

## DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE SALUD DE ACTIVOS Y GESTIÓN DE RIESGO DINÁMICO BASADO EN LA INFORMACIÓN DE MANTENIMIENTO Y MEDIDAS DE VARIABLES DE CONDICIÓN REGISTRADAS EN SAP-PM

Ricardo Andrés Guerrero B, Pedro Eduardo Cruz G.  
Edificio Principal. Carrera 13 # 36 24

E-mail: [ricardo.guerrero@ecopetrol.com.co](mailto:ricardo.guerrero@ecopetrol.com.co), [Pedro.cruz@ecopetrol.com.co](mailto:Pedro.cruz@ecopetrol.com.co)  
Bogotá, Colombia

### Resumen

*A través de la estandarización de las actividades del proceso de control de condición y riesgo en equipos así como el gobierno sobre la arquitectura establecida para uso de datos maestros y transaccionales generados dentro de la gestión de mantenimiento, la Vicepresidencia del Upstream de ECOPETROL S.A. estructuro modelos analíticos que agilizan la interpretación de los datos derivados del proceso para dar respuesta a las necesidades de estimar la salud de activos y calcular el riesgo dinámico en los activos productivos de ECOPETROL S.A. como elemento de toma decisiones operativas, de ejecución y presupuestal.*

### Introducción

Actualmente uno de los grandes retos de las organizaciones es lograr obtener valor de la inmensa cantidad de datos de los que ahora se disponen y no perder su capacidad de toma de decisiones paralizados por el análisis de diferentes fuentes de información y tableros de control.

En los activos productivos el reto es similar. Tomar una gran cantidad de información para luego procesarla y generar un análisis que facilite la toma de decisiones son el foco principal de los profesionales que hacen parte de los equipos de operaciones y mantenimiento.

En ese mismo contexto, si tomamos estos análisis las recomendaciones y adicionalmente valoramos el riesgo asociado a la materialización de la falla, es posible construir mecanismos de priorización que ayuden a optimizar recursos y a mejorar la oportunidad en las intervenciones, evitando que se presenten fallas de alto costo e impacto.

Es en este punto, donde los modelos de programación para aprendizaje de maquina y la fácil adopción de algoritmos de clasificación o predicción, se convierten en un apoyo clave de la gestión de los grupos de mantenimiento, toda vez que permiten programar y agilizar procesos de

cálculo y estimaciones sin tener que recurrir a programas o software comercial que pueden ejecutar este tipo de procesos (de complejidad media) pero a un costo operativo significativo, lo que limita su adopción.

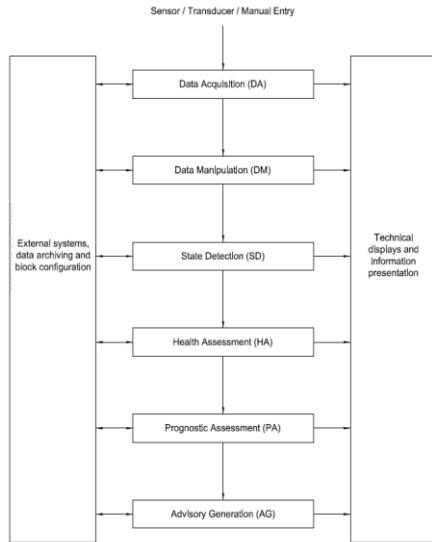
La Vicepresidencia del Upstream (VPU) de ECOPETROL S.A, desarrolla un modelo de salud de activos y riesgo dinámico, con el objetivo mitigar el impacto por la materialización de las fallas, facilitar el análisis de la información y agilizar la toma de decisiones utilizando todos los elementos de información y gestión de variables que se consolidan en SAP-PM al tiempo que la ejecución del modelo, el motor de cálculo y los resultados, también están consolidados dentro las capacidades extendidas de SAP.

### Conceptos generales del control de condición

El proceso de control de condición está enfocado en el procesamiento de información que permita generar un diagnóstico que lleve a una valoración de salud. Esta valoración de salud, al ser incorporada a un pronóstico y al riesgo asociado permite determinar acciones de solución. La norma ISO 13374-1 establece el marco general del proceso y esta es la base desarrollada en

ECOPETROL S.A. para adecuar el concepto de diagnóstico y salud de activos.

