



28° CONGRESO INTERNACIONAL DE
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS



EXPO
MANTENER
2026



Ecopetrol: Predicción y Prevención de Violaciones de IOW mediante Machine Learning

De un enfoque reactivo a uno anticipatorio en la
gestión de integridad

22 | 23 | 24 ABRIL

Javier Gonzalez, Angélica Zapata, Yesid Carvajal



El Problema de las Ventanas Operativas de Integridad (IOW)

Thermal Diagnostic Gauge



El desafío no es definir los límites, sino predecir el momento exacto en que la operación se desvía hacia zonas críticas antes de que ocurra el daño.

La Cascada Reactiva



Desviación de Proceso

Aumento anómalo de temperatura.



Mecanismo de Daño

Fluencia y degradación metalúrgica.



Riesgo de Integridad

Fuga y falla inminente.



Impacto Final

Parada no planeada y pérdida de producción.

Una vez que el mecanismo de daño se activa, la ventana para tomar decisiones operacionales se cierra drásticamente.

El Cambio de Paradigma

Gestión Tradicional (Reactiva)



“Dependencia Humana”:
Sobrecarga de alarmas en sala de control.



“Detección Tardía”:
La alerta suena cuando el límite ya ha sido cruzado.



“Análisis Lineal”:
Incapacidad para cruzar variables complejas en tiempo real.



Gestión Anticipativa (Proactiva)



“Asistencia Algorítmica”:
Filtrado de ruido y alertas priorizadas.

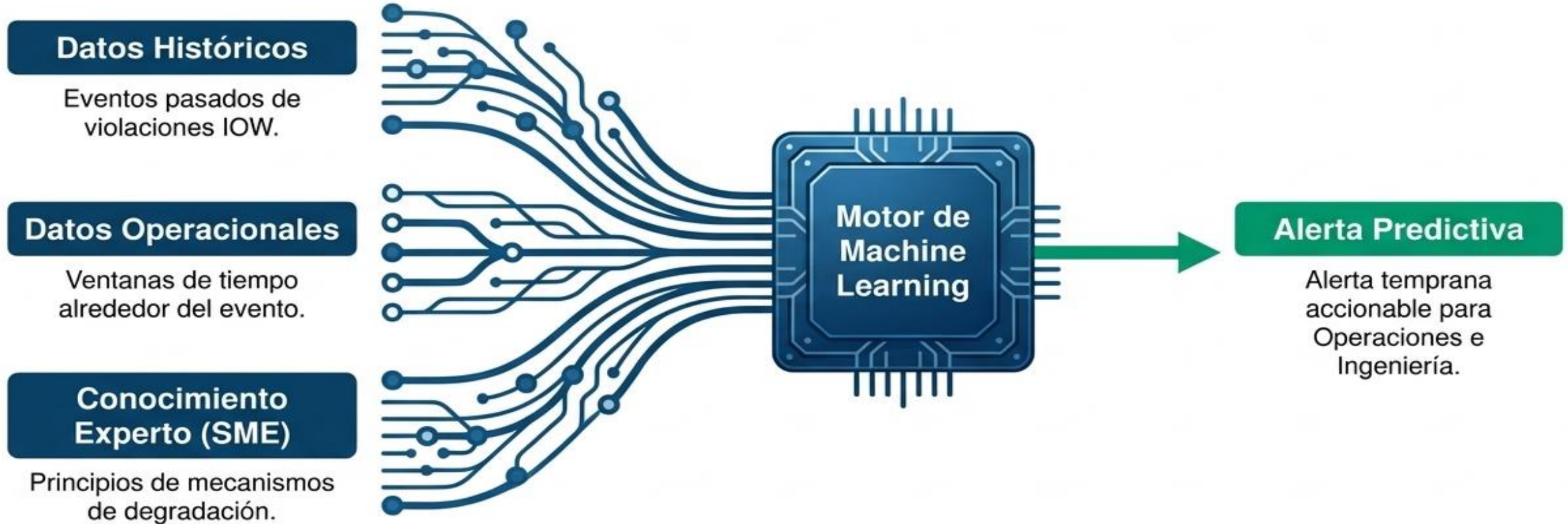


“Ventana de Oportunidad”:
Detección de anomalías horas antes de la violación.



