

Ecosistema de Análisis de Información:  
Impactando la Eficiencia Operacional a  
través del monitoreo de condición en  
la industria Oil & Gas.

IDC Ingeniería De Confiabilidad S.A.S.  
ODL Oleoducto De los Llanos S.A.

## Contenido

1. Contexto .....	2
1.1    Capacidad de las instalaciones .....	2
1.2    Estrategia de monitoreo y mantenimiento de la organización.....	3
2    Estrategia e implementación del proyecto .....	4
2.1    Identificación de oportunidades .....	5
2.2    Definición del alcance y desarrollo de piloto .....	6
2.3    Escalabilidad y despliegue.....	9
3    Resultados .....	11
3.1    Decisiones informadas y su impacto .....	11
3.2    Alineación de soluciones técnicas y tecnológicas a la visión de la organización .....	13
3.3    Trazando una ruta de innovación y mejora continua .....	13
4    Líderes del proyecto .....	14

# Ecosistema de Análisis de Información: Impactando la Eficiencia Operacional a través del monitoreo de condición en la industria Oil & Gas

## 1. Contexto

Con el proyecto, la organización busca impulsar e implementar el uso y el análisis de la información que aportan los datos provenientes de los sensores y sistemas de control actuales, para apoyar las decisiones estratégicas, mejorar el desempeño organizacional y operar de forma predecible y eficiente. Fortaleciendo la estructuración del ecosistema de análisis de información basado en indicadores operativos, tácticos y estratégicos.

Esto lo convierte en una innovación aplicada a la industria y la infraestructura, lo cual se alinea con el ODS. Así la organización fomenta un entorno de nuevas oportunidades de negocio y fortalece la mejora continua, mediante la conceptualización y materialización de iniciativas que entregan resultados concretos, que reten el statu quo o fortalezcan el objeto principal del del negocio, en el marco de la definición del futuro sostenible de la organización. Lo anterior, está en línea con la estrategia digital de la organización.

### 1.1 Capacidad de las instalaciones

El Oleoducto cuenta con facilidades para el bombeo de crudos pesados provenientes de diferentes campos. La infraestructura de la organización inicia en campo Rubiales en el municipio de Puerto Gaitán, Meta y atraviesa los departamentos de Meta y Casanare en un recorrido de 260 km hasta llegar a las estaciones de Cusiana en el municipio de Tauramena, Casanare y Monterrey en el municipio de Monterrey, Casanare. Actualmente, ODL desarrolla su operación empleando 2 estaciones de bombeo, la estación Rubiales donde tiene bombas de 3500 HP y 3750 RPM, y la estación Jagüey que cuenta con unidades de 6000 HP y 3550 RPM.

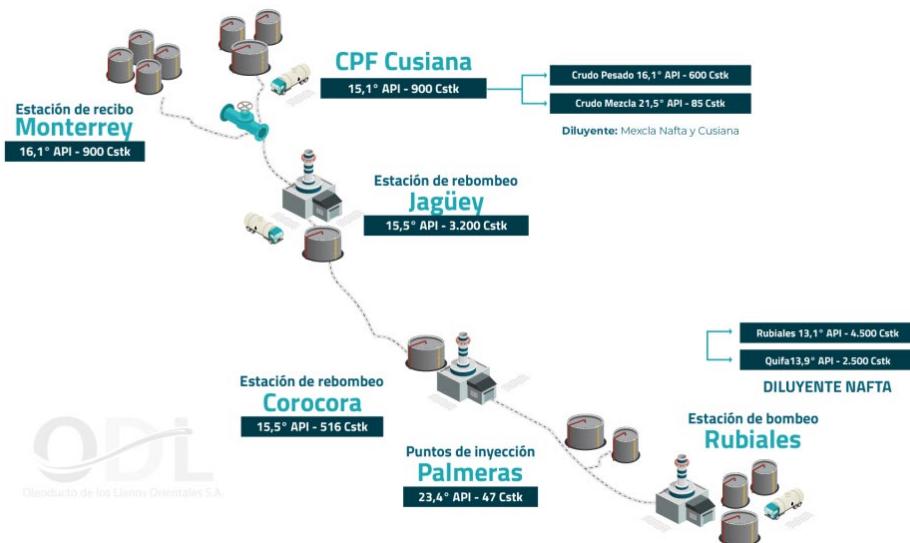


Figura 1. Capacidad instalada de la organización.

## 1.2 Estrategia de monitoreo y mantenimiento de la organización

Para el monitoreo de la integridad mecánica de las bombas, se tienen sistemas de medición de vibración y temperatura, con alarmas de proceso identificadas en el Sistema Básico de Control de Procesos (BPCS) y de apagado por emergencia en el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) que permiten tomar acción sobre los equipos y el proceso en caso de que las condiciones operativas de las bombas estén por fuera de las condiciones de diseño. Este sistema es monitoreado permanentemente por el área de operaciones mediante el sistema de Supervisión de Control y Adquisición de Datos (SCADA), y en caso de anomalías o desviaciones se reporta la novedad al área de gestión de activos para su respectiva inspección, seguimiento y corrección.