**Figura 1.** Modelo de procesamiento y flujo información



**Fuente:** ISO13374-1 Condition monitoring and diagnostics of machine

### Diagnóstico de Condición y Salud de Activos

El desarrollo de un programa de control de condición y riesgo se basa en los conceptos de diagnóstico de condición y salud de activos.

El diagnóstico de condición busca por medio de información, ya sea de un monitoreo o del seguimiento de una variable específica, realizar un análisis que permita llegar a una valoración del estado actual del activo.

El estado de salud conjuga diferentes diagnósticos de condición y con esto, persigue establecer un estado integral del activo. El estado integral del activo es conocido como salud del activo.

Es importante aclarar que la determinación de salud no se limita únicamente a la aplicación de técnicas predictivas, también busca incorporar información relevante del activo con el propósito de construir un diagnóstico integral.

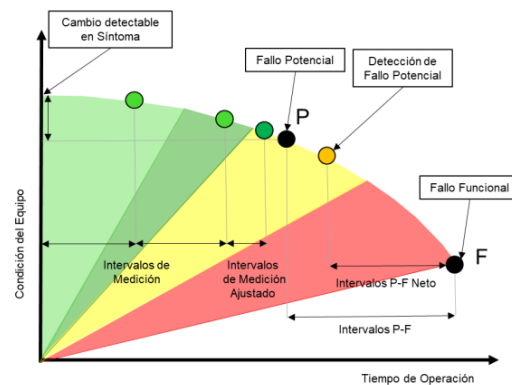
El propósito del control de condición es determinar la salud de los activos y facilitar la toma de decisiones. Ahora, al integrar la valoración de salud con el concepto de riesgo, se pueden definir acciones que permiten recuperar la condición de una manera priorizada.

### Analizar la condición

Para determinar el estado de salud de los activos, es necesario realizar un análisis de los diferentes diagnósticos de condición y al integrar diferentes fuentes es posible construir por medio del análisis, la condición de salud del activo.

Para esto, al graficar la condición de salud en el tiempo, la curva P-F (ver figura 2) se convierte en una herramienta para poder dar explicación a los diferentes estados de salud.

**Figura 2.** Interpretación de la curva P-F



**Fuente:** Autoría propia. 2024

Con la curva P-F se puede entender la evolución del estado de salud de un activo. Todos los activos en una fase de operación normal, comienza con una condición de salud “buena”, en donde el activo opera dentro de rangos y ventanas permitidos y no presenta síntomas que evidencien una condición anormal.

Al operar el activo, se empiezan a detectar síntomas que empiezan a evidenciar una condición

anormal. A esta fase se le conoce como “*en observación*” en donde se hace necesario hacer seguimiento bajo técnicas complementarias o de menor frecuencia que ayuden a monitorear las variables de desempeño.

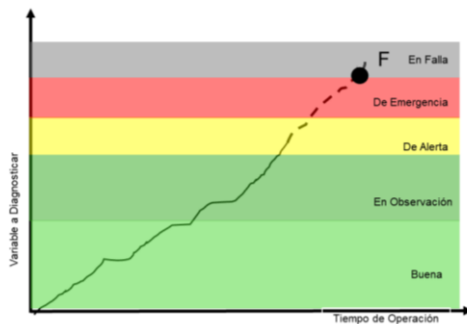
Cuando el activo se acerca al punto P, en donde se evidencia una falla potencial soportado por un diagnóstico de condición, se entra en una fase en donde se debe programar una intervención o sincronizar con la intervención más cercana. A este estado se le conoce como “*de alerta*”.

Ahora, cuando la condición y la valoración de salud establezca que el activo se encuentra en una fase muy cercana a la falla funcional (F) y que se requiere una intervención de manera inmediata sobre el activo, se establece un estado “*de emergencia*”.

Por último, en el caso en el que se presente la falla funcional del activo, se determina una condición “*en falla*”.

La figura 3 presenta los niveles de salud de los activos y su correlación con el desempeño de una variable en particular.

**Figura 3.** Comportamiento de una variable operacional dentro de la escala de salud



**Fuente:** Autoría propia. 2024

### Evaluación de riesgo del activo

Habiendo establecido las definiciones de condición y salud, se debe complementar con la definición de Riesgo asociado al activo.

