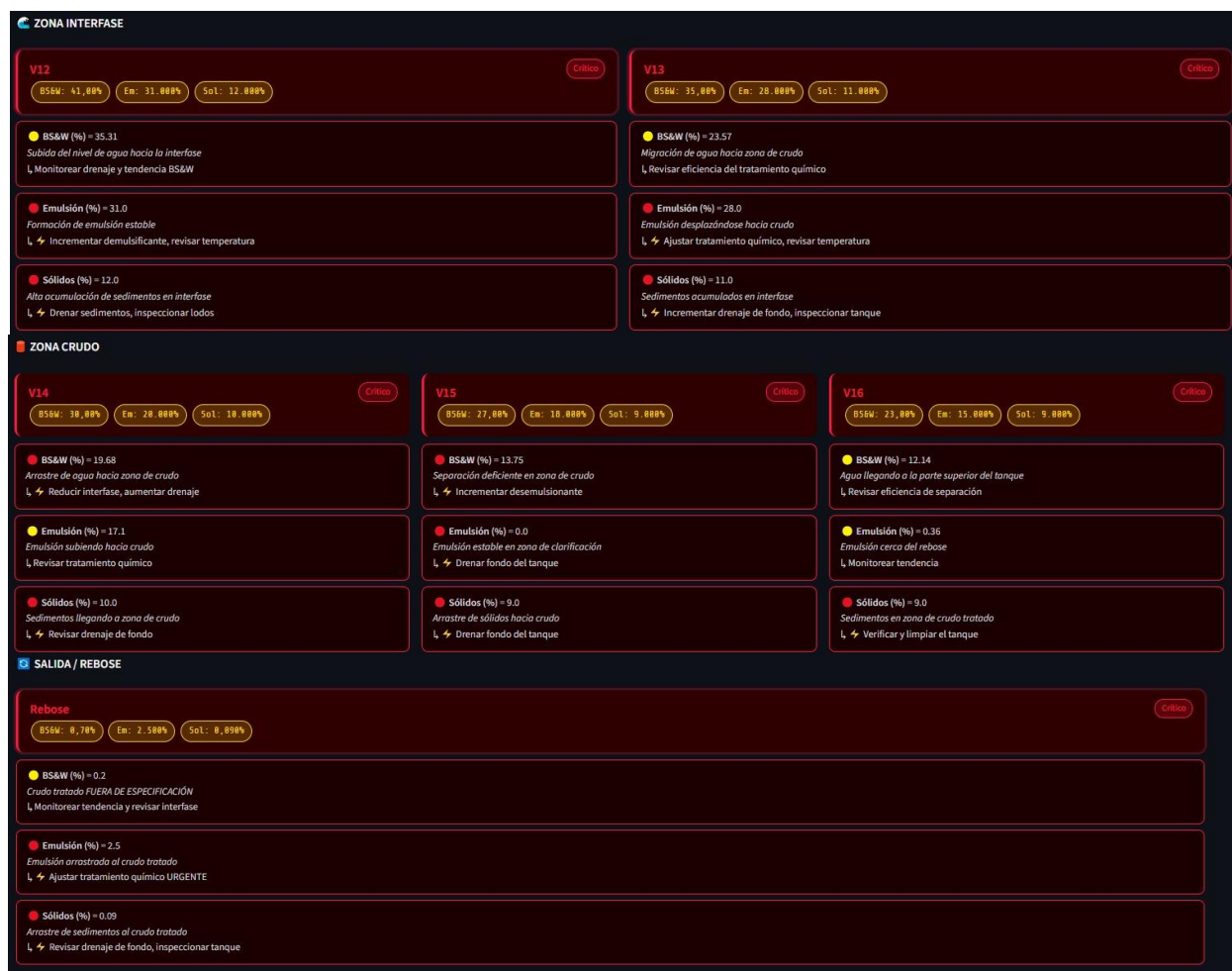


*Nota.* Fuente: Autor. Se observa que, cuando el tanque se encuentra en condiciones críticas, el modelo presenta el estado general del sistema, indicando el número de válvulas fuera de especificación y validando la emisión de alertas y recomendaciones generadas por el modelo desarrollado.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 28**

*Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), Estado de crítico*



*Nota.* Fuente: Autor. Se evidencia la saturación de las zonas de interfase y crudo por el ascenso descontrolado de emulsiones y sedimentos. Esta condición provoca que el rebose opere fuera de especificación, exigiendo una intervención inmediata mediante el ajuste del tratamiento químico, purga de lodos y revisión térmica para restaurar la calidad del hidrocarburo.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 4.4.5 Simulación bajo condiciones Operacionales/Criticas.

**Figura 29**

*Simulación tanque TK1707 bajo especificación de condiciones operacionales – críticas.*

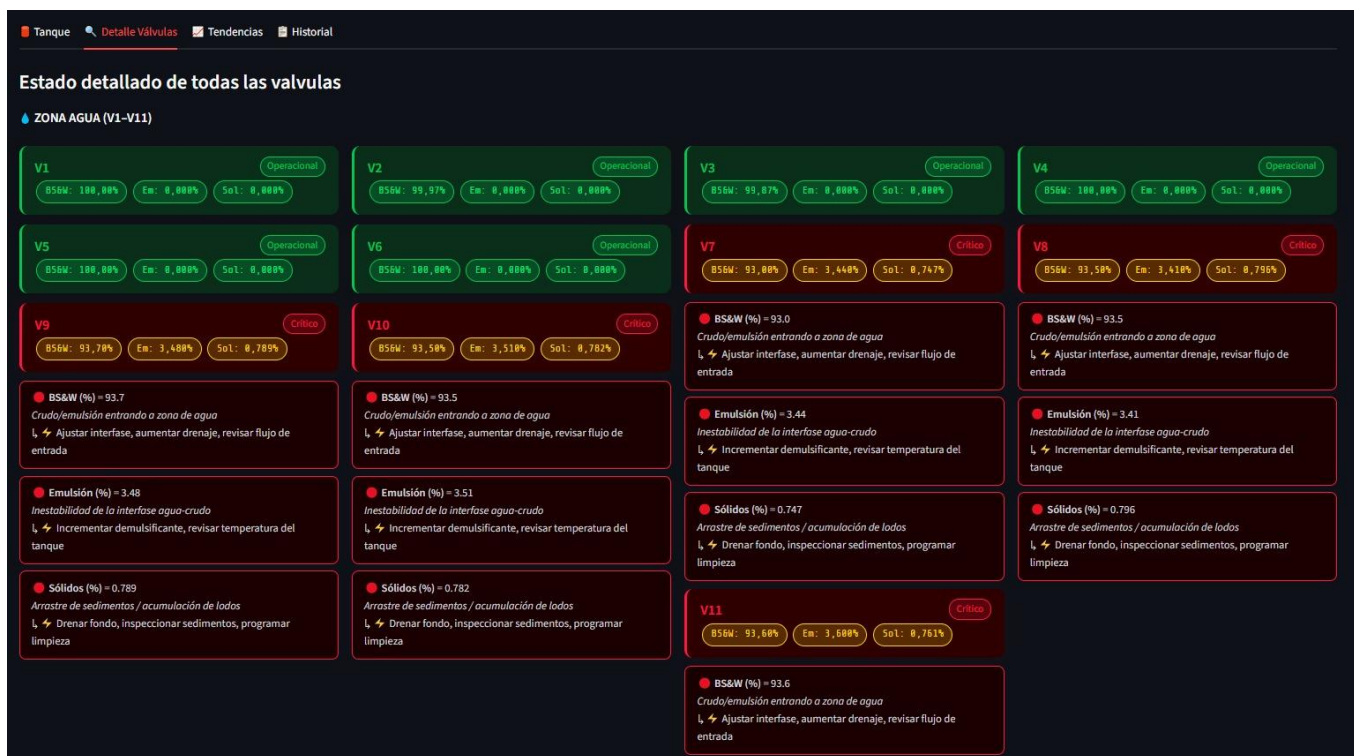


*Nota.* Fuente: Autor. Se llevó a cabo una simulación que abarca la transición desde un estado operacional hasta un estado crítico del sistema, buscando evaluar el desempeño y la eficiencia del modelo en la detección oportuna de anomalías. Esto permitió analizar la capacidad del modelo para emitir alertas tempranas y generar recomendaciones en función de la evolución de los parámetros críticos, contribuyendo así a la toma de decisiones preventivas y a la mitigación de posibles escenarios de riesgo.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 30**

*Monitoreo de válvulas en la zona de agua (Válvula 1 - Válvula 11), Estado operacional – crítico.*