“Reconocimiento de Patrones”:
Detección de correlaciones ocultas multivariantes.

La Capa de Machine Learning: El Embudo Predictivo



El algoritmo no reemplaza el conocimiento humano; lo escala, permitiendo procesar miles de variables simultáneamente para mantener la IOW bajo control.

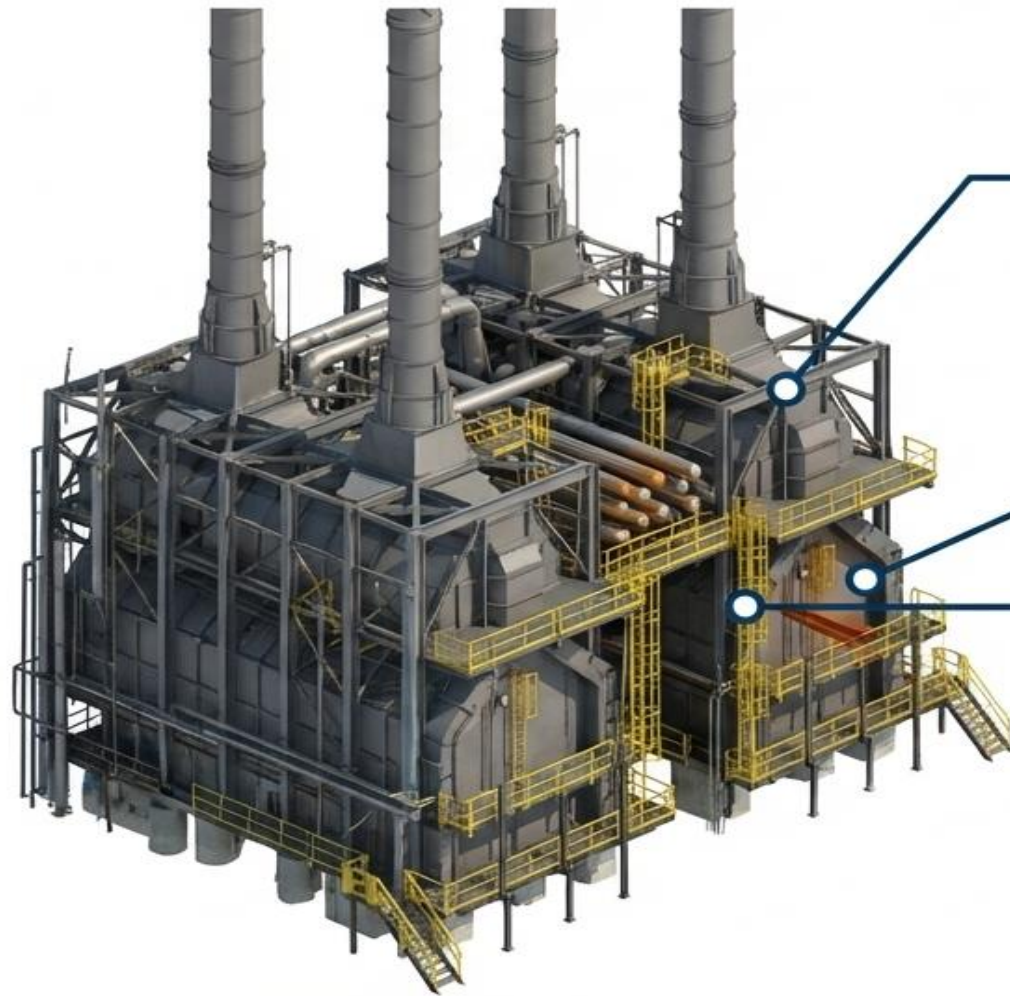
El Valor de la Predicción: **La Ventana de Oportunidad**

Dual-Track Timeline



Al anticipar la desviación, el equipo pasa de una respuesta de emergencia a una maniobra operacional controlada.

Caso de Estudio: Horno de Destilación de Crudo



Función Core

Incrementar temperatura del crudo para separación de alto valor.