ECOPETROL S.A ha incorporado 3 criterios para llevar control sobre el riesgo de los activos: *Riesgo Mitigado*, *Riesgo sin Mitigar* y *Riesgo Actual*.

En la figura 4 se presentan los atributos de riesgo sin mitigar (Rsm), Riesgo Mitigado (Rm) y Riesgo Actual (Ra).

- *El Riesgo sin Mitigar (Rsm)* corresponde al riesgo del activo considerando que no se realiza mantenimiento, hasta un nivel tan bajo como sea razonablemente posible
- *Riesgo Mitigado (Rm)* corresponde al riesgo potencial mínimo del activo con plan de mantenimiento. Estos atributos permiten establecer que los activos de acuerdo con su condición pueden pasar de un Riesgo sin Mitigar a un Riesgo Mitigado cuando se determine que la probabilidad de falla funcional está dentro del intervalo de falla funcional en la curva P-F
- *El Riesgo Actual (Ra)* se define como la valoración de riesgo del activo en tiempo presente y está directamente vinculado a su estado de salud.

Es así, como un activo que tenga una salud aceptable (buena o en observación), tendría una valoración de Riesgo Actual (Ra) muy cercana al riesgo mitigado, mientras que si el activo tiene una salud deficiente (alerta o emergencia), su valoración de riesgo actual (Ra) estará con un valor más cercano al riesgo sin mitigar.

El riesgo actual (Ra), busca representar la condición presente del activo teniendo en cuenta los niveles de riesgo extremos a los que puede llegar, para así establecer mecanismos de priorización en las intervenciones requeridas por los activos.







identificación de todos aquellos que metodológicamente tienen una decisión de correr hasta la falla.

Datos Dinámicos: Ingresan los aspectos que se capturan de manera variable en el proceso de gestión de los equipos. Las variables que captura el modelo están asociadas a los avisos de mantenimiento y su estado de ejecución o completitud, así como el impacto que tienen las intervenciones (planeadas y no planeadas) en el estado operativo del equipo.

Adicionalmente, los documentos de medición permiten capturar variables operacionales de los equipos al tiempo que habilita la cuantificación de criterios de expertos para valoraciones derivadas de monitoreos de condición remota.

Modelo de salud de activos ECP: Para generar una interfaz nativa con el sistema ERP de la compañía, la programación se desarrolló en lenguaje ABAP.

Como se ha descrito en las diferentes entradas, tanto los datos base como los datos dinámicos que alimentan el modelo, se estructuraron utilizando de manera prioritaria tablas, campos y elementos de gestión que están disponibles en SAP-PM. Este enfoque se aborda para representar al menos tres ventajas claves para la operación:

- No se generan interfaces externas de extracción, transformación y carga (ETL) para trabajar con los datos requeridos por el modelo. En ese orden de ideas, la auditoría y calidad del dato, se ejecuta sobre los documentos formales del sistema (avisos, ordenes, documentos de medida)
- Las transformaciones requeridas para normalizar la información se cargan internamente en la programación del sistema y no afectan los registros originales.

- El procesamiento del modelo y los resultados del algoritmo se generan y almacenan en tablas de la estructura de SAP. Esto permite generar y guardar dentro del sistema, además de las salidas, todo el registro de auditoría y trazabilidad.

El modelo de Salud de Activos ECP, se describe como un modelo de clasificación supervisada, en el que a través de etiquetas asignadas a los posibles datos de entrada se asignan categorías a las nuevas observaciones basándose en reglas o criterios definidos previamente.

De manera puntual, la versión actual del modelo de Salud de Activos ECP se basa en dos tipos de algoritmos:

- Reglas de asociación: Basadas en la identificación de relaciones entre variables entre datos de diferentes dimensiones
- Clasificadores basados en reglas: Utilizan un conjunto de reglas predefinidas para clasificar los datos.

Calificación y resultados: El resultado del modelo se presenta en función de las etiquetas diseñadas para caracterizar los niveles de salud de activos en ECOPETROL S.A, presentados en la Figura 3.