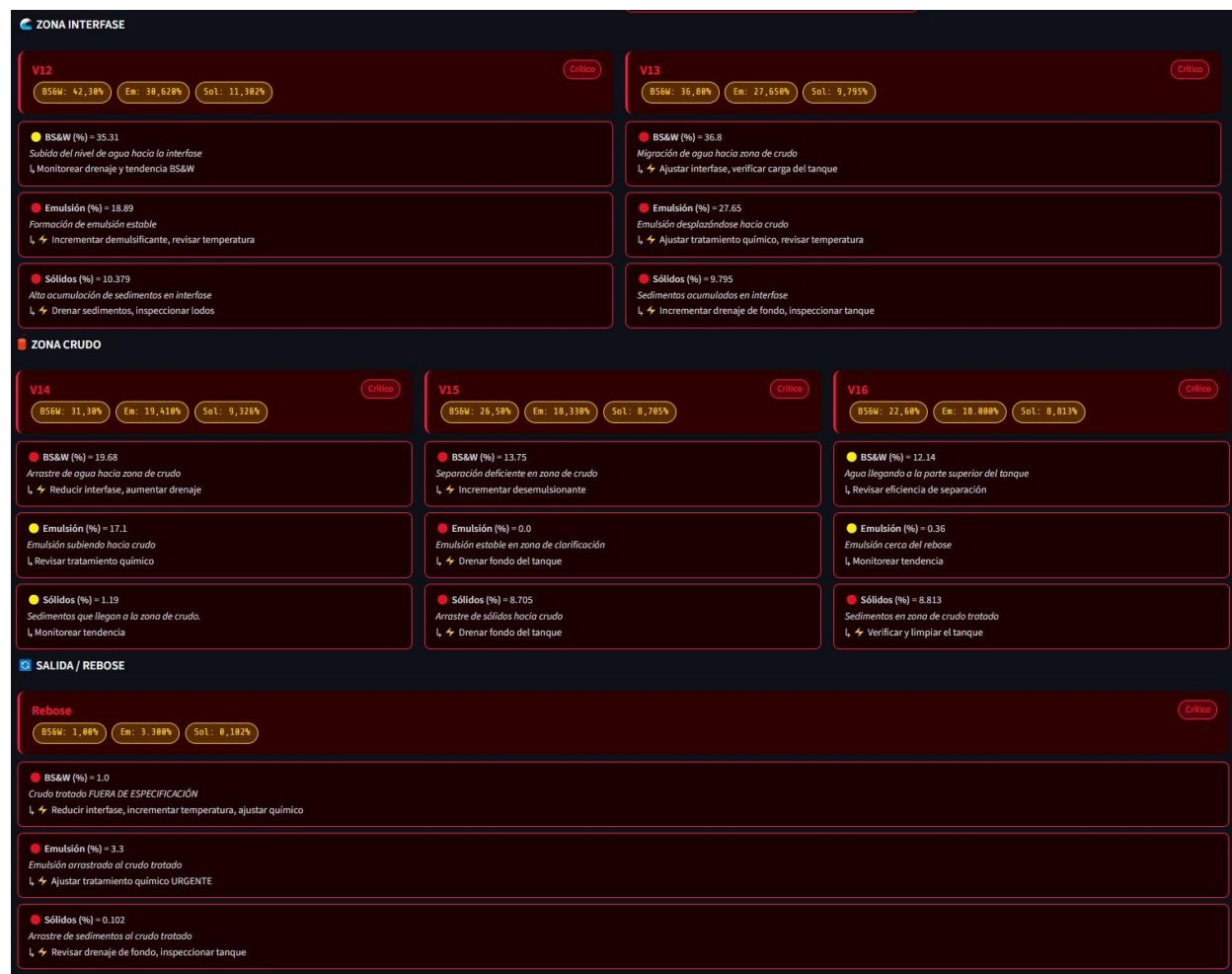


*Nota.* Fuente: Autor. La zona de agua presenta un estado crítico en sus niveles superiores debido a la intrusión de emulsiones y crudo desde la interfase. Por el contrario, los niveles inferiores se mantienen en estado operacional, indicando una fase acuosa limpia en la base del tanque. Se requiere ajustar la interfase y optimizar el tratamiento químico para frenar la migración de hidrocarburo hacia la zona de drenaje.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 31**

*Monitoreo de la zona de interfase, crudo y rebose (Válvula 12 - Válvula 16), Estado de operacional – crítico.*



*Nota.* Fuente: Autor. Se observa una acumulación progresiva en las zonas de interfase y crudo, causada por el ascenso no controlado de emulsiones y sedimentos. Esta situación genera que el sistema de rebose funcione fuera de los parámetros establecidos, lo que hace necesaria una intervención inmediata mediante la optimización del tratamiento químico, la purga de lodos y la verificación de las condiciones térmicas, con el fin de restablecer la calidad del hidrocarburo.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**4.4.6. Análisis comparativo entre datos de laboratorio y datos de simulación****4.4.6.1 Validación matemática****Tabla 6***Análisis matemático comparando perfil de laboratorio y simulación*

| <b>Modelo matemático</b>         | <b>BS&amp;W</b> | <b>Emulsión</b> | <b>Sólidos</b> |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| <b>% Error</b>                   | 1,56            | 1,03            | 9,64           |
| <b>Desviación estándar</b>       | 1,34            | 0,4             | 5,98           |
| <b>Correlación R<sup>2</sup></b> | 0,9991          | 0,9991          | 0,9150         |

*Nota.* Fuente: Autor. Se calcularon métricas de error porcentual, error promedio (MAPE), desviación estándar y coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) para evaluar la precisión del modelo.

Los resultados muestran que las variables de BS&W y emulsión presentan errores promedio de 1.56 % y 1.03 %, respectivamente, lo que indica una alta precisión en la simulación. Por otro lado, los sólidos presentan un MAPE de 9.64 %, asociado a la mayor variabilidad inherente de esta fase.

En cuanto a la dispersión, la desviación estándar fue baja para BS&W (1.34) y emulsión (0.40), evidenciando estabilidad en las predicciones, mientras que los sólidos presentaron mayor variabilidad (5.98).

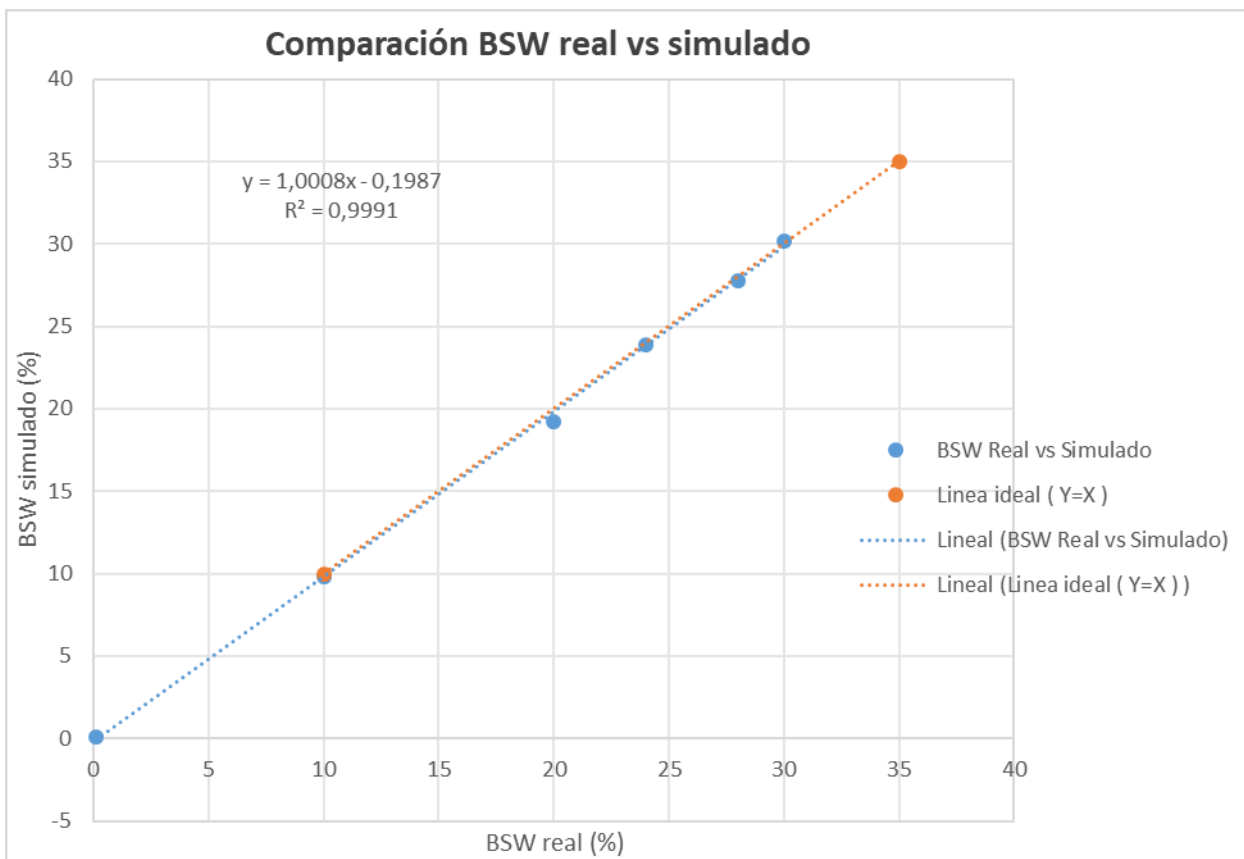
El coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) fue cercano a la unidad para BS&W (0.998) y emulsión (0.999), indicando una excelente capacidad del modelo para reproducir la tendencia del sistema real. Para sólidos, el valor de R<sup>2</sup> fue de 0.915, lo cual sigue siendo aceptable dentro de sistemas multifásicos complejos.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

## 4.4.6.2 Validación gráfica

Figura 32

Comparación de BSW real vs BSW simulado mediante grafica de dispersión.

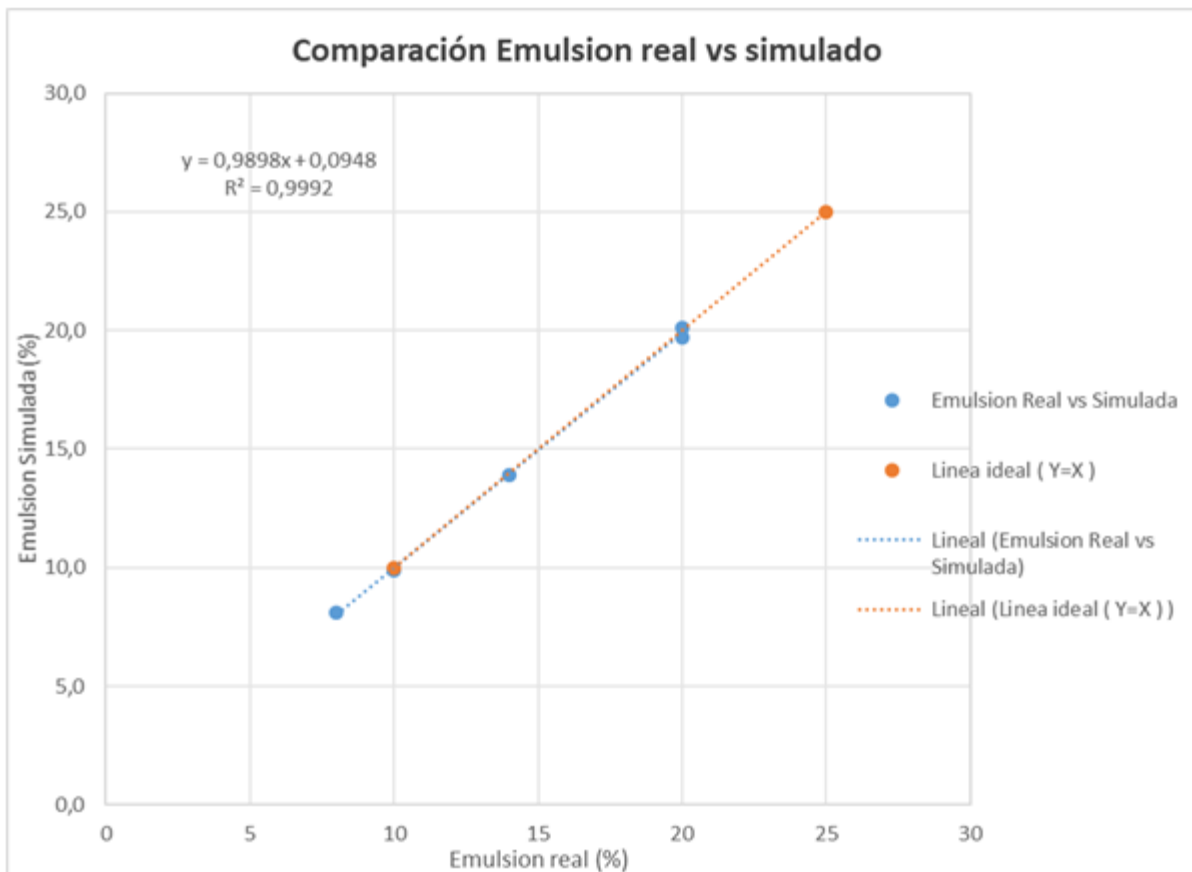


Nota. Fuente: Autor.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 33**

*Comparación de emulsión real vs emulsión simulada mediante grafica de dispersión.*