Adicionalmente la organización, como gran parte de las compañías industriales en Colombia, cuentan con una estrategia de mantenimiento preventivo para las bombas de despacho que consiste en la ejecución de rutinas de mediciones vibracionales (manuales con equipos portátiles) punto a punto con una frecuencia entre ellas alrededor de los 90 días. Este tipo de inspección requiere el desplazamiento de personal a las estaciones de bombeo y poder así realizar la recolección de la información de periodos de tiempo cortos, donde pueden existir vacíos de información en instantes de tiempo donde haya alteraciones en el comportamiento mecánico de la bomba, y perdida de información relevante para hallar la causa raíz de una eventual alteración.

## 1.3 Retos por cambios en el mercado

Los sistemas de bombas del oleoducto fueron diseñados para el transporte de crudos pesados a 18°API, sin embargo, dadas las condiciones del crudo de los yacimientos actuales, que resultan en cambios operativos de transporte, el crudo es transportado a una densidad de 15°API y mayor viscosidad (crudos más pesados), esto ha generado un incremento en el desgaste de las bombas evidenciado mediante el aumento de la frecuencia de falla de cada bomba. Como estrategia para preservar la integridad y la confiabilidad de las bombas, la empresa desarrolló e implementó el Plan de Mantenimiento Mayor de las bombas, basado en el tiempo de operación de las mismas.

Atendiendo estas nuevas condiciones, la operación del oleoducto ha evolucionado permitiendo incrementar la viscosidad del crudo transportado, condición que genera mayores esfuerzos en las bombas y cambia la zona de operación de las mismas, lo que conlleva a que se incremente la carga energética y esfuerzos mecánicos en las bombas.

Por esta razón, la organización dentro de su estrategia busca mediante el monitoreo en tiempo real y analítica de datos identificar alertas tempranas y el surgimiento de eventos que pongan en riesgo la vida útil y el desempeño de los activos.

## 2 Estrategia e implementación del proyecto

En la búsqueda de integrar la estrategia de gestión de activos, gestión de mantenimiento, operación y transformación digital, se requiere tener integraciones que garanticen una visión holística de los sistemas de bombeo, evitando así iniciativas aisladas, que impliquen múltiples fuentes de información, para esto se trabaja la estrategia bajo los establecido por el estándar ISO 55001.



Figura 2. Relación ISO 55001 y el desempeño de los activos.

Para cumplir la síntesis anteriormente descrita, se plantea una visión de desempeño que integra variables asociadas a la condición y variables asociadas a la operación, tomando como base la arquitectura ya existente en el sistema de control e integrando nuevas mediciones asociadas a los modos de falla de los sistemas de bombeo, esto permitirá la visión integrada que se requiere para las decisiones que demanda la organización.

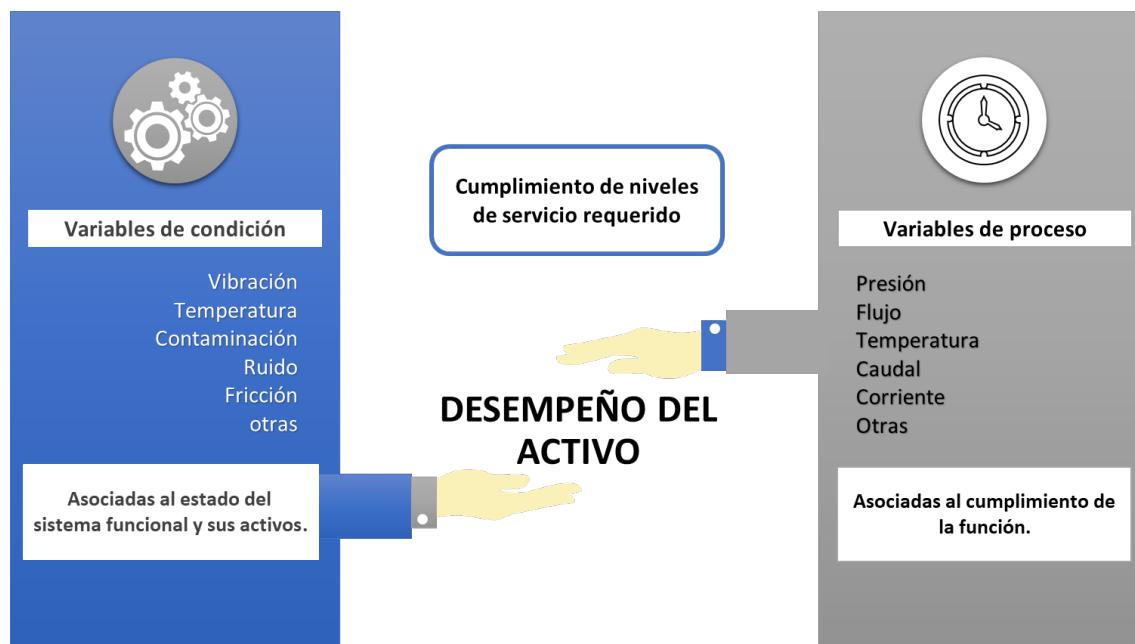


Figura 3. Descripción del concepto de desempeño.