Adicionalmente, las capacidades derivadas de una ejecución desarrollada a través de ABAP, permiten desplegar en conjunto los resultados de la valoración de salud y otros campos asociados a la gestión de condición del equipo, particularmente, los valores de Riesgo Sin Mitigar y Riesgo Mitigado. La figura 7 es una representación parcial de los resultados del cálculo de salud

**Figura 7.** Presentación de los resultados del cálculo de salud

Equipo	Ce.e.	Ubicación técnica	Denominación objeto	Status	Usu	Est.	Sal	An	ES	Ant	Des
10000065	1000	LIS-PDHC-SCIN-E.	Bomba Principal Elect Sist Ci OP MT	30							EMERGE.
10000082	1000	LIS-PCGA-SCOM-	Motor a Gas Superior 12G8... SU EP	100							BUENO
10000083	1000	LIS-PCGA-SCOM-	Motor a Gas Superior 12G8... OP	60							OBSERVA.
10000092	1000	LIS-PCGA-SCOM-	Compresor de Gas Superior... OP	30							EMERGE.
10000276	1002	PRO-ESTO-SCOM-	Sistema de enfriamiento Co... OP	60							ALERTA
10000284	1002	PRO-ESTO-SCOM-	Motocompresor a Gas 12S... MT OP	30							EMERGE.
10000337	1002	PRO-ESTE-SCOM-	Compresor Dresser Rand 4... OP	30							EMERGE.
10000481	1005	ORY-PGOR-SGEN-	Generador Caterpillar S4b... OP MT	30							EMERGE.
10000516	1006	LLA-ESR3-SCIN-E.	Bomba 1 Scl Estacion 3 Lia... OP MT	100							BUENO
10000653	1006	GLN-PDHC-SCIN-E.	Bomba Centrífuga #2 OP MT	100							BUENO
10000744	1009	CSS-PINY-INYE-A.	Panel De Control OF	0							EN FALLA
10000926	1009	CSB-PJ10-INYE-A.	Bomba Centrífuga Inyección OF	0							EN FALLA
10002626	1036	MAG-ELMA-SAYR-	Bomba Engranajes Viking P... EF	0							EN FALLA

**Fuente:** SAP-PM. ECOPEPETROL S.A.

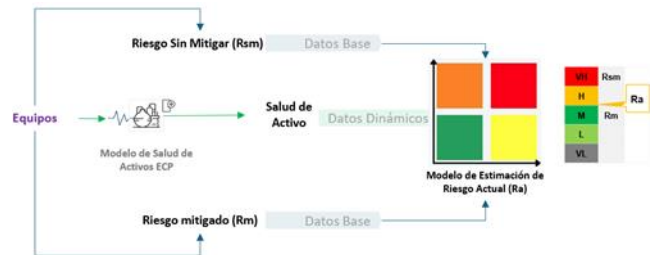
### Gestión del riesgo actual

Desarrollando la capacidad de obtener una métrica de salud de activos, se viabiliza un mecanismo para vincular el concepto de Riesgo Actual de los equipos a la gestión de mantenimiento y operación que se representa a través del concepto de Salud que se presentó en la Figura 4.

De manera similar al diseño establecido para el modelo de salud de activos, generar el cálculo la valoración de riesgo actual, parte de las premisas de ejecutar un algoritmo centralizado que corra sobre SAP-PM para que se ejecute periódicamente y almacene el resultado dentro del mismo dato maestro, permitiendo de esta manera la actualización en tiempo real de los datos de riesgo en los activos de la Vicepresidencia del Upstream de ECOPEPETROL S.A.

El flujo de trabajo tiene la siguiente representación, partiendo de las entradas al modelo:

**Figura 8.** Flujo de entradas y resultados del modelo de estimación de riesgo actual



**Fuente:** Autoría propia. 2024

A diferencia del modelo de salud de activos en donde la totalidad de los datos (base y dinámicos) que se utilizan han sido generados a través de los documentos y conexiones disponibles para alimentar SAP-PM, el cálculo de riesgo depende de los valores que generen a través del cálculo de salud.

En ese orden de ideas, se entiende que, para poder generar estimaciones de valor de riesgo actual, es necesario contar con Rm un cálculo previo del estado de salud.

Modelo de estimación de riesgo actual: Las entradas de este modelo, no requieren ninguna fase de extracción o transformación, únicamente realizan validaciones de completitud de los datos, toda vez que no aceptan datos faltantes.

