



1



2

Presentación de una metodología, un concepto o una mejora práctica y de alto impacto.

En la Sesión Spark aprenderás cómo lograr un cambio a corto plazo, mediante proyectos simples y potentes que impactan la confiabilidad de tu planta, aquí se plantea el problema, el fundamento técnico y el paso a paso de implementación incluyendo los detalles y los beneficios esperados en términos financieros y de confiabilidad.

La Sesión Spark está diseñada para que tengas resultados notorios en tu estrategia.



SPARK



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
CHILE

5^a
EDICIÓN



Diagnóstico de fallas mediante Inteligencia Artificial Explicable: Un camino hacia el Mantenimiento Prescriptivo

Raymi Vásquez Moreno

Consultor y Académico

3

Preguntas



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
CHILE

5^a
EDICIÓN

- ¿Qué tan lejos estamos de identificar la causa raíz y predecir la falla mediante Inteligencia Artificial Explicable (XAI)?
- ¿Cómo se comportan las variables operativas, de un equipo crítico, antes de que se presente una falla, catalogada como imprevista y que genera una detención no programada?
- ¿Se observan patrones, en el comportamiento de las variables operativas, por cada modo de falla estudiado?
- ¿Cómo se utiliza la IA explicativa y cuál es su aporte para el Mantenimiento Prescriptivo (RxM)?

4

Más preguntas

¿Cuándo?

¿Cómo?

¿Porqué?



¡FALLA!

Mantenimiento Predictivo

Mantenimiento Predictivo

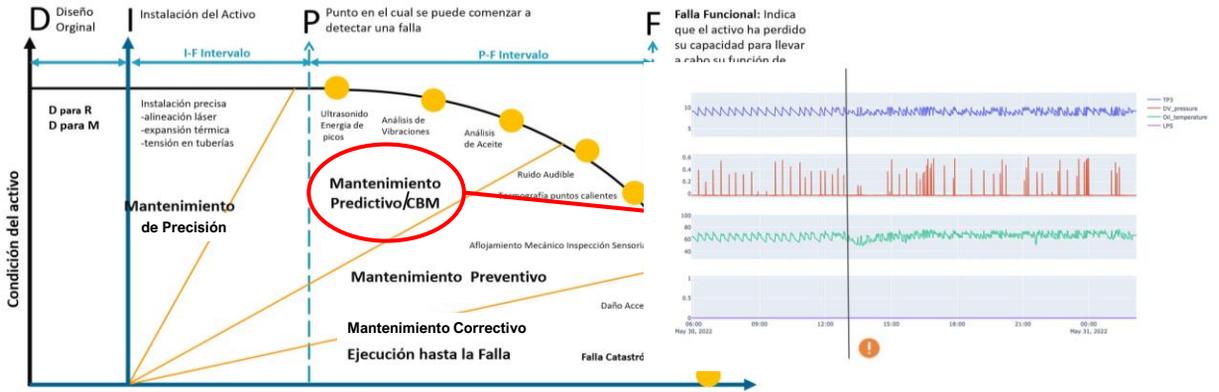


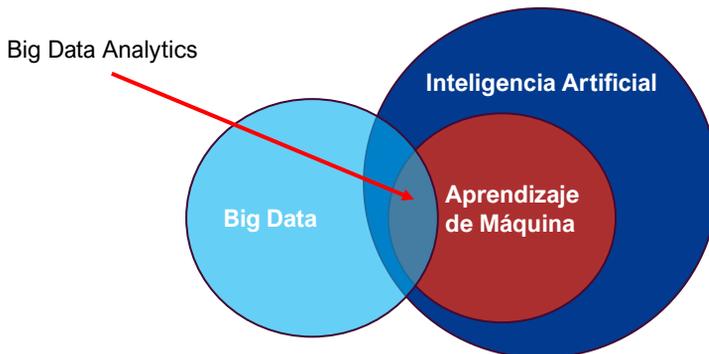
FIGURA 1: Ejemplo de una curva D-IPF (Imágenes cortesía de Jenkins Electric). Adaptada por PMM Innovation Group, en Español.

- Los servicios de mantenimiento se programan de manera adaptativa.
- Objetivo: predecir oportunamente problemas en desarrollo e inesperados.