## 2.1 Identificación de oportunidades

Durante la ejecución del Mantenimiento Mayor de las bombas principales de una de las estaciones, se evidenciaron fallas ocultas en los mecanismos y piezas internas de la bomba, y se estimó que con el incremento de la viscosidad aumentaron los riesgos de una falla imprevista que puede dejar los equipos de bombeo por fuera de servicio, alrededor de 18 semanas mientras se reponen los elementos en falla, y se acondiciona nuevamente la bomba para operar.

En 2021, un servicio especializado de medición multicanal reveló alteraciones en las bombas a altas frecuencias, no detectadas por el sistema de medición actual que carece de tecnología para identificar modos de falla en vibraciones de alta frecuencia. A pesar de contar con un sistema de protección y monitoreo, los equipos de medición no tienen la capacidad técnica necesaria para diagnosticar gráficas de las variables actuales ni para detectar eventos de vibración de alta frecuencia, afectando la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas de bombeo de hidrocarburos. Esto impide la identificación anticipada de fallas, aumentando el riesgo de daños catastróficos y pérdida de capacidad operativa.

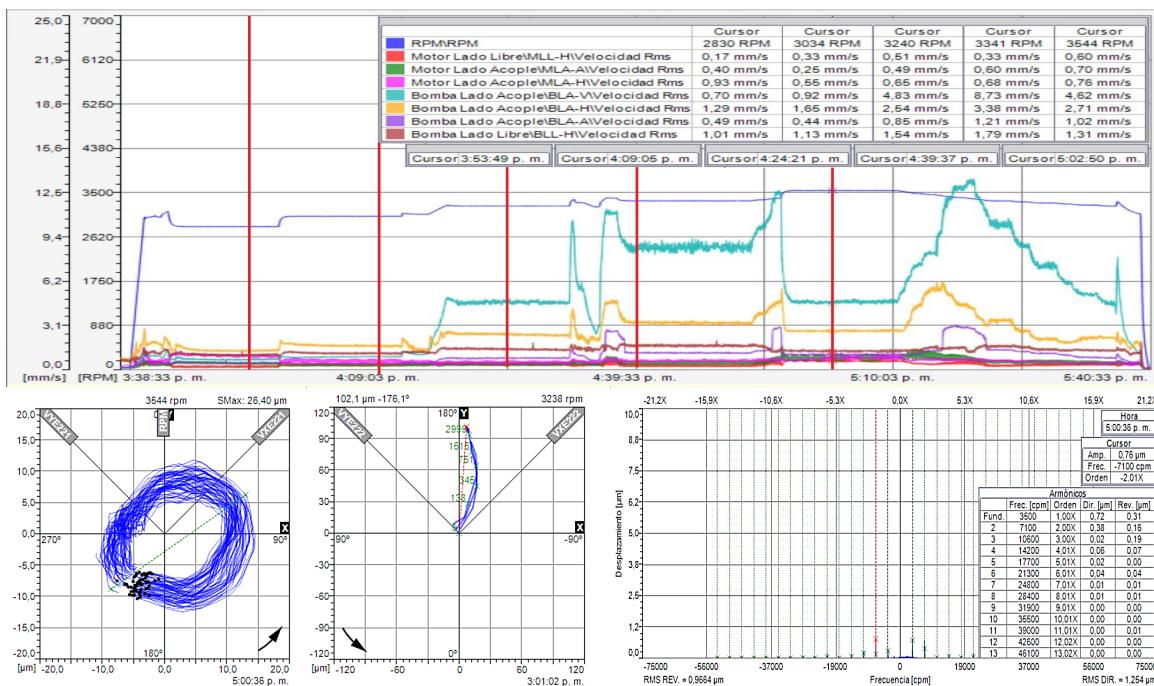
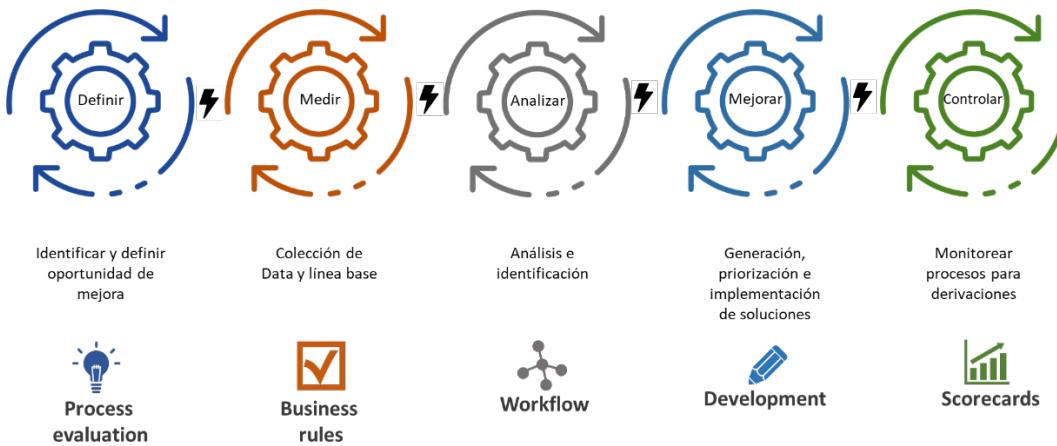


Figura 4. Algunas de las gráficas obtenidas en el análisis rotordinámico.