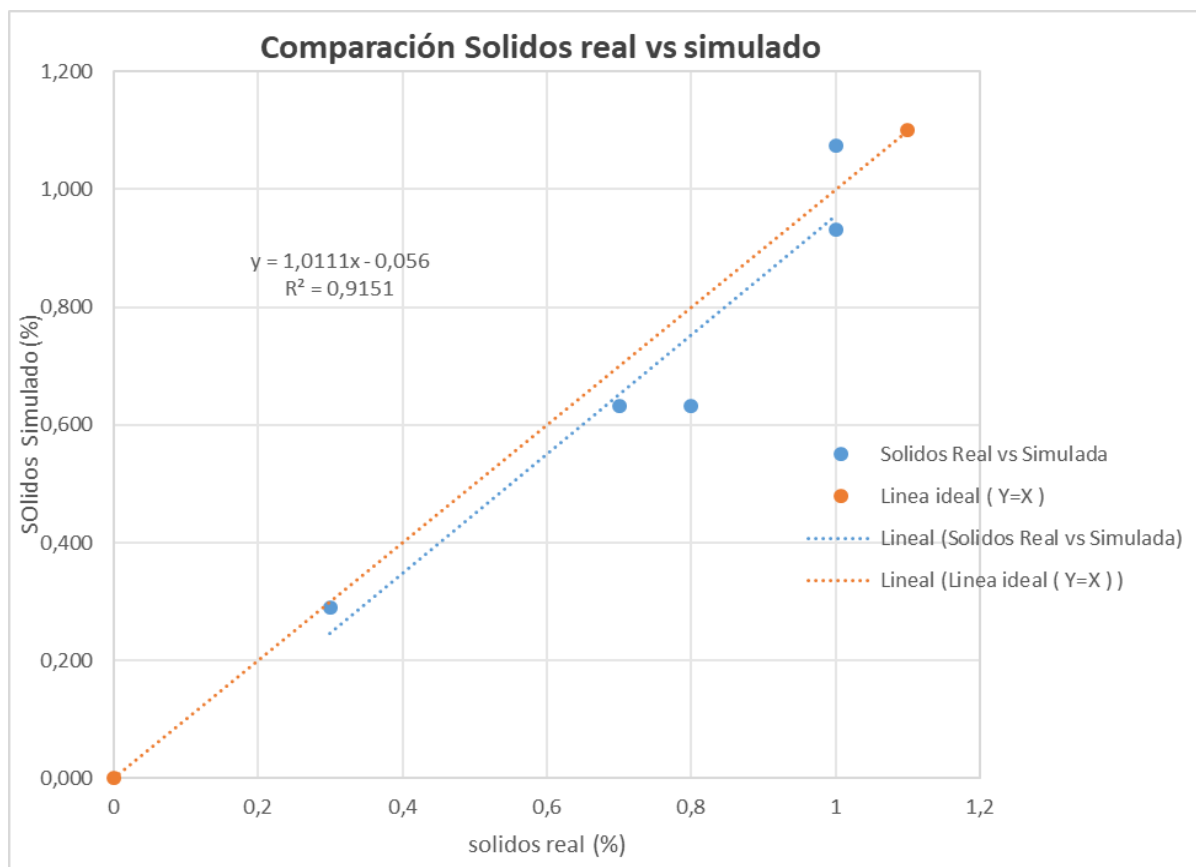


Nota. Fuente: Autor.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 34**

*Comparación de sólidos reales vs sólidos simulados mediante grafica de dispersión.*



*Nota.* Fuente: Autor.

La validación del modelo mediante gráficas de dispersión confirma una alta concordancia entre los valores reales y simulados, con los puntos distribuidos cerca de la línea ideal ( $y = x$ ). Aunque la variable de sólidos presenta una mayor dispersión debido a su naturaleza heterogénea y a la dinámica de sedimentación en el tanque, el modelo mantiene una alta precisión general. Esto se refleja en un coeficiente de determinación ( $R^2 \approx 0.9151$ ), lo que valida su capacidad para reproducir fielmente las tendencias críticas de BS&W, emulsión y sólidos en el sistema.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

## 4.4.6.3 Sensibilidad

Tabla 7

*Análisis de sensibilidad por zonas del tanque ATK 1707*

| Zona del tanque              | Válvulas | Parámetro crítico         | $\Delta$ (Cambio mínimo) | Sensibilidad |
|------------------------------|----------|---------------------------|--------------------------|--------------|
| Zona superior (crudo limpio) | V1–V11   | Emulsión / Sólidos        | $\approx 0.1$            | Alta         |
| Zona de transición superior  | V12      | BS&W / Emulsión           | 1                        | Alta         |
| Zona de interfase            | V13–V14  | BS&W / Emulsión / Sólidos | 1                        | Alta         |
| Zona de transición inferior  | V15      | Emulsión / Sólidos        | 1                        | Alta         |
| Zona inferior (agua)         | V16      | Sólidos                   | 0,01                     | Alta         |
| Rebose                       | Rebose   | Todos                     | 0.01–0.1                 | Alta         |

*Nota.* Fuente: Autor.

El análisis por zonas muestra que el sistema presenta alta sensibilidad en todas sus regiones, con mayor criticidad en la zona de interfase (V12–V14), donde pequeñas variaciones en BS&W y emulsión generan cambios significativos en el estado operativo.

En la zona superior (V1–V11), la sensibilidad está asociada a la presencia de emulsión y sólidos, afectando directamente la calidad del crudo. En la zona inferior (V15–V16), la sensibilidad se relaciona principalmente con la acumulación de sólidos y el comportamiento del agua. En el punto de rebose, cualquier variación genera una respuesta inmediata, evidenciando su

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

carácter crítico. En conjunto, el sistema requiere monitoreo continuo, validando el uso del modelo propuesto para la toma de decisiones operativas.

### 4.4.6.4 Capacidad de respuesta

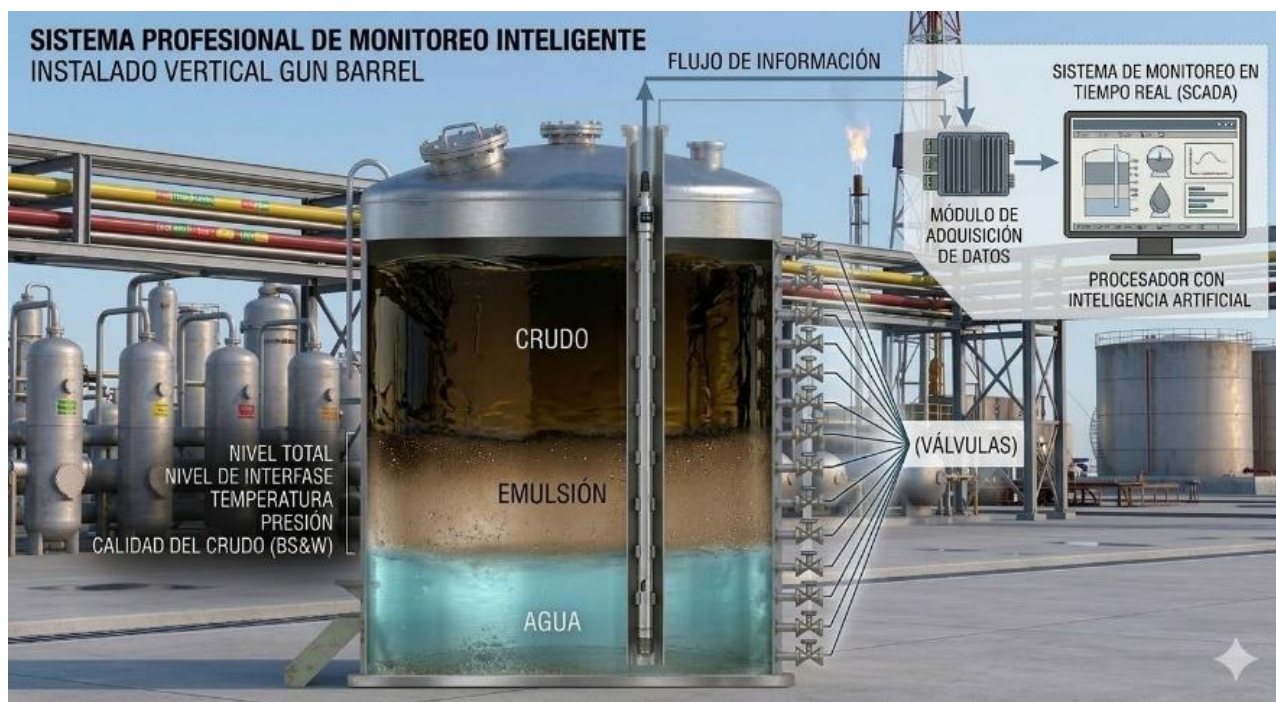
La capacidad de respuesta del sistema evidencia que el modelo se adapta de manera consistente a variaciones en variables como BS&W, emulsión y sólidos, manteniendo coherencia en sus predicciones. La concordancia entre datos reales y simulados indica una respuesta adecuada ante diferentes condiciones operativas.

Adicionalmente, el modelo permite identificar cambios en el estado del sistema de forma oportuna, facilitando una toma de decisiones más rápida y fundamentada. Esto evidencia que el sistema tiene potencial para su implementación en esquemas de monitoreo en tiempo real.