La estimación de riesgo actual, al igual que el modelo de salud de activos, genera una clasificación supervisada a través de clasificadores basados en reglas.

Calificación y resultados: La estimación obtenida representa el valor de riesgo actual para un equipo. El resultado del modelo se presenta en función de las etiquetas diseñadas para caracterizar los niveles riesgo en ECOPEPETROL S.A

## Resultados

Asociado a la evolución y adecuada gestión de la salud:

- Se clasificaron 46.109 activos priorizados en las categorías de equipos críticos, equipos con riesgo sin mitigar H y VH. Adicionalmente, esta clasificación se complementa con atributos adicionales que indican aquellos equipos con requerimiento de ley.
- Sobre estos equipos se generan estimaciones programadas del modelo para definir el estado de salud e identificar los equipos asociados a dos focos principales: *equipos en “emergencia”* y *“equipos en falla”*.

Figura 9. Resultados del modelo de Salud de Activos

Foco Salud	1. Emergencia	2. Alerta	3. Observación	4. Bueno	5. Fuera de Servicio	Sin Valoración
1. Equipos Alta Prioridad	1	27	138	1074	9	1
2. Equipos Riesgo VII - H	12	200	967	11365	285	428
3. Equipos Críticos + Riesgo M.L.N	6	737	2721	28262	305	633
Total general	19	964	3826	40701	599	1062

Fuente: Autoría propia. 2024

**Valoración de salud y riesgo:** El avance en control de condición y riesgo ha estado enfocado en dos actividades claves:

- Incremento de coberturas en valoración de riesgo mitigado y sin mitigar
- Gestión sobre el estado de salud de los activos

Con relación a las coberturas, la Tabla 1 muestra el estado actual de los activos en donde se observa unos niveles de cobertura altos (99,53% en riesgo sin mitigar y 98,82% en riesgo mitigado) con referencia a la línea base de equipos de la vicepresidencia, la cual es mayor a 275.000 equipos. La utilización de los modelos de cálculo, se presenten con un elemento clave en la

segmentación y priorización de los contextos requeridos para la toma de decisión basada en riesgo.

Tabla 1. Coberturas de valoración de riesgo en activos la vicepresidencia del Upstream de ECOPETROL S.A

Gerencia	Recuento de Equipo	%Equipos con Riesgo sin Mitigar	Meta 2024	%Equipos con Riesgo Mitigado	Meta 2024	Cumplimiento
GOR	34715	99,95%	99,90%	99,90%	99,40%	100,27%
GPA	20519	98,05%	99,90%	98,05%	99,40%	98,39%
GDP	51011	98,93%	100,00%	98,60%	100,00%	98,76%
GCT	24230	99,58%	97,00%	97,35%	70,00%	117,92%
GMA	13561	99,71%	96,00%	98,57%	70,00%	119,44%
GRI	17196	99,75%	97,00%	98,27%	70,00%	118,57%
GTA	36730	99,57%	97,00%	97,36%	70,00%	117,92%
GCH	18666	100,00%	99,90%	100,00%	99,90%	100,10%
GDA	14611	100,00%	99,90%	100,00%	99,90%	100,10%
GDT	40903	100,00%	99,90%	100,00%	99,90%	100,10%
GLC	3819	100,00%	99,90%	100,00%	99,90%	100,10%
VPU	275961	99,53%	99,14%	98,82%	92,33%	103,59%

Fuente: Autoría propia. 2024

De estos activos, se puede observar una evolución positiva en la reducción de equipos con valoración de salud “en emergencia” o “en falla”.

La figura 10 presenta el comportamiento de este nivel de valoración en los últimos dos años, en donde se logra una reducción tanto en equipos en condición de emergencia (32 a 19) en un 40,6% y una reducción de equipos fuera de servicio (743 a 599) en un 19,4%.