Por las condiciones mencionadas, se identifica que, con la implementación de un sistema automatizado de adquisición de datos de vibración, un grupo interdisciplinario de analítica encargado de identificar desviaciones en los parámetros, y un sistema de visualización y gestión de alertas, se lograría identificar de forma ágil las condiciones de operación y riesgo de las bombas que pueden llevarla a daños inesperados y con ello, migrar a un mantenimiento inteligente basado en datos predictivos a partir de analítica de información capturada y procesada en tiempo real 24/7.

## 2.2 Definición del alcance y desarrollo de piloto



**Figura 5.** Esquema de monitoreo bomba principal.

Antes de la implementación total del proyecto, se realizó un proyecto piloto a través del cual se logró la adquisición de datos en tiempo real del comportamiento rotodinámico de una bomba en observación y un análisis del comportamiento de la misma. Con esta medición se evidenció que el sistema estándar usado para medir la vibración en las bombas no identificó fallas, mientras que los equipos del sistema piloto adicional identificaron alertas, se pudieron generar recomendaciones de operación y posteriormente evaluar si las medidas correctivas surtieron efecto en la frecuencia de fallas de las bombas.

En la Figura 4. se presenta un detalle del desarrollo gráfico implementado durante la ejecución del piloto de prueba en una bomba, y que corresponde con una imagen del servidor en el cual se almacena la información que capturan los monitores Vibraspec 800 y Vibraspec 400 instalados, que permiten la visualización en tiempo real de las señales para su monitoreo y análisis continuo en alta frecuencia.



**Figura 6.** Esquema de monitoreo bomba principal.

Con el caso satisfactorio del piloto instalado, se determina que los equipos a utilizar durante el proyecto serían los desarrollados por IDEAR, modelos Vibraspec 800 y Vibraspec 400, estos son monitores de máquinas rotativas de 8 y 4 canales respectivamente que miden y analizan vibraciones mecánicas de alta frecuencia, admiten la conexión de diferentes tipos

de sensores de vibraciones y ofrecen múltiples opciones de comunicación con sistemas de control. Esta solución de monitoreo y analítica puede contar con hasta:

- ✓ 12 entradas dinámicas para conectar acelerómetros, sensores de velocidad o sensores de proximidad. 2 entradas de Trigger para medir RPM y fase desde sensores de proximidad o pickups
- ✓ Filtros y mediciones programables Comunicación Ethernet Modbus TCP Comunicación RS 485 Modbus RTU
- ✓ Salidas digitales para señalizar alarmas y parada Protección configurable por voto simple o doble voto
- ✓ Entradas digitales para bypass o cambio de niveles de alarma
- ✓ Adquisición de señales de las salidas Buffer del sistema de protección por proximidad de Bently Nevada, habilitando gráficas de diagnóstico.
- ✓ Incorporación de 4 nuevas señales en alta frecuencia en los puntos de apoyo del conjunto motor-bomba.



Figura 7. Instalación sistema de monitoreo y diagnóstico bomba principal.

Estas señales se configuran en la aplicación de monitoreo y se toman los datos con frecuencias para generar un historial (base de datos) con frecuencia de muestreo por segundo, posteriormente, usando la información capturada, se grafica el comportamiento de las señales y utilizando las herramientas del especialista en confiabilidad se realizará el respectivo análisis de comportamiento de las bombas; finalmente, usando todo lo anterior, se toman las decisiones o correcciones necesarias para implementar que permitan el funcionamiento óptimo, eficiente y alta disponibilidad de los equipos de bombeo.

La información y diagnósticos permitirán detectar de forma anticipada o con afectación parcial inicial, diferentes tipos de fallas que ocurren en equipos rotativos como lo son:

- ✓ Desgaste en cojinetes
- ✓ Malas condiciones en la lubricación
- ✓ Resonancias
- ✓ Desbalanceo y desequilibrios

- ✓ Desalineación y/o desnivelación de componentes
- ✓ Solturas mecánicas
- ✓ Cavitación
- ✓ Falta de estabilidad de ejes

Adicionalmente la solución a implementar posee salidas digitales para alertar las siguientes situaciones al equipo de Operación y Mantenimiento:

**Alarm:** Indica que hay altas vibraciones o un comportamiento anómalo en la bomba, problemas en sensores o con el cableado.

**Trip:** Indica que es necesario detener la máquina porque la condición o tendencia de las vibraciones son muy altas en uno o en dos sensores, según se configure voto simple o doble voto.

Los equipos Vibraspec junto al software MAINTraq OnLine cuentan con tecnología i4.0 para analizar y reconocer automáticamente a las vibraciones producidas por diferentes tipos de fallas, de este modo, cada problema se monitorea utilizando la variable especializada más apropiada.