## 4.5 Lineamientos técnicos para la implementación en condiciones reales.

### Figura 35

*Esquema conceptual del sistema de monitoreo inteligente en tanque tipo Gun Barrel*



*Nota.* Fuente: Autor.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Tabla 8**

*Lineamientos técnicos para la implementación del sistema en campo*

| <b>Categoría</b>       | <b>Lineamiento</b>       | <b>Descripción técnica</b>   | <b>Impacto en el sistema</b>                  |
|------------------------|--------------------------|--|---|
| <b>Instrumentación</b> | Selección de sensores    | Uso de sensores multiparamétricos de alta precisión para nivel, interfase, temperatura, presión y BS&W | Alta confiabilidad en la adquisición de datos |
| <b>Instrumentación</b> | Resolución de medición   | Sensores con resolución mínima de 4 pulgadas en perfil vertical  | Detección precisa de capas y emulsión         |
| <b>Instalación</b>     | Ubicación de sensores    | Instalación vertical cubriendo toda la altura del tanque   | Perfil completo del comportamiento del fluido |
| <b>Instalación</b>     | Zonas críticas           | Priorización en interfase agua-crudo y zona de emulsión  | Mejora en control de separación               |
| <b>Instalación</b>     | Compatibilidad mecánica  | Materiales resistentes a corrosión, temperatura y sólidos  | Mayor vida útil del sistema                   |
| <b>Operación</b>       | Monitoreo en tiempo real | Integración con sistema SCADA o plataforma digital   | Toma de decisiones inmediata                  |
| <b>Operación</b>       | Generación de alertas    | Configuración de rangos operativos y alarmas   | Prevención de fallas operativas               |
| <b>Operación</b>       | Optimización del proceso | Ajuste de caudales y químicos basado en datos  | Incremento en eficiencia de separación        |
| <b>Mantenimiento</b>   | Calibración              | Programación periódica de calibración de sensores  | Precisión sostenida en el tiempo              |
| <b>Mantenimiento</b>   | Inspección               | Verificación de estado físico y funcionamiento   | Reducción de fallas inesperadas               |
| <b>Viabilidad</b>      | Integración operativa    | Implementación sin interferir con operación existente  | Adaptabilidad en campo                        |
| <b>Viabilidad</b>      | Escalabilidad            | Posibilidad de replicar el sistema en otros tanques  | Aplicabilidad industrial                      |
| <b>Viabilidad</b>      | Beneficio operativo      | Reducción de incertidumbre y mejora en control   | Mayor eficiencia y rentabilidad               |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

*Nota.* Fuente: Autor. Los lineamientos establecidos permiten garantizar una adecuada selección e instalación de la instrumentación, así como una integración eficiente con el sistema de monitoreo. Se destaca la importancia de la medición continua del perfil del tanque y la priorización de variables críticas, lo que contribuye a mejorar la confiabilidad de la información y la toma de decisiones operativas.

### 4.5.1 Análisis de pérdidas operativas a nivel de estación

**Tabla 9**

*Pérdidas económicas asociadas a producción no conforme (PNC)*

| <b>Año</b>   | <b>Total Diferidas</b> | <b>Bbl</b>   | <b>Costo</b>   | <b>Moneda</b> |
|--------------|------------------------|--------------|----------------|---------------|
| <b>2022</b>  | 1.429                  | 144.680,61   | \$868.083,66   | USD           |
| <b>2023</b>  | 3.653                  | 328.868,62   | \$1.973.211,72 | USD           |
| <b>2024</b>  | 3.518                  | 265.982,41   | \$1.595.894,46 | USD           |
| <b>2025*</b> | 3.580                  | 295.000,00   | \$1.770.000,00 | USD           |
| <b>Total</b> | 12.180                 | 1.034.531,64 | \$6.207.189,84 | USD           |

*Nota.* Fuente: autor, Como se observa en la tabla, Las pérdidas operativas asociadas a eventos de Producción No Conforme (PNC) representan un impacto económico significativo en la operación de la estación, afectando la eficiencia del proceso y la calidad del crudo producido.

Es importante señalar que los valores presentados en la tabla anterior corresponden a pérdidas registradas a nivel de estación, incluyendo múltiples unidades de proceso. En este sentido, dichos datos se emplean como referencia para dimensionar la magnitud del impacto económico asociado a estos eventos, mas no como base directa para la evaluación económica del sistema propuesto.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Con el fin de mantener la coherencia del análisis, la evaluación tecnoeconómica se desarrolla a partir de un caso piloto específico correspondiente al tanque TK1707, utilizando datos representativos de su operación.

### *4.5.2 Caso piloto de implementación en el tanque TK1707*

Con el objetivo de evaluar la viabilidad del sistema en condiciones reales, se plantea un caso piloto basado en parámetros operativos representativos del tanque TK1707.

**Tabla 10**

*Parámetros operativos del tanque.*

| <b>Parámetro</b>                        | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b> |
|---|--------------|---------------|
| <b>Altura total</b>                     | 40           | ft            |
| <b>Diámetro</b>                         | 95           | ft            |
| <b>Volumen total</b>                    | 50.000       | bbl           |
| <b>Altura de interfase diseño</b>       | 17           | ft            |
| <b>Temperatura de operación</b>         | 185          | °F            |
| <b>Densidad del crudo</b>               | 14           | °API          |
| <b>Viscosidad</b>                       | 150          | cP            |
| <b>Dosificación demulsificante base</b> | 40           | ppm           |
| <b>Número de válvulas de monitoreo</b>  | 16 + rebose  | —             |
| <b>Separación entre sensores</b>        | 25           | in            |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

*Nota.* Fuente: Autor. Estos parámetros permiten establecer una base realista para el análisis del sistema, asegurando que los resultados obtenidos sean representativos del comportamiento del proceso.

### 4.5.3 Inversión requerida (CAPEX).

La implementación del sistema de monitoreo inteligente requiere una inversión inicial asociada a la adquisición de equipos, instalación e integración tecnológica.

**Tabla 11**

*Inversión Capex*

| <b>Concepto</b>                              | <b>Valor (USD)</b> |
|--|--------------------|
| <b>Equipos (sensores, adquisición, etc.)</b> | 175.000            |
| <b>Instalación en el TK1707</b>              | 65.000             |
| <b>Implementación de arquitectura</b>        | 20.000             |
| <b>Configuración de IA en SCADA</b>          | 37.000             |
| <b>I Total CAPEX</b>                         | <b>297.000</b>     |

*Nota.* Fuente: Autor.

### 4.5.4 Construcción del flujo de caja del proyecto

El flujo de caja se construye a partir de la recuperación de producción diferida asociada a pérdidas operativas. Para obtener una estimación realista de los beneficios, se aplica un ajuste del 20% correspondiente a costos operativos (OPEX) y lifting cost.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Tabla 12***Flujo de caja (USD)*

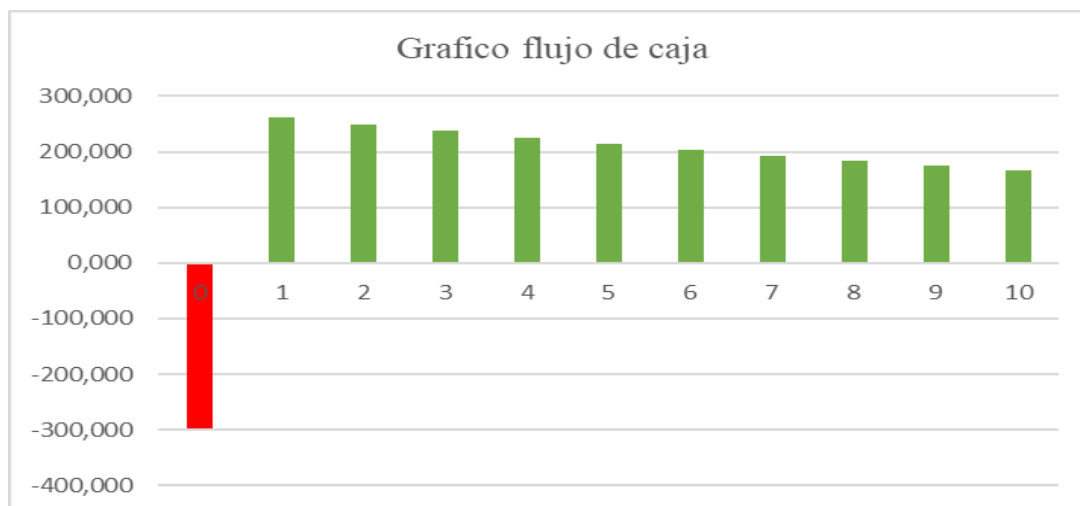
| <b>Año</b> | <b>Flujo de Caja (USD)</b> |
|------------|----------------------------|
| <b>0</b>   | -297.000                   |
| <b>1</b>   | 262.800                    |
| <b>2</b>   | 249.660                    |
| <b>3</b>   | 237.177                    |
| <b>4</b>   | 225.318                    |
| <b>5</b>   | 214.052                    |
| <b>6</b>   | 203.350                    |
| <b>7</b>   | 193.182                    |
| <b>8</b>   | 183.523                    |
| <b>9</b>   | 174.347                    |
| <b>10</b>  | 165.630                    |

*Nota.* Fuente: Autor.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Figura 36**

*Flujo de caja proyectado del sistema de monitoreo inteligente en el tanque TK1707.*



*Nota.* Fuente: Autor. Como se observa en la Figura 36, el flujo de caja presenta una recuperación temprana de la inversión a partir del primer año de operación, seguida de una generación sostenida de beneficios a lo largo del horizonte de evaluación, lo que evidencia la estabilidad económica del proyecto.

### **4.5.5 Evaluación tecnoeconómica del sistema**

La evaluación tecnoeconómica del sistema de monitoreo inteligente se desarrolla bajo un enfoque de ahorro de costos, considerando que la implementación del sistema permite reducir pérdidas operativas sin generar ingresos adicionales directos.

El análisis se basa en el caso piloto del tanque TK1707, donde se estima la recuperación progresiva de producción previamente diferida. Para la construcción del flujo de caja, se aplica un ajuste del 20% correspondiente a costos operativos (OPEX) y lifting cost, obteniendo así una estimación conservadora de la ganancia neta.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Para la evaluación financiera del proyecto, se utiliza una tasa de descuento del 10%, valor representativo del costo de capital en proyectos del sector oil & gas bajo escenarios conservadores.

**Tabla 13**

*Resultados de la evaluación económica*

| <b>Indicador</b>                         | <b>Valor</b>  |
|--|---------------|
| <b>Inversión inicial (CAPEX)</b>         | USD 297.000   |
| <b>Valor Presente Neto (VPN)</b>         | USD 1.050.570 |
| <b>Tasa Interna de Retorno (TIR)</b>     | 83,36%        |
| <b>Periodo de recuperación (Payback)</b> | 2 años        |
| <b>Relación Beneficio/Costo (B/C)</b>    | 3,36          |

*Nota.* Fuente: Autor.

Los resultados obtenidos evidencian una alta viabilidad económica del sistema propuesto. El Valor Presente Neto (VPN) positivo y superior al millón de dólares indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que genera valor adicional significativo a lo largo del horizonte de evaluación.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) del 83,36% refleja un nivel de rentabilidad considerablemente alto en comparación con los estándares de la industria, posicionando el proyecto como una alternativa altamente atractiva desde el punto de vista financiero.

El periodo de recuperación de la inversión (Payback) de aproximadamente 2 años demuestra que el capital invertido se recupera en un tiempo reducido, disminuyendo el riesgo financiero del proyecto.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Por su parte, la relación Beneficio/Costo (B/C) de 3,36 indica que por cada dólar invertido se generan 3,36 dólares en beneficios, lo cual respalda la eficiencia económica de la implementación del sistema.

Tal como se observa en la Figura 39, el comportamiento del flujo de caja confirma la estabilidad y sostenibilidad del proyecto a lo largo del tiempo.

En conjunto, los resultados validan que el sistema propuesto no solo es técnicamente viable, sino que constituye una solución económicamente rentable, con capacidad de reducir pérdidas, optimizar la producción y mejorar la eficiencia operativa del tanque TK1707.