Figura 10. Evolución de la gestión de equipos en emergencia y fuera de servicio



Fuente: Autoría propia. 2024



8º CONGRESO MUNDIAL  
DE MANTENIMIENTO Y  
GESTIÓN DE ACTIVOS



21 · 22 · 23  
MAYO · 2025  
Centro de Convenciones  
Cartagena de Indias - Colombia



22º Congreso Iberoamericano de Mantenimiento  
27º Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos - CIMGA

**Avances en la gestión del riesgo actual:** Para 2024, la ejecución del modelo de estimación de riesgo actual permitió evidenciar los siguientes resultados:

- 36.598 equipos con valoración actualizada de Riesgo actual sobre una meta de 44.488 equipos priorizados para la Vicepresidencia del Upstream.
- Se espera que para 2025, se logre la cobertura de 100% de riesgo actual sobre la meta establecida de equipos y se pueda ampliar el nivel de cobertura.
- Con la consolidación del ranking dinámico de riesgo, se espera poder conectar estos resultados con las actividades rutinarias de planeación y programación, así como en los elementos de driver de optimización de planes de mantenimiento.

### **Conclusiones**

Los modelos de salud de activos y riesgo dinámico en ECOPETROL S.A. se han incorporado a la operación de manera progresiva, logrando generar resultados positivos que se deben analizar desde dos dimensiones:

- En primer lugar, facilita que los equipos de trabajo hayan incorporado y consolidado la terminología y los mecanismos de trabajo asociados a conceptos como salud de activos y riesgo dinámico de una manera estandarizada para la Vicepresidencia del Upstream de ECOPETROL S.A.
- A nivel de los activos, se han reducido los eventos de falla, en especial sobre equipos en donde la criticidad y el riesgo es alta. Adicional, se logra reducir fallas de una manera priorizada que ha permitido

optimizar los recursos asociados al mantenimiento y la operación.

La adecuada definición de un proceso, sus premisas, el marco teórico y lo que se espera ejecutar a través de este, son un elemento indispensable para poder estructurar habilitadores tecnológicos que sean efectivos. En este caso, el proceso de control de condición y riesgo hace parte de un grupo de actividades clave que se han evolucionado en ECOPETROL S.A por más de una década.

A su vez, apalancados por la transformación digital, las nuevas capacidades de incorporar elementos de analítica y procesamiento, tanto a nivel interno como apoyados por proveedores especializados, se convierten en una pieza clave para estructurar iniciativas que finalmente habiliten el potencial existente en los datos que se generan en la organización, como por ejemplo todo lo relacionado con el control de variables de desempeño.

### **Bibliografía**

ECOPETROL S.A., “Guía para Control de Condición y Riesgo en Equipos de Superficie en Producción GOP-G-036 V.1”, ECOPEPETROL S.A. 2023.

ISO 13374-1/2/3/4, “Condition monitoring and diagnostics of machines — Data processing, communication and presentation”, International Organization for Standardization, 2003.

ISO 13379, “Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation and diagnostics techniques”, International Standards Organization, 2012

ISO 13381-1, “Condition Monitoring and diagnostics of machines – Prognostics”, International Standards Organization, 2015





8º CONGRESO MUNDIAL  
DE MANTENIMIENTO Y  
GESTIÓN DE ACTIVOS



21 · 22 · 23  
MAYO · 2025  
Centro de Convenciones  
Cartagena de Indias · Colombia



22º Congreso Iberoamericano de Mantenimiento  
27º Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos - CIMGA

## Hojas de vida

**Ricardo Andrés Guerrero Bahamón**, Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad EAFIT, con Maestrías en Administración de Negocios (MBA), Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo y Energías Renovables y Sostenibilidad Energética, Especialista en Gerencia y Alta Gerencia. Con 20 años de experiencia en la industria de oil & gas, de los cuales, 15 años han sido en Ecopetrol S.A. trabajando con los equipos de mantenimiento y confiabilidad en los diferentes campos de la Vicepresidencia de Producción. Actualmente, trabaja en la Gerencia de Excelencia y competitividad del Upstream con Ecopetrol S.A, liderando los equipos de mantenimiento y confiabilidad en la especialidad de equipo dinámico.

**Pedro Eduardo Cruz**, Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad America, Msc Maintenance Engineering & Asset Management de la Universidad de Manchester (UK), actualmente cursando maestría en Analítica de Información para Inteligencia de Negocios. Con 19 años de experiencia en la industria del oil & gas, implementado modelos de gestión y optimización en la función de mantenimiento y confiabilidad. Actualmente, trabaja en la Gerencia de Excelencia y competitividad del Upstream con Ecopetrol S.A, liderando los procesos de maduración y adopción tecnológica dentro del contexto de las necesidades de los equipos de mantenimiento y operaciones.