Dentro de las ventajas de manejar las variables especializadas se cuentan con:

1. Mayor sensibilidad para la detección de problemas
2. Menor cantidad de falsas alarmas
3. Individualización de las vibraciones producidas por cada elemento de la máquina
4. Cuantificación de los modos de falla característicos por tipo de activo
5. Facilidad para la interpretación de alarmas y diagnósticos
6. Simplificación del monitoreo y del tiempo necesario para tomar decisiones

VARIABLE ESPECIALIZADA	CARACTERÍSTICA DE LA VIBRACIÓN	¿QUÉ FALLA MONITOREA?	MAGNITUD	EJEMPLO
	Fricción	Vibración aleatoria sin componentes periódicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condición de la lubricación</li> <li>• Rozamientos</li> <li>• Cavitación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceleración 0,8 g</li> </ul>
	Rodamientos	Impactos periódicos a las frecuencias del rodamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallas en rodamientos con códigos y RPM conocidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envolvente 3,7 gE</li> </ul>
	Engranajes	Bandas laterales en la vibración producida por un engranaje conocido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallas en engranajes con número de dientes y RPM conocidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad 2,5 mm/s</li> <li>• Aceleración</li> </ul>
	Desalineación	Vibración 1x, 2x, 3x sin armónicas superiores (4x a 10x)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desalineación de ejes con RPM conocidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad 4,3 mm/s</li> </ul>
	Solturas	Vibración 1x, 2x, 3x con armónicas superiores (4x a 10x)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solturas mecánicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad 3,5 mm/s</li> </ul>
	Desbalanceo	Vibración 1x con poco contenido armónico (2x a 10x)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desequilibrios de ejes y rotores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad 3,5 mm/s</li> </ul>
	Impactos periódicos	Impactos periódicos (descarta a los impactos aleatorios)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallas en rodamientos o RPM desconocidos</li> <li>• Golpes en ejes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envolvente 6,9 gE</li> </ul>
	Componentes	Vibración a una frecuencia u orden específico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paso de álabes</li> <li>• Problemas hidráulicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad 3,1 mm/s</li> <li>• Aceleración 0,8 g</li> <li>• Envolvente 2,7 gE</li> </ul>
	Armónicas	Contenido armónico de una determinada frecuencia fundamental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Golpes</li> <li>• Desgastes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad 3,5 mm/s</li> <li>• Aceleración</li> <li>• Envolvente</li> </ul>
	Bandas Laterales (Side Band Energy)	Bandas laterales con una dada frecuencia central y separación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas en engranajes con número de dientes desconocidos</li> <li>• Barras cortadas en rotores de motores eléctricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad 1,8 mm/s</li> <li>• Aceleración 0,3 g</li> <li>• Envolvente 3,5 gE</li> </ul>