### 5. Conclusiones

Se logró identificar y caracterizar los parámetros operacionales críticos que gobiernan la eficiencia del proceso de tratamiento de crudo en el tanque TK1707, estableciendo como variables de mayor relevancia el BS&W en rebose, la emulsión secundaria, la interfase agua-crudo, la temperatura del fluido y la presencia de sólidos. En particular, se confirmó que el BS&W en rebose constituye la variable más representativa para evaluar la calidad final del crudo, mientras que la emulsión, la interfase y los sólidos actúan como indicadores tempranos de inestabilidad operativa. Esta caracterización permitió definir los rangos operacionales, de alerta y de condición crítica que sirvieron como base para el monitoreo inteligente del sistema.

Se desarrolló conceptualmente la herramienta sensórica MJ24, planteada para realizar medición interna y continua del comportamiento del tanque mediante la integración de sensores de nivel, temperatura, presión y propiedades dieléctricas, junto con expresiones matemáticas orientadas a estimar perfiles internos y acondicionar la señal para su análisis. Esta propuesta permitió estructurar una arquitectura técnica capaz de reconstruir el perfil de fluidos dentro del

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

tanque y transformar mediciones crudas en variables útiles para la interpretación operativa del proceso.

Se diseñó y validó un modelo computacional basado en Gradient Boosting para el procesamiento y clasificación de las condiciones operativas del sistema, seleccionado por su mejor comportamiento frente a transiciones críticas entre estados de alerta y contingencia, así como por su robustez para trabajar con datos tabulares industriales. El modelo fue entrenado sobre el mismo conjunto de datos empleado para comparar los algoritmos evaluados y presentó un desempeño global cercano al 96 % de exactitud y 95 % de F1-score, superando claramente a la red neuronal tipo MLP, que obtuvo aproximadamente 79 % de exactitud y 70 % de F1-score. Estos resultados evidencian que el modelo seleccionado es adecuado para apoyar la detección temprana de desviaciones y la generación de recomendaciones operativas.

La validación del sistema propuesto mediante simulaciones y comparación con datos de referencia demostró una alta capacidad de reproducción del comportamiento del tanque. Las variables de BS&W y emulsión presentaron errores porcentuales promedio de 1,56 % y 1,03 %, respectivamente, con coeficientes de correlación  $R^2$  de 0,9991, mientras que la variable de sólidos presentó un error de 9,64 % y un  $R^2$  de 0,9150, resultado aceptable dada la mayor variabilidad de esta fase. Asimismo, el análisis de sensibilidad mostró mayor criticidad en la zona de interfase (V12–V14) y alta sensibilidad en el punto de rebose, confirmando la capacidad del sistema para responder a variaciones pequeñas pero operacionalmente relevantes.

Finalmente, se establecieron lineamientos técnicos para una futura implementación industrial del sistema, integrando criterios de instrumentación, ubicación de sensores, resolución de medición, adquisición de datos y compatibilidad con plataformas tipo SCADA. En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la propuesta desarrollada constituye una base

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

técnica sólida para evolucionar hacia esquemas de monitoreo inteligente en tanques de tratamiento de crudo, con potencial para mejorar la detección de desviaciones, fortalecer la toma de decisiones operativas y servir como punto de partida para futuras validaciones en campo.

### **6. Recomendaciones**

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda profundizar en el análisis de la variable sólidos, ya que fue la que presentó mayor dificultad de modelado en comparación con variables como BS&W y emulsión. Para mejorar su predicción, sería conveniente incorporar nuevas variables operacionales y evaluar enfoques específicos orientados a esta salida.

También se recomienda dejar más explícito el proceso de validación del modelo de inteligencia artificial, detallando con mayor claridad la partición de datos utilizada, la metodología de evaluación aplicada y la forma en que se estructuró el análisis de desempeño. Esto ayudaría a fortalecer la trazabilidad metodológica y la solidez técnica del estudio.

En relación con la herramienta sensorica MJ24, se sugiere profundizar en aspectos asociados a su implementación práctica, especialmente en temas como selección de materiales, condiciones reales de operación, requerimientos de instalación y posibles afectaciones por incrustaciones, lodos o emulsiones estables dentro del tanque.

Adicionalmente, sería conveniente complementar la propuesta con un análisis preliminar de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM), así como fortalecer el componente tecnoeconómico mediante escenarios de sensibilidad que permitan evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas y económicas.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Finalmente, se recomienda mantener una relación aún más directa entre los objetivos específicos, los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo, de manera que la trazabilidad del desarrollo metodológico quede aún más clara dentro del documento final.

Como continuidad de esta investigación, se recomienda realizar una validación en condiciones reales de operación, mediante la implementación piloto de la herramienta sensorica MJ24 en un tanque de tratamiento de crudo. Esto permitiría contrastar el comportamiento del sistema con datos reales de campo y evaluar su desempeño bajo condiciones operativas variables.

También sería de gran interés extender la metodología propuesta a otros tanques y tipos de crudo, con el fin de analizar su capacidad de adaptación y generalización frente a diferentes configuraciones de proceso y condiciones de operación.

De igual forma, se sugiere explorar el uso de modelos híbridos o ensambles de aprendizaje automático, con el objetivo de fortalecer especialmente la predicción de la variable de sólidos y mejorar la sensibilidad del sistema en la detección temprana de estados de alerta y criticidad.

A futuro, también podría evaluarse la integración del sistema con plataformas SCADA, herramientas de control avanzado y estrategias de mantenimiento predictivo, lo cual ampliaría significativamente su alcance dentro de la operación de estaciones de tratamiento.

Finalmente, se recomienda que estudios posteriores incluyan una evaluación del impacto ambiental y de la eficiencia energética asociado a la implementación del sistema, considerando variables como reducción de reprocesos, consumo energético y posibles beneficios operativos en términos de sostenibilidad.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Referencias Bibliográficas**

- Ahmadi, S., y Khormali, A. (2025). Petroleum Emulsion Stability and Separation Strategies: A Comprehensive Review. *ChemEngineering*, 9(5), 113.  
<https://doi.org/10.3390/chemengineering9050113>
- Ballesteros, B., y Sánchez, W. (2021). Estudio exploratorio del uso de data science: Aplicación en las materias del ciclo profesional del pensum de la carrera de ingeniería de petróleos de la Universidad Industrial de Santander. [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].
- Bonilla K., y Sarmiento, M. (2018). Evaluación técnico-financiera del diseño de un Gun Barrel a partir de un tanque de almacenamiento existente para el mejoramiento del proceso de separación de fluidos en la estación C de un campo en la cuenca Caguán-Putumayo. [Trabajo de grado]. Fundación Universidad de América. Retrieved from  
<http://hdl.handle.net/20.500.11839/6803>
- Meza, J. (2023). The role of artificial intelligence in the Upstream of the Oil Industry: a review. *Revista investigacion y acción*. Vol 3, No 1.  
<https://revistas.uniatlantico.edu.co/index.php/Invefor/article/view/3828/4525>
- Saavedra, B. (2025). Análisis de los procesos de deshidratación y desalación del petróleo crudo: Estrategias para la reducción de impurezas y cuidado de los equipos. *Uaemex.mx*.  
<http://hdl.handle.net/20.500.11799/142904>
- Velásquez, I., y Pereira, J. C. (2014). *Emulsiones de agua en crudo: Aspectos generales*. *Revista Ingeniería UC*, 21(3), 45–54. [https://es.scribd.com/document/302187343/Emulsiones-de-Agu-en-Crudo-Aspectos-Generales?utm\\_source=chatgpt.com](https://es.scribd.com/document/302187343/Emulsiones-de-Agu-en-Crudo-Aspectos-Generales?utm_source=chatgpt.com)
- Vizcaya, G., Calvete, F., y Morales, G. (2023). Factibilidad técnico-económica de implementación de un sensor virtual de producción en pozos de un campo del Valle Medio del Magdalena colombiano. *Revista Ion*, 36(3), 63–74.  
<https://doi.org/10.18273/revion.v36n3-2023006>

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

## Apéndices

*Apéndice a Descripción de las expresiones matemáticas usadas por el sensor MJ24***Tabla 14***Descripción detallada de expresiones implementadas por el sensor de estudio.*

| Componente                   | Distribución                  | Ecuación de Captación y Procesamiento          | Significado de las Variables   | Propósito en el Monitoreo en Tiempo Real  |
|------------------------------|-------------------------------|--|--|---|
| <b>Perfilador de Fluidos</b> | Arreglo vertical (Multipunto) | $C = \frac{\epsilon A}{d}$                     | <p>C: Capacitancia medida.</p> <p><math>\epsilon</math>: Permitividad del fluido.</p> <p>A: Área de placas.</p> <p>d: Distancia entre placas.</p>                                      | <b>Identificación continua:</b> Detecta qué tipo de fluido rodea a cada sensor del perfil en cada instante.   |
| <b>Detección de Interfaz</b> | Puntos de contacto de fases   | $\Delta\epsilon = \epsilon_{i+1} - \epsilon_i$ | <p><math>\Delta\epsilon</math>: Diferencial de permitividad.</p> <p><math>\epsilon_{i+1}</math>: Lectura sensor superior.</p> <p><math>\epsilon_i</math>: Lectura sensor inferior.</p> | <b>Seguimiento dinámico:</b> Localiza y sigue el movimiento de la separación agua/crudo mientras sube o baja. |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Tabla 15

Continuación de descripción detallada de expresiones implementadas por el sensor de estudio.

| Componente               | Distribución               | Ecuación de Captación y Procesamiento                | Significado de las Variables  | Propósito en el Monitoreo en Tiempo Real  |
|--------------------------|----------------------------|--|---|---|
| Análisis de Emulsión     | Zona intermedia del tanque | $\epsilon_m = \Phi_w \epsilon_w + \Phi_o \epsilon_o$ | <p><math>\epsilon_m</math>: Permitividad de la mezcla.</p> <p><math>\Phi_{w,o}</math>: Fracción de agua/crudo.</p> <p><math>\epsilon_{w,o}</math>: Permitividad pura de c/u.</p>        | <p><b>Caracterización de mezcla:</b><br/>Mide el porcentaje de agua "atrapada" en el crudo para evaluar la calidad del proceso.</p> |
| Red Térmica (RTD)        | Distribución multinivel    | $R_T = R_0(1 + \alpha T)$                            | <p><math>R_T</math>: Resistencia actual.</p> <p><math>R_0</math>: Resistencia base a 0°C.</p> <p><math>\alpha</math>: Coeficiente del material.</p> <p><math>T</math>: Temperatura.</p> | <p><b>Perfil térmico:</b><br/>Monitorea el calor interno, vital para la viscosidad y eficiencia de la separación.</p>               |
| Sonda de Nivel (Presión) | Base del sensor            | $P = \rho gh$  | <p><math>P</math>: Presión hidrostática.</p> <p><math>\rho</math>: Densidad del fluido.</p> <p><math>g</math>: Gravedad.</p> <p><math>h</math>: Nivel de la columna.</p>                | <p><b>Inventario de volumen:</b><br/>Proporciona la medición del nivel total de llenado del tanque de forma permanente.</p>         |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Tabla 16