IOW Crítica (Tubo)

Temperatura máxima de piel de tubo.

Amenaza Principal (Superficie)

Fluencia a alta temperatura por sobrecalentamiento.

Data Foundation Panel



Base de Datos

Registros continuos en sistema PI desde el año 2000.



Muestra de Entrenamiento

186 eventos documentados de excedencia térmica.

Física a Datos: +40 Variables

Identificando la huella de degradación antes de la excursión térmica



COMBUSTIÓN

- > Consumo de gas combustible
- > Tiro del horno (Draft)
- > Eficiencia de combustión



FLUJO Y CARGA

- > Distribución de flujo por pases
- > Composición de entrada del crudo



CALOR

- > Duty del horno (Derivada temporal)
- > Temperaturas clave de proceso
- > Temperaturas clave de proceso



🎯 **VARIABLE OBJETIVO (PREDICCIÓN)**

Excedencia Temperatura de Piel

Horizonte de anticipación: 8 horas

Evaluación de Algoritmos

Diagnostic Comparison Matrix		
Modelo	Anticipación (Días/Horas)	Confiabilidad (F1 Score)
Mtell (Non-linear)	5 días	0.698
Mtell (XGBoost)	5 días	0.280 (Alta tasa de falsos positivos)
Mtell (Linear)	4.5 días	0.148
Python (Random Forest)	8 horas	0.769
Python (Gradient Boosting)	8 horas	0.697

Se priorizó el equilibrio entre un tiempo de anticipación útil para la operación y una alta precisión para evitar la fatiga de falsos positivos.

El Modelo Ganador: Python Random Forest

Metric Dashboard

0.77

F1 Score

Alta precisión y sensibilidad combinadas.

8h

Anticipación

Tiempo exacto requerido para implementar BYOM (Bring Your Own Model).