**Figura 8.** Indicadores de falla 4.0 para simplificación del monitoreo.

## 2.3 Escalabilidad y despliegue

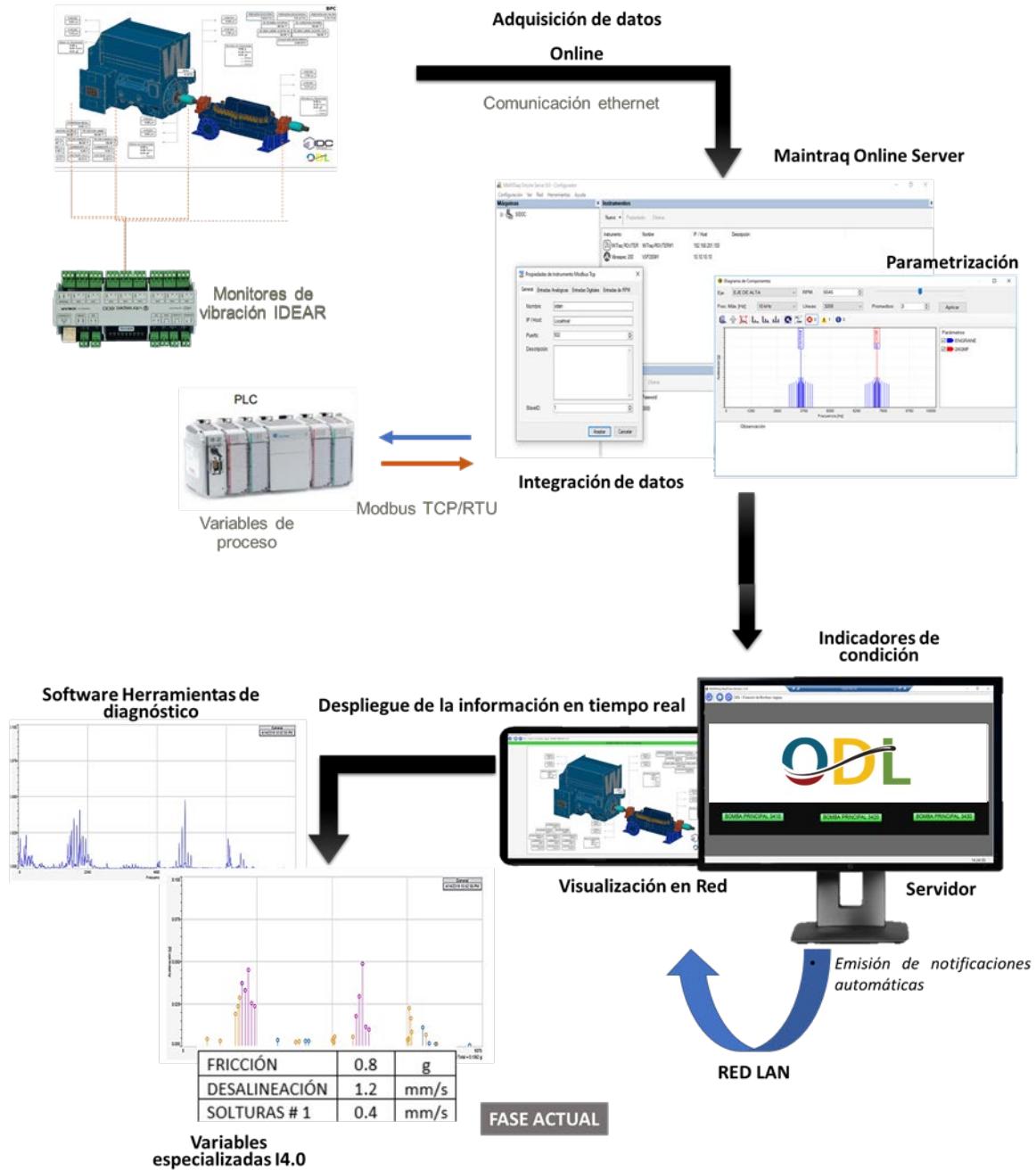


Figura 9. Arquitectura de monitoreo y diagnóstico.

La implementación se desarrolla sobre los siguientes grupos de unidades de bombeo:

- ✓ Bombas Principales de despacho
- ✓ Bombas Booster
- ✓ Bombas de descargaderos
- ✓ Bombas de dilución

Para una visualización integral de los activos productivos de la organización, se trabaja en la red, permitiendo correlación con variables de proceso y que todos los datos generados, pertenezcan a la organización.

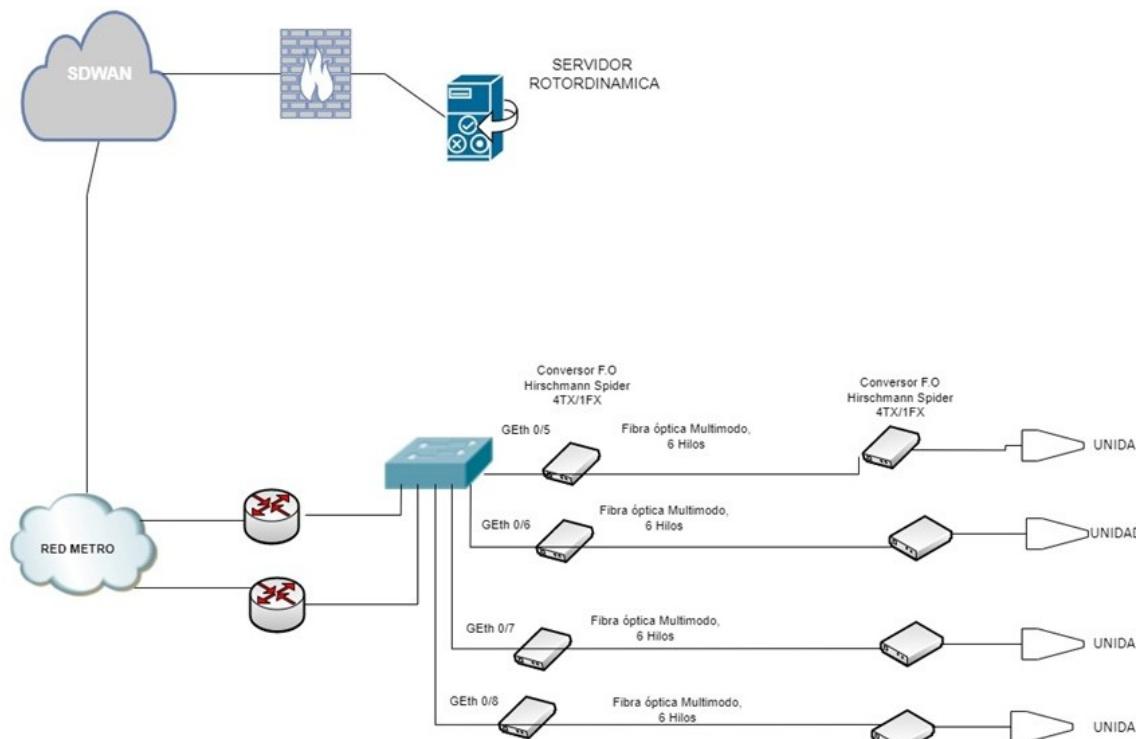


Figura 10. Arquitectura para manejo de la data.

### 3 Resultados

La novedad del proyecto radica en la Incorporación de sistemas autónomos de monitoreo y análisis de condición mecánica de los equipos críticos de las estaciones de bombeo de ODL, para recolectar y analizar información importante en tiempo real, de manera que se pueda detectar fallas ocultas con anticipación y tomar decisiones oportunas en las actividades de mantenimiento, lo cual podría eventualmente reducir el esquema de mantenimiento rutinario periódico, migrándolo a un esquema de mantenimiento inteligente predictivo a partir de analítica de datos de comportamiento de las bombas que impulsan los hidrocarburos.