Continuación de descripción detallada de expresiones implementadas por el sensor de estudio

| Componente                   | Distribución          | Ecuación de Captación y Procesamiento              | Significado de las Variables  | Propósito en el Monitoreo en Tiempo Real   |
|------------------------------|-----------------------|--|---|--|
| <b>Ajuste de Densidad</b>    | Algoritmo del sistema | $\rho_T = \rho_{ref}[1 - \beta(T - T_{ref})]$      | <p><math>\rho_T</math>: Densidad corregida.</p> <p><math>\beta</math>: Coeficiente de expansión.</p> <p><math>T</math>: Temperatura actual.</p> <p><math>T_{ref}</math>: Temp. de referencia.</p> | <b>Compensación de error:</b> Ajusta la densidad según el calor para que el cálculo de nivel (h) sea exacto y no estimado. |
| <b>Filtro de Estabilidad</b> | Software (DSP)        | $y[n] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x[n - i]$     | <p><math>y[n]</math>: Señal filtrada de salida.</p> <p><math>x[n]</math>: Dato crudo de entrada.</p> <p><math>M</math>: Ventana de promedio móvil.</p>  | <b>Estabilidad de lectura:</b> Elimina el ruido y los saltos causados por la turbulencia, permitiendo una señal continua.  |
| <b>Normalización para ML</b> | Pre-proceso de datos  | $x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$ | <p><math>x_{norm}</math>: Valor escalado (0 a 1).</p> <p><math>X</math>: Dato del sensor.</p>   | <b>Integración inteligente:</b> Prepara todas las variables para que el modelo de  |

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Xmin/max:**  
Valores mínimos  
y máximos.

**Gradient  
Boosting**  
clasifique el  
estado del tanque.

**Fuente: Autor.**

*Apéndice b Perfiles del tanque bajos los tres estados de operación (óptimo, alerta, critico)*

**Tabla 18**

*Perfil del tanque en un día de operación óptimo.*

| Válvula | Estado óptimo |                         |                        |
|---------|---------------|-------------------------|------------------------|
|         | BS&W (%)      | Emulsión Secundaria (%) | Sólidos Decantados (%) |
| Válv 1  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 2  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 3  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 4  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 5  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 6  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 7  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 8  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 9  | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 10 | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 11 | 100           | 0                       | 0                      |
| Válv 12 | 30            | 20                      | 1                      |
| Válv 13 | 28            | 20                      | 1                      |
| Válv 14 | 24            | 14                      | 0,8                    |
| Válv 15 | 20            | 10                      | 0,7                    |
| Válv 16 | 10            | 8                       | 0,3                    |
| Rebose  | 0,1           | 0                       | 0                      |

**Fuente: Autor.** Representación de datos de laboratorio, se presenta el tanque operando

bajo condiciones de diseño con interfaces estables y crudo en especificación.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Tabla 19***Perfil del tanque en día de alerta operativa.*

| <b>Alerta operativa</b> |                     |                                |                               |
|-------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>Válvula</b>          | <b>BS&amp;W (%)</b> | <b>Emulsión Secundaria (%)</b> | <b>Sólidos Decantados (%)</b> |
| <b>Válv 1</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.02                          |
| <b>Válv 2</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.02                          |
| <b>Válv 3</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.02                          |
| <b>Válv 4</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.04                          |
| <b>Válv 5</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.04                          |
| <b>Válv 6</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.04                          |
| <b>Válv 7</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.05                          |
| <b>Válv 8</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.05                          |
| <b>Válv 9</b>           | 96                  | 0.2                            | 0.05                          |
| <b>Válv 10</b>          | 96                  | 0.2                            | 0.05                          |
| <b>Válv 11</b>          | 96                  | 0.2                            | 0.05                          |
| <b>Válv 12</b>          | 37.5                | 26                             | 4.2                           |
| <b>Válv 13</b>          | 30.5                | 24                             | 3.5                           |
| <b>Válv 14</b>          | 26.5                | 16.5                           | 2.1                           |
| <b>Válv 15</b>          | 22                  | 15                             | 1.5                           |
| <b>Válv 16</b>          | 18.5                | 12                             | 0.8                           |
| <b>Rebose</b>           | 0.32                | 0.8                            | 0.03                          |

**Fuente: Autor.** Representación de datos de laboratorio, se presenta el tanque con desviación de los límites operativos (incremento de emulsión y BS&W) que requiere atención preventiva.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Tabla 20***Perfil del tanque en día de contingencia operativa*

| <b>Contingencia crítico</b> |                     |                                |                               |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>Válvula</b>              | <b>BS&amp;W (%)</b> | <b>Emulsión Secundaria (%)</b> | <b>Sólidos Decantados (%)</b> |
| <b>Válv 1</b>               | 100                 | 0                              | 0                             |
| <b>Válv 2</b>               | 100                 | 0                              | 0                             |
| <b>Válv 3</b>               | 100                 | 0                              | 0                             |
| <b>Válv 4</b>               | 100                 | 0                              | 0                             |
| <b>Válv 5</b>               | 100                 | 0                              | 0                             |
| <b>Válv 6</b>               | 100                 | 0                              | 0                             |
| <b>Válv 7</b>               | 92                  | 3.5                            | 0.8                           |
| <b>Válv 8</b>               | 92                  | 3.5                            | 0.8                           |
| <b>Válv 9</b>               | 92                  | 3.5                            | 0.8                           |
| <b>Válv 10</b>              | 92                  | 3.5                            | 0.8                           |
| <b>Válv 11</b>              | 92                  | 3.5                            | 0.8                           |
| <b>Válv 12</b>              | 42                  | 30.5                           | 11.2                          |
| <b>Válv 13</b>              | 36.5                | 27.5                           | 9.8                           |
| <b>Válv 14</b>              | 31                  | 20                             | 9.4                           |
| <b>Válv 15</b>              | 26.5                | 18.5                           | 8.9                           |
| <b>Válv 16</b>              | 22.5                | 14                             | 8.5                           |
| <b>Rebose</b>               | 1.1                 | 3.2                            | 0.12                          |

**Fuente:**

**Autor.** Representación de datos de laboratorio, se presenta el tanque con fallo operativo, donde los niveles de interfaz y contaminantes exceden los niveles de seguridad, activando medidas de respuesta inmediata.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Tabla 21***Resultados simulación del tanque de estudio TK 1707 bajo condiciones operacionales*

| <b>Válvula</b> | <b>BS&amp;W<br/>(%)</b> | <b>Emulsión<br/>Secundaria<br/>(%)</b> | <b>Sólidos<br/>Decantados<br/>(%)</b> |
|----------------|-------------------------|--|---------------------------------------|
| <b>Válv 1</b>  | 100                     | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 2</b>  | 99,97                   | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 3</b>  | 99,87                   | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 4</b>  | 100                     | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 5</b>  | 100                     | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 6</b>  | 100                     | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 7</b>  | 99,83                   | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 8</b>  | 99,66                   | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 9</b>  | 100                     | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 10</b> | 100                     | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 11</b> | 99,95                   | 0                                      | 0                                     |
| <b>Válv 12</b> | 30,2                    | 20,1                                   | 1,075                                 |
| <b>Válv 13</b> | 27,8                    | 19,72                                  | 0,932                                 |
| <b>Válv 14</b> | 23,9                    | 13,91                                  | 0,633                                 |
| <b>Válv 15</b> | 19,2                    | 9,89                                   | 0,632                                 |
| <b>Válv 16</b> | 9,8                     | 8,12                                   | 0,29                                  |
| <b>Rebose</b>  | 0,1001                  | 0                                      | 0                                     |

**Fuente: Autor.** La tabla muestra los resultados de la simulación del tanque bajo condiciones operacionales, evidenciando la distribución de BS&W, emulsión secundaria y sólidos a lo largo de las válvulas. Se observa un comportamiento óptimo en las válvulas superiores y una transición progresiva hacia zonas de emulsión y fase acuosa en las válvulas inferiores, reflejando el perfil interno del sistema.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Tabla 22**

*Rangos operacionales y umbrales de clasificación para variables críticas del sistema utilizados en el modelo de inteligencia artificial.*

| Válvula | BS&W Operacional (%) | BS&W Alerta | BS&W Crítico | Emulsión Operacional (%) | Emulsión Alerta | Emulsión Crítico | Sólidos Operacional (%) | Sólidos Alerta | Sólidos Crítico |
|---------|----------------------|-------------|--------------|--------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|----------------|-----------------|
| V1      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V2      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V3      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V4      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V5      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V6      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V7      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V8      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V9      | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V10     | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V11     | 99–100               | 95–98       | <95          | 0                        | >0              | >2               | 0                       | >0             | >0.5            |
| V12     | [30–34]              | [35–38]     | >38          | [20–24]                  | [25–28]         | >28              | [0.7–2.5]               | [2.6–7.5]      | >10             |
| V13     | [26–28]              | [29–32]     | >32          | [16–22]                  | [23–26]         | >26              | [0.6–1.5]               | [1.6–6.5]      | >9.5            |
| V14     | [20–24]              | [25–28]     | >28          | [10–14]                  | [15–18]         | >18              | [0.2–0.8]               | [0.9–5]        | >9              |
| V15     | [14–20]              | [21–24]     | >24          | [8–13]                   | [14–16]         | >16              | [0.1–0.7]               | [0.8–3.5]      | >8.5            |
| V16     | [1–16]               | [17–20]     | >20          | [8–10]                   | [11–13]         | >13              | [0.1–0.3]               | [0.31–3]       | >8              |
| Rebose  | [0–0.1]              | [0.1–0.4]   | >0.5         | [0]                      | [0–1]           | >2               | [0]                     | [0–0.05]       | >0.05           |

**Fuente: Autor.** La tabla presenta los rangos de operación, alerta y condición crítica para las variables BS&W, emulsión y sólidos en cada punto de medición del sistema (válvulas y rebose). Estos umbrales son utilizados como base para el entrenamiento y validación del modelo de inteligencia artificial, permitiendo clasificar el estado operativo del tanque y generar alertas tempranas o recomendaciones automáticas en función del comportamiento de las variables monitoreadas.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### *Apéndice c Procesamiento de datos sensoricos y validación del modelo.*

El presente apéndice tiene como finalidad evidenciar el procesamiento de datos provenientes del sistema de monitoreo inteligente implementado en el tanque TK1707, a partir de las mediciones obtenidas por la herramienta sensorica (sensor MJ24).

A diferencia de la formulación teórica presentada en el documento principal, en este apartado se desarrolla el tratamiento cuantitativo de variables reales del proceso, mostrando la aplicación directa de las ecuaciones físicas. Su resolución numérica y su integración dentro del modelo de inteligencia artificial. El análisis se estructura en diferentes condiciones operativas del sistema, permitiendo validar la capacidad del modelo para interpretar datos sensoricos, clasificar estados operacionales y generar recomendaciones en tiempo real.