- Monitorea continuamente los indicadores de condición de salud del equipo.
- Métodos estadísticos avanzados y aprendizaje automático para encontrar un patrón de funcionamiento.
- Determina dinámicamente las condiciones operativas.

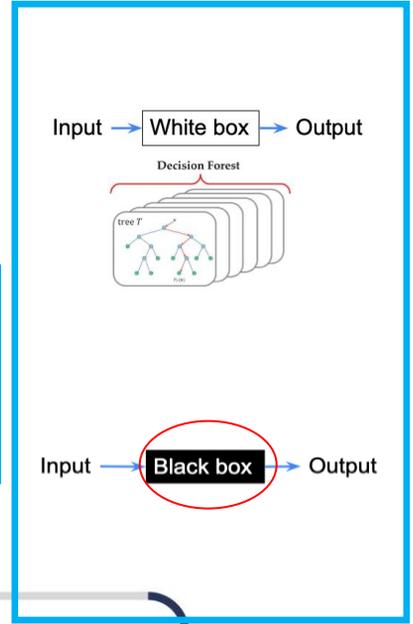
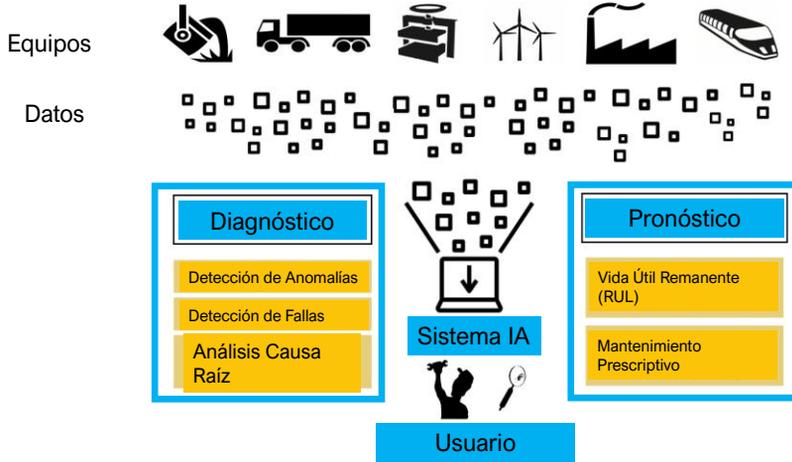
7

Flujo de señales



8

Tareas de mantenimiento predictivo basadas en datos

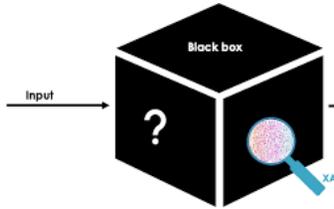


Ref: Pashami, S., et al. (2023). Explainable Predictive Maintenance. arXiv:2306.05120v1.



Inquietudes sobre los modelos caja negra

¿Por qué estoy recibiendo esta decisión?



- **Business Owner** (Propietario del negocio): ¿Puedo confiar en las decisiones de nuestra IA?
- **Customer Support** (Soporte al cliente): ¿Cómo respondo a esta queja del cliente?
- **IT & Operations** (TI y Operaciones): ¿Cómo monitoreo y depuro este modelo?
- **Data Scientists** (Científicos de datos): ¿Es este el mejor modelo que se puede construir?
- **Internal Audit, Regulators** (Auditores internos, reguladores): ¿Son justas las decisiones del sistema de IA?

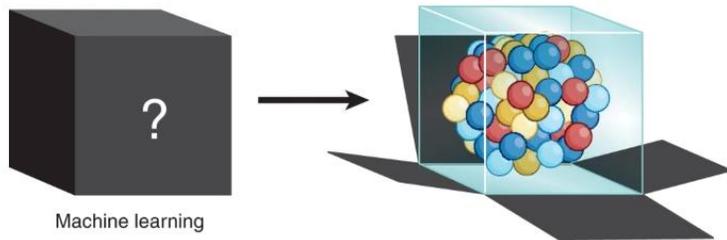
¿Cómo puedo obtener una mejor decisión?



11

XAI

Es una **técnica** o conjunto de reglas que sirve para **comprender el resultado producido por los algoritmos de aprendizaje de máquina**. La IA explicable **garantiza** que se entiende correctamente **lo que sucede dentro de la “caja negra”** y por qué algún modelo predictivo llega a un determinado resultado.