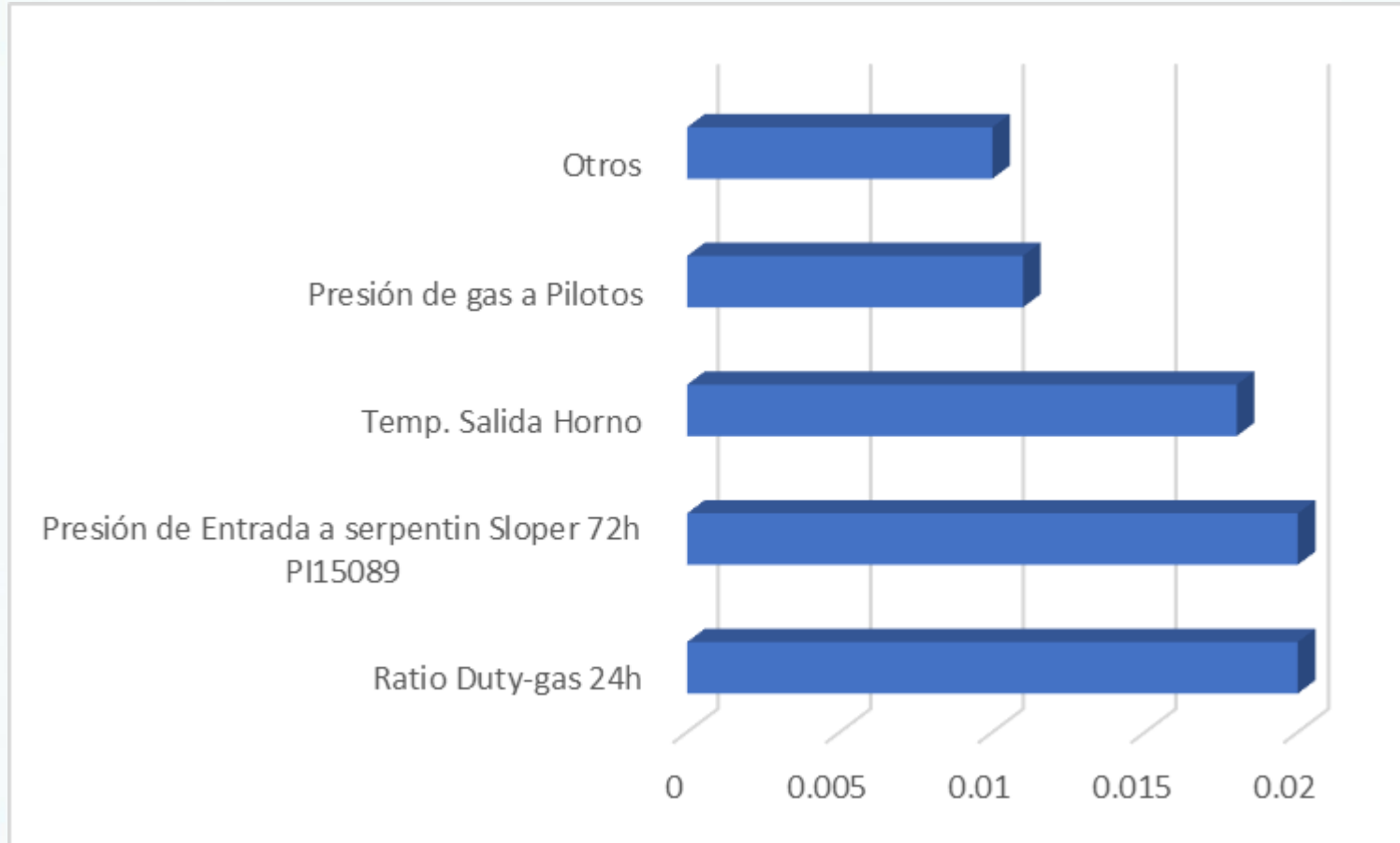
860

Falsos Positivos Aceptables

Frente a 36,473 verdaderos negativos en la muestra de validación.

El modelo Random Forest en Python demostró ser el 'punto dulce' operacional: 8 horas otorgan el margen perfecto para ajustar variables del horno sin inundar la sala de control con falsas alarmas, logrando una precisión del 86.4%.

El Interior de la Caja Negra



Insight Panel

¿Cómo “ve” el algoritmo el futuro? No se fija solo en la temperatura actual. El modelo detecta patrones ocultos en las pendientes (variaciones a 72 horas) y presiones de gas periféricas, variables imposibles de cruzar mentalmente por un operador en tiempo real.

Inteligencia Anticipativa: La Convergencia Crítica

Los algoritmos por sí solos, analizando ruido estocástico, generan un exceso de falsos positivos sin contexto físico.



El conocimiento humano por sí solo no puede procesar miles de fluctuaciones de sensores por segundo.

El avance tecnológico ocurre únicamente cuando el aprendizaje automático está estrictamente guiado y restringido por los principios metalúrgicos y químicos del equipo.

El Ciclo de Integración Operacional



La integración exitosa requiere confianza operacional. El modelo no toma el control; empodera al operador con un faro de advertencia avanzado.

Impacto y Escalabilidad



Protección de Integridad

Exposición reducida drásticamente a mecanismos de **creep (fluencia)** y **sobrecalentamiento**.



Escalabilidad

Metodología diseñada para ser **replicada** a través de otros hornos de proceso y **activos críticos de integridad**.



Beneficio Económico

Hasta **\$300,000 USD / año en beneficios** por reducción de mantenimiento correctivo y prevención de pérdida de producción.

Mensajes Clave

01

Predecir, no solo detectar.

Las **violaciones** de Ventanas Operativas de Integridad (IOW) ya no son **inevitables**; su **firma digital** puede ser **anticipada** con horas de ventaja.

02

El contexto físico es el rey.

El **Machine Learning** alcanza su máxima **efectividad** solo cuando se diseña en estricta alineación con el **conocimiento experto** de los mecanismos de daño.

03

El valor reside en la acción.

El mejor algoritmo del mundo es inútil si no está integrado en un **ciclo de revisión** y **acción temprana** por parte del **equipo operativo**.

¿Qué otro tipo de mecanismos de degradación en sus industrias esta dejando una huella digital en los datos que no se esta viendo?

¡Gracias!