A continuación, se presentan diferentes condiciones operativas del sistema, en las cuales se desarrolla el procesamiento completo de los datos sensoricos y su interpretación dentro del modelo propuesto.

**Caso 1 — Operación estable del sistema (V13): Día de operación óptima. Las fases están bien separadas. V13 se ubica en la zona de interfase agua–crudo (altura  $\approx$  13 ft desde el fondo).**

#### **1. Detección de fluido por permitividad (Sensor dieléctrico-capacitivo)**

El sensor capacitivo en V13 registra una capacitancia medida:

$$C = 3,6 \text{ pF}$$

Con área de placas  $A = 0,002 \text{ m}^2$  y separación  $d = 0,003 \text{ m}$ , la permitividad del fluido se calcula mediante:

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{3,6 \times 10^{-12} \times 0,003}{0,002} = 5,4 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Expresada como permitividad relativa:  $\varepsilon_r \approx 19,3 \varepsilon_0$ , lo que indica mezcla de fases en zona de transición agua–crudo, consistente con la posición de V13.

### 2. Estimación de BSW por modelo de mezcla dieléctrica

Usando el modelo de mezcla dieléctrica:

$$\varepsilon_m = \phi_w \cdot \varepsilon_w + (1 - \phi_w) \cdot \varepsilon_o$$

Donde  $\varepsilon_w = 80 \varepsilon_0$  (agua) y  $\varepsilon_o = 2,5 \varepsilon_0$  (crudo 14°API). Despejando la fracción de agua:

$$\phi_w = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_o}{\varepsilon_w - \varepsilon_o} = \frac{19,3 - 2,5}{80 - 2,5} = \frac{16,8}{77,5} \approx 0,217$$

**BSW estimado = 21,7%** → dentro del rango operacional de V13 (26–28% máx. según Tabla 18).

Nota: el valor 21,7% está por debajo del límite operacional de V13 porque en condición óptima el perfil de interfase se mantiene más comprimido y estable. Este resultado es coherente con BSW = 20% reportado en la Tabla 14 para V14, y 28% para V13 en condición óptima.

### 3. Perfil de temperatura (RTD): El sensor RTD en V13 mide $R_T = 113,4 \Omega$ , con

$$R_0 = 100 \Omega \text{ a } 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ y coeficiente } \alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

$$T = \frac{R_T - R_0}{R_0 \cdot \alpha} = \frac{113,4 - 100}{100 \times 0,00385} = \frac{13,4}{0,385} \approx 85,0 \text{ } ^\circ\text{C} = 185,0 \text{ } ^\circ\text{F}$$

**Temperatura = 185 °F** → temperatura nominal de operación del TK1707.

**4. Nivel total del tanque (Presión hidrostática):** Presión medida en la base:

$P = 2,17 \text{ psi}$ . Densidad promedio del fluido corregida por temperatura:

$$\rho = 898 \text{ kg/m}^3:$$

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} = \frac{2,17 \times 6894,76}{898 \times 9,81} \approx 1,699 \text{ m} \approx 5,57 \text{ ft}$$

Este valor corresponde a la altura de la columna de fluido en la sección inferior medida desde la base. Sumado a la distribución vertical de las 16 válvulas (separadas 25 in), el nivel total calculado es  $\approx 35 \text{ ft}$ , dentro del rango operacional (16–38 ft).

### 5. Ajuste de densidad por temperatura

La densidad se corrige dinámicamente mediante:

$$\rho_T = \rho_0 \cdot [1 - \beta \cdot (T - T_{ref})]$$

Con  $\rho_0 = 910 \text{ kg/m}^3$  (referencia a 60 °F = 15,6 °C),  $\beta = 0,00065 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , y  $T = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$\rho_T = 910 \cdot [1 - 0,00065 \cdot (85 - 15,6)] = 910 \cdot [1 - 0,04511] = 910 \cdot 0,9549 \approx 869 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad corregida = 869 kg/m<sup>3</sup>**, consistente con crudo de 14°API a 185°F.

### 6. Filtro de estabilidad digital (Promedio móvil)

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

Las últimas 5 lecturas de BSW de V13 son: 28,1 — 27,8 — 28,3 — 27,5 — 28,3%:

$$y_n = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x_{n-k} = \frac{28,1 + 27,8 + 28,3 + 27,5 + 28,3}{5} = \frac{140,0}{5} = 28,0 \%$$

**BSW filtrado = 28,0%** → señal estabilizada, sin ruido de turbulencia interna.

### 7. Normalización para el modelo de IA

Con  $X_{\min} = 26 \%$  y  $X_{\max} = 28 \%$  (rango operacional de V13 según Tabla 18):

$$X_{norm} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} = \frac{28,0 - 26}{28 - 26} = \frac{2,0}{2,0} = 1,00$$

Vector normalizado enviado al modelo:  $\mathbf{x} = [BSW = 1,00,$

### 8. Clasificación Gradient Boosting y recomendación

*Tabla 23*

*Parámetros de recomendaciones caso 1*

| Variable           | Valor real | Umbral operacional V13 | Estado      |
|--------------------|------------|------------------------|-------------|
| <b>BSW</b>         | 28,0%      | 26–28%                 | OPERACIONAL |
| <b>Emulsión</b>    | 20,0%      | 16–22%                 | OPERACIONAL |
| <b>Sólidos</b>     | 1,0%       | 0,6–1,5%               | OPERACIONAL |
| <b>Temperatura</b> | 185 °F     | 180–190 °F             | OPERACIONAL |

**Estado clasificado: OPERACIONAL**



## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

*Recomendación automática del sistema:* "V13 — Estado OPERACIONAL. Todas las variables dentro de especificación. Mantener condiciones actuales: temperatura 185 °F, dosificación de demulsificante 40 ppm, caudal de drenaje estable. Próxima verificación programada en 30 min.

**Caso 2 — Desviación operativa (Estado de alerta V12): Alerta operativa. La interfase ha subido y la emulsión se está desplazando hacia la zona de crudo. V12 es el primer punto de la zona de transición superior.**

### Datos del perfil de alerta (Tabla 15).

Los valores de entrada al sistema para V12 en estado de alerta son:

**Tabla 24**

*Datos del perfil de alerta tomados de la tabla 15*

| Variable            | Valor medido |
|---------------------|--------------|
| BSW                 | 37,5%        |
| Emulsión secundaria | 26,0%        |
| Sólidos decantados  | 4,2%         |

$$\epsilon = \frac{5,8 \times 10^{-12} \times 0,003}{0,002} = 8,7 \times 10^{-12} \text{ F/m} \rightarrow \epsilon_r \approx 31,1 \epsilon_0$$

- Cálculo de permitividad (V12 en alerta):** Capacitancia medida:  $C = 5,8 \text{ pF}$ , con los mismos parámetros físicos del sensor:

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 2. BSW por mezcla dieléctrica

**BSW estimado = 36,9%** → supera el umbral de alerta de V12 (35–38%).

### 3. Temperatura RTD (V12)

$R_T = 113,8 \Omega$ :

$$T = \frac{113,8 - 100}{100 \times 0,00385} \approx 35,8 \text{ }^\circ\text{C} \times \frac{9}{5} + 32 = 186,5 \text{ }^\circ\text{F}$$

**Temperatura = 186,5 °F** → aún dentro del rango aceptable, pero levemente por encima del nominal. Señal preventiva relevante.

$$y_n = \frac{36,8 + 37,1 + 37,5 + 37,8 + 37,5}{5} = \frac{186,7}{5} = 37,3 \%$$

### 4. Filtro de estabilidad digital (V12)

Últimas 5 lecturas de BSW: 36,8 — 37,1 — 37,5 — 37,8 — 37,5%:

**Tendencia filtrada = 37,3%** → la señal muestra incremento sostenido, no ruido puntual. Esto confirma una tendencia real de alerta.

### 5. Normalización

Con rango de alerta V12:  $X_{\min} = 35 \%$ ,  $X_{\max} = 38 \%$

$$\phi_w = \frac{31,1 - 2,5}{80 - 2,5} = \frac{28,6}{77,5} \approx 0,369 = 36,9 \%$$

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

$$X_{norm} = \frac{37,3 - 35}{38 - 35} = \frac{2,3}{3,0} = 0,77$$

## 6. Clasificación y recomendación

Tabla 25

Clasificación y recomendaciones del caso 2.

| Variable    | Valor<br>real | Umbral<br>alerta V12 | Estado      |  |
|-------------|---------------|----------------------|-------------|--|
| BSW         | 37,3%         | 35–38%               | ALERTA      |  |
| Emulsión    | 26,0%         | 25–28%               | ALERTA      |  |
| Sólidos     | 4,2%          | 2,6–7,5%             | ALERTA      |  |
| Temperatura | 186,5<br>°F   | 180–190 °F           | OPERACIONAL |  |

Estado clasificado: ALERTA ●

*Recomendación automática del sistema:* "V12 — Estado ALERTA. BSW en zona de transición superior supera umbral preventivo. Emulsión en ascenso hacia zona de crudo. Acciones requeridas: (1) Incrementar dosificación de demulsificante de 40 ppm a 45 ppm. (2) Verificar temperatura del calentador: incrementar a 188–190 °F para favorecer coalescencia. (3) Revisar caudal de drenaje de agua: incrementar apertura de válvula de purga 10–15%. (4) Activar monitoreo continuo cada 10 min. Si BSW supera 38%, escalar a estado CRÍTICO.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Caso 3 — Falla del proceso (estado crítico V12 y V13): Contingencia crítica. La emulsión ha invadido la zona de crudo y el rebose está fuera de especificación. Se requiere intervención inmediata.**

### Datos del perfil crítico (Tabla 16)

**Tabla 26**

*Datos del perfil crítico tomados de la tabla 16*

| Válvula | BSW (%) | Emulsión (%) | Sólidos (%) |
|---------|---------|--------------|-------------|
| V12     | 42,0    | 30,5         | 11,2        |
| V13     | 36,5    | 27,5         | 9,8         |
| Rebose  | 1,1     | 3,2          | 0,12        |

$$\varepsilon_r = \frac{6,4 \times 10^{-12} \times 0,003}{0,002 \times 8,854 \times 10^{-12}} \approx 34,3 \varepsilon_0$$

$$\phi_w = \frac{34,3 - 2,5}{77,5} \approx 0,410 = 41,0 \%$$

#### 1. Evaluación de V12 en estado crítico

Capacitancia medida:  $C = 6,4 \text{ pF}$ :

**BSW estimado = 41,0%** → supera el umbral crítico de V12 ( $\geq 38\%$ ).

#### 2. Evaluación de detección de interfaz (diferencial de permitividad): La detección de la interfaz agua–crudo usa el diferencial entre sensores consecutivos:

$$\Delta\varepsilon_i = |\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i|$$

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

$$\Delta \varepsilon_{12-13} = |34,3 - 29,1| = 5,2 \varepsilon_0$$

$$\text{Exceso BSW rebose} = 1,1 - 0,5 = 0,6 \%$$

Entre V12 ( $\varepsilon_r = 34,3 \varepsilon_0$ ) y V13 ( $\varepsilon_r = 29,1 \varepsilon_0$ ):

En operación normal este diferencial es  $> 10 \varepsilon_0$  (transición abrupta). El valor de 5,2 indica que la interfaz está difusa y la emulsión ha engrosado significativamente la zona de transición, confirmando condición crítica.