#### 3.1 Decisiones informadas y su impacto

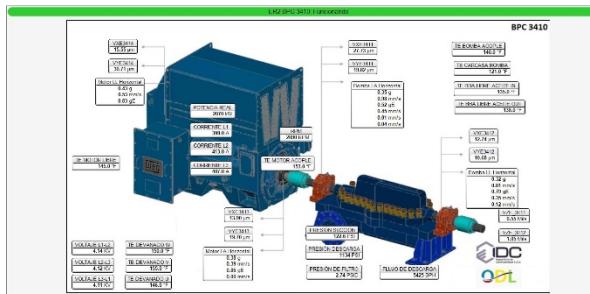
La incorporación de un sistema autónomo de monitoreo y análisis en las bombas de las estaciones de bombeo permite tener una visualización holística de los sistemas de monitoreo, tal como se evidencia en las siguientes gráficas que ahora son generadas y observadas en tiempo real.



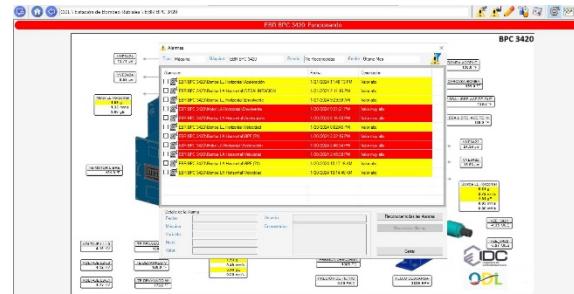
Visualización general de las estaciones



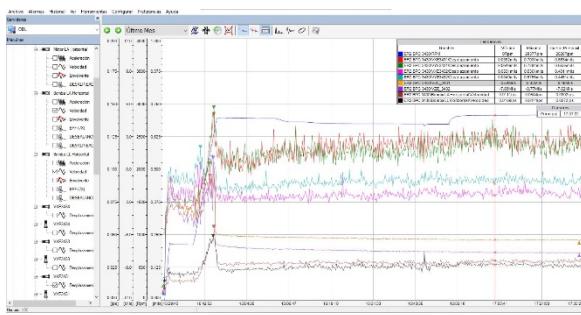
Visualización del grupo de activos por estación



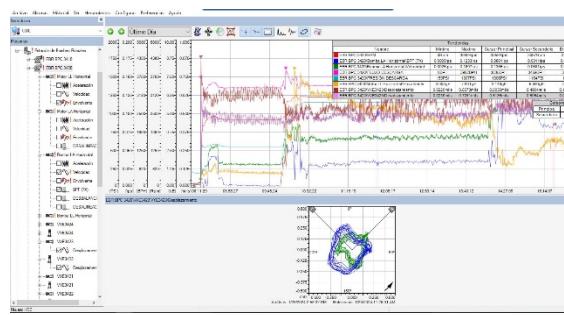
Visualizaciones integradas (contexto operacional – condición) por sistema.



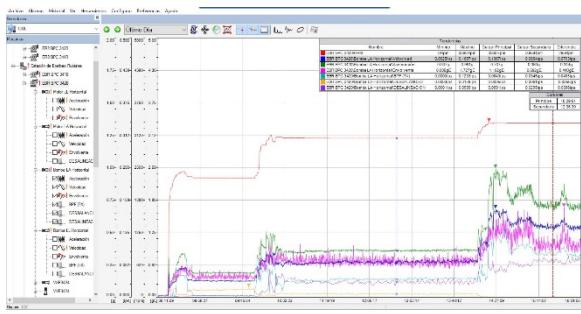
Estado de alarma genéricas y específicas (indicadores de falla 4.0) por sistema



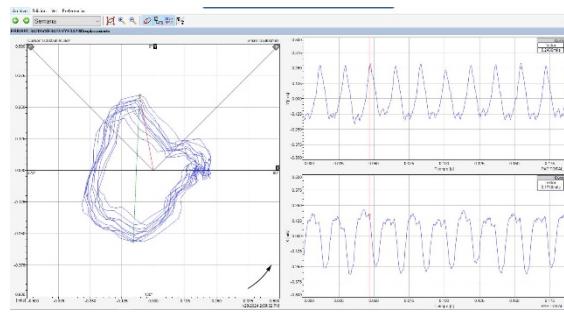
Caracterización del sistema posterior a una intervención de mantenimiento



Correlación de variables de proceso, variables de condición y gráficas de diagnóstico



Tendencias de indicadores de falla I4.0



Gráficas específicas de diagnóstico

Esto se traduce en toma de decisiones informadas y con menor incertidumbre, impactando en aspectos como:

1. **Operación:** Caracterización de las ventanas operativas, viabilidad de aumento de flujo y viscosidad.
2. **Gestión del mantenimiento:** Reducir mantenimientos correctivos y establecer una línea base para planear, coordinar y ejecutar mantenimientos preventivos-predictivos acertados en aras de reducir los costos, por la reducción de almacenamiento de repuestos, reducir tiempos de paradas no programadas e incrementar la confiabilidad y disponibilidad de las bombas.  
Generar alertas y reportes de manera automática con el fin de mejorar el tiempo de respuesta entre la detección de la condición o falla hasta la recuperación de la operación nominal de la bomba.
3. **Innovación:** Implementar los equipos y captura de información requerida para realizar análisis predictivos mediante herramientas computacionales y el uso de la ciencia de datos como base para la creación de correlaciones que abran el camino a la aplicación de la inteligencia artificial como mecanismo de identificación de alertas tempranas
4. **Organizacional:** Toma de decisiones estratégicas con menor riesgo, impactando en nuevas oportunidades de negocio y desarrollo sostenible. Incentivos y beneficios tributarios por inversiones en proyectos de innovación (MinCiencias-Ctel).