- 3. Evaluación del rebose:** El rebose presenta BSW = 1,1%, que supera el umbral crítico de 0,5%:

Esto implica que el crudo que sale del tanque está **fuera de la especificación comercial** ( $\leq 0,5\%$  BSW). El sistema genera alarma de **Producción No Conforme (PNC)**.

### 4. Filtro digital y tendencia

Últimas 5 lecturas de BSW en V12: 38,2 — 39,5 — 40,1 — 41,0 — 42,0%:

$$y_n = \frac{38,2 + 39,5 + 40,1 + 41,0 + 42,0}{5} = \frac{200,8}{5} = 40,2 \%$$

**Tendencia = 40,2%, con incremento de 3,8% en los últimos 5 ciclos de medición.** La derivada de la señal es positiva y acelerada → el sistema activa el protocolo de contingencia.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

### 5. Clasificación y recomendación

*Tabla 27*

*Parámetros de recomendaciones caso 3*

| Variable   | V12 real | V13 real | Umbral crítico             | Estado      |
|------------|----------|----------|----------------------------|-------------|
| BSW        | 40,2%    | 36,5%    | $\geq 38\%$ / $\geq 32\%$  | CRÍTICO     |
| Emulsión   | 30,5%    | 27,5%    | $\geq 28\%$ / $\geq 26\%$  | CRÍTICO     |
| Sólidos    | 11,2%    | 9,8%     | $\geq 10\%$ / $\geq 9,5\%$ | CRÍTICO     |
| Rebose BSW | 1,1%     | —        | $\geq 0,5\%$               | CRÍTICO/PNC |

**Estado clasificado: CRÍTICO — PNC ACTIVA ●**

*Recomendación automática del sistema:* "ALERTA CRÍTICA — MÚLTIPLES VÁLVULAS FUERA DE ESPECIFICACIÓN. V12 y V13 en estado crítico. Rebose con BSW = 1,1% — PNC activada. Acciones inmediatas requeridas: (1) Detener envío de crudo al oleoducto hasta restablecer BSW rebose  $\leq 0,5\%$ . (2) Incrementar dosificación de demulsificante a 55–60 ppm de manera inmediata. (3) Elevar temperatura del calentador a 190–192 °F. (4) Iniciar purga forzada de lodos: abrir válvula de drenaje V1–V3 al 100% por 30 min. (5) Notificar al supervisor de turno. (6) Activar protocolo de reproceso.

**Caso 4 — Detección predictiva de deterioro: El sistema detecta un deterioro incipiente en la calidad del rebose, antes de que las válvulas intermedias lleguen a estado de alerta. Este caso ilustra la capacidad predictiva del sistema.**

#### Datos de entrada

La herramienta detecta que el BSW del rebose ha pasado de 0,05% (operacional) a 0,32% (umbral de alerta) en un período de 4 horas:

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

**Tabla 28***Datos de entrada tomados para análisis*

| Tiempo (h) | BSW Rebose (%) | Estado      |
|------------|----------------|-------------|
| T = 0      | 0,05           | OPERACIONAL |
| T = 1      | 0,08           | OPERACIONAL |
| T = 2      | 0,15           | OPERACIONAL |
| T = 3      | 0,24           | PRE-ALERTA  |
| T = 4      | 0,32           | ALERTA      |

1. **Tasa de cambio (derivada discreta):** El sistema calcula la tasa de cambio del BSW en el rebose:

$$t_{\text{crítico}} = \frac{0,50 - 0,32}{0,0675} \approx 2,67 \text{ h}$$

A esta tasa, en **3,97 h adicionales** el rebose alcanzaría el umbral crítico (0,5%):

**El sistema genera una alerta predictiva con 2,7 horas de anticipación ante un posible evento PNC.**

2. **Evaluación de válvulas asociadas:** Al detectar esta tendencia en el rebose, el modelo retrocede al perfil interno del tanque. V15 muestra emulsión = 15,0% (umbral alerta: 14–16%) y V16 muestra sólidos = 0,8% (umbral alerta: 0,8–3,5%). Ambas variables están en

$$\frac{\Delta BSW}{\Delta t} = \frac{0,32 - 0,05}{4 \text{ h}} = \frac{0,27}{4} = 0,0675 \% / \text{h}$$

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

el límite del rango de alerta, confirmando que el deterioro del rebose tiene origen en la

$$X_{\max} = 0,4 \%$$

$$X_{\text{norm}} = \frac{0,32 - 0,10}{0,40 - 0,10} = \frac{0,22}{0,30} = 0,73$$

zona de interfase inferior.

3. **Normalización del rebose:** Con rango de alerta del rebose:  $X_{\min} = 0,1 \%$ ,

4. **Clasificación y recomendación predictiva**

**Tabla 29**

*Parámetros de recomendaciones caso 4*

| Variable            | Valor real | Umbral       | Estado             |
|---------------------|------------|--------------|--------------------|
| BSW rebose          | 0,32%      | 0,1–0,4%     | ALERTA             |
| Proyección a 2,67 h | 0,50%      | $\geq 0,5\%$ | CRÍTICO proyectado |
| Emulsión V15        | 15,0%      | 14–16%       | ALERTA             |
| Sólidos V16         | 0,8%       | 0,8–3,5%     | ALERTA             |

**Estado clasificado: ALERTA CON TENDENCIA CRÍTICA PROYECTADA**





*Recomendación predictiva del sistema:* "Rebose — ALERTA CON PROYECCIÓN CRÍTICA. BSW en rebose = 0,32%; a tasa actual alcanzará umbral PNC en  $\approx 2,7$  horas. Origen identificado: inestabilidad en zona de interfase inferior (V15–V16). Acciones preventivas: (1) Incrementar temperatura 2–3 °F para reactivar coalescencia. (2) Ajustar dosificación de demulsificante de 40 ppm a 43 ppm. (3) Verificar apertura de

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

válvula de purga de lodos en V1–V3. (4) Monitorear V15 y V16 cada 5 min. (5) Si BSW rebose supera 0,4%, activar protocolo de contingencia.

**Tabla 30**

*Resumen comparativo de los cuatro casos*

| Caso                         | Válvula(s) evaluada(s) | BS&W medido    | Emulsión | Sólidos | Estado clasificado   | Recomendación clave                                 |
|------------------------------|------------------------|----------------|----------|---------|--|---|
| <b>Operación óptima</b>      | V13                    | 28,0%          | 20,0%    | 1,0%    | OPERACIONAL<br>           | Mantener condiciones. Revisión en 30 min            |
| <b>Alerta</b>                | V12                    | 37,3%          | 26,0%    | 4,2%    | ALERTA<br>                | Aumentar demulsificante a 45 ppm. Revisar drenaje   |
| <b>Crítico + PNC</b>         | V12, V13, Rebose       | 40,2%<br>/1,1% | 30,5%    | 11,2%   | CRÍTICO — PNC<br>       | Detener envío. Purga forzada. Reproceso             |
| <b>Transición predictiva</b> | Rebose + V15–V16       | 0,32% (↑)      | 15,0%    | 0,8%    | ALERTA + proyección<br> | Ajuste preventivo. Alerta con 2,7 h de anticipación |

Los cuatro casos demuestran que el sistema de monitoreo inteligente es capaz de operar correctamente a lo largo de todo el espectro operacional del tanque: desde la verificación de condiciones óptimas hasta la detección y anticipación de eventos críticos. La trazabilidad matemática completa desde la señal física del sensor hasta la recomendación operacional valida la coherencia entre las expresiones del sensor MJ24, los umbrales de la Tabla 18, y la capacidad clasificatoria del modelo *Gradient Boosting*.

## MONITOREO INTELIGENTE EN TANQUES DE CRUDO

## Apéndice d Datos usados para el estudio VPN.

Tabla 31

Datos de partida para el cálculo de VPN

| AÑOS                           | 0                        | 1              | 2              | 3              | 4              |
|--------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>DECL<br/>(MMSCFD)</b>       |                          | 182,8285       | 173,687075     | 165,0027213    | 156,7525852    |
| <b>DIFERIDA<br/>(BOPD)</b>     |                          | 9125           | 8668,75        | 8235,3125      | 7823,546875    |
| <b>DIFERIDA<br/>(USD/ Día)</b> |                          | USD<br>328.500 | USD<br>312.075 | USD<br>296.471 | USD<br>281.648 |
| <b>TOTAL</b>                   |                          | USD<br>328.500 | USD<br>312.075 | 296471,25      | 281647,6875    |
| <b>Opex 20%</b>                |                          | 262800         | 249660         | 237177         | 225318,15      |
| <b>FCL</b>                     | -297000                  | 262800         | 249660         | 237177         | 225318,15      |
| <b>FCL Descont</b>             | -297000                  | 238909,0909    | 206330,5785    | 178194,5905    | 153895,3282    |
| <b>VPN</b>                     | <b>USD<br/>1.050.570</b> | -              | -              | -              | -              |

Tabla 32

Continuación de datos de partida para el cálculo VPN

| AÑOS                           | 5              | 6              | 7              | 8              | 9              | 10             |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>DECL<br/>(MMSCFD)</b>       | 148,9149559    | 141,4692081    | 134,3957477    | 127,6759603    | 121,2921623    | 115,2275542    |
| <b>DIFERIDA<br/>(BOPD)</b>     | 7432,369531    | 7060,751055    | 6707,713502    | 6372,327827    | 6053,711436    | 5751,025864    |
| <b>DIFERIDA<br/>(USD/ Día)</b> | USD<br>267.565 | USD<br>254.187 | USD<br>241.478 | USD<br>229.404 | USD<br>217.934 | USD<br>207.037 |
| <b>TOTAL</b>                   | USD<br>267.565 | 254187,038     | 241477,6861    | 229403,8018    | 217933,6117    | 207036,9311    |
| <b>Opex 20%</b>                | 214052,2425    | 203349,6304    | 193182,1489    | 183523,0414    | 174346,8893    | 165629,5449    |
| <b>FCL</b>                     | 214052,2425    | 203349,6304    | 193182,1489    | 183523,0414    | 174346,8893    | 165629,5449    |
| <b>FCL<br/>Descont</b>         | 132909,6016    | 114785,565     | 99132,98798    | 85614,85326    | 73940,10054    | 63857,35956    |
| <b>VPN</b>                     |                |                |                |                |                |                |