### 3.2 Alineación de soluciones técnicas y tecnológicas a la visión de la organización

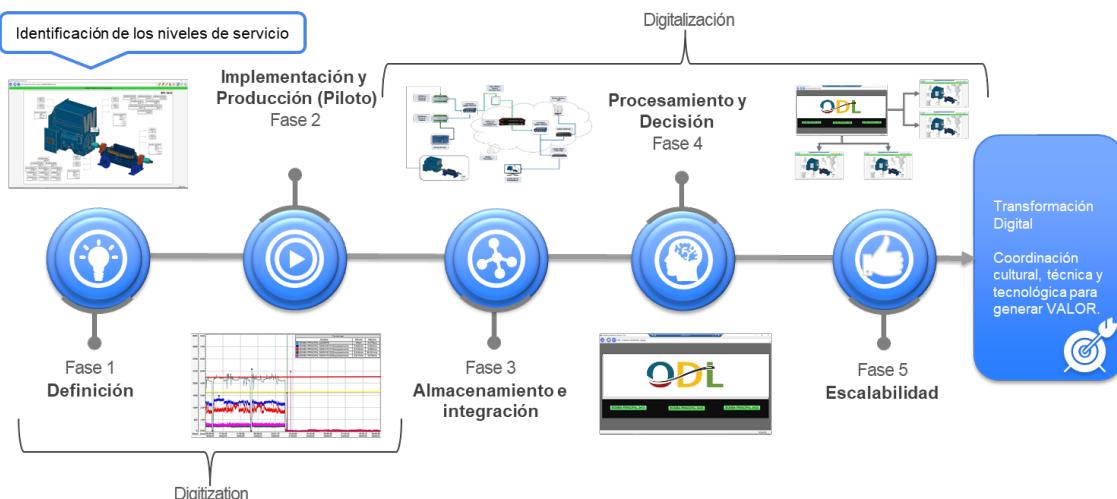


**Figura 11.** Alineación de la transformación digital con la estrategia de monitoreo.

Este es sin duda el primer paradigma que se abordó en la implementación, logrando una visión integrada del proyecto desde diferentes procesos de la organización (mantenimiento, instrumentación, tecnologías de la información, entre otros) y con un soporte claro desde la dirección de gestión de activos, permitiendo trazar una ruta clara y cuáles serían los objetivos comunes a lograr a través del proyecto, disminuyendo así la incertidumbre en su despliegue.

### 3.3 Trazando una ruta de innovación y mejora continua

El monitoreo de condición o performance es un aspecto clave que las organizaciones industriales deberán considerar en sus estrategias de transformación orientadas a garantizar la sostenibilidad, y abordarlo desde una óptica de confiabilidad, donde la adquisición de datos se enfoque en las variables relacionadas con los modos de falla, integrando diferentes fuentes de información, disminuirá los niveles de incertidumbre.



**Figura 12.** Escalabilidad del proyecto.

## 4 Líderes del proyecto

### **IDC Ingeniería de Confiabilidad S.A.S.**

#### **MARIA ALEJANDRA MARTÍNEZ DELGADO, CMRP, CGMC, IAM CERTIFICATE**

Ingeniera Mecánica, certificada como Líder AMP Strategic ISO 55000, profesional IAM, Profesional CMRP y Gestor de Mantenimiento y Confiabilidad ACIEM – CGMC, con más de 10 años de experiencia en el sector industrial en diferentes países de Latinoamérica, fundadora de la compañía IDC Ingeniería de Confiabilidad.

#### **JUAN CAMILO URANGO PERÉZ**

Ingeniero Mecánico de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, cursando maestría en Ingeniería Mecánica de esta misma facultad, analista de vibraciones ISO CAT II, con amplia formación en mantenimiento industrial, confiabilidad y gestión de activos. Liderazgo en implementación de estrategias de monitoreo de condición integrando elementos de la industria 4.0.

### **ODL Oleoducto de los Llanos S.A.**

#### **OSCAR MAURICIO HERRERA RUIZ**

Ingeniero Mecánico, Especialista en Gestión Integral de Proyectos, con más de 10 años de Experiencia en el sector Industrial y O&G, en áreas como Gestión de Activos, Mantenimiento y Proyectos.

#### **RUBEN DARIO MORENO SANCHEZ**

Ingeniero electrónico, MBA, con más de 12 años de experiencia en diversas industrias dentro del ámbito de la instrumentación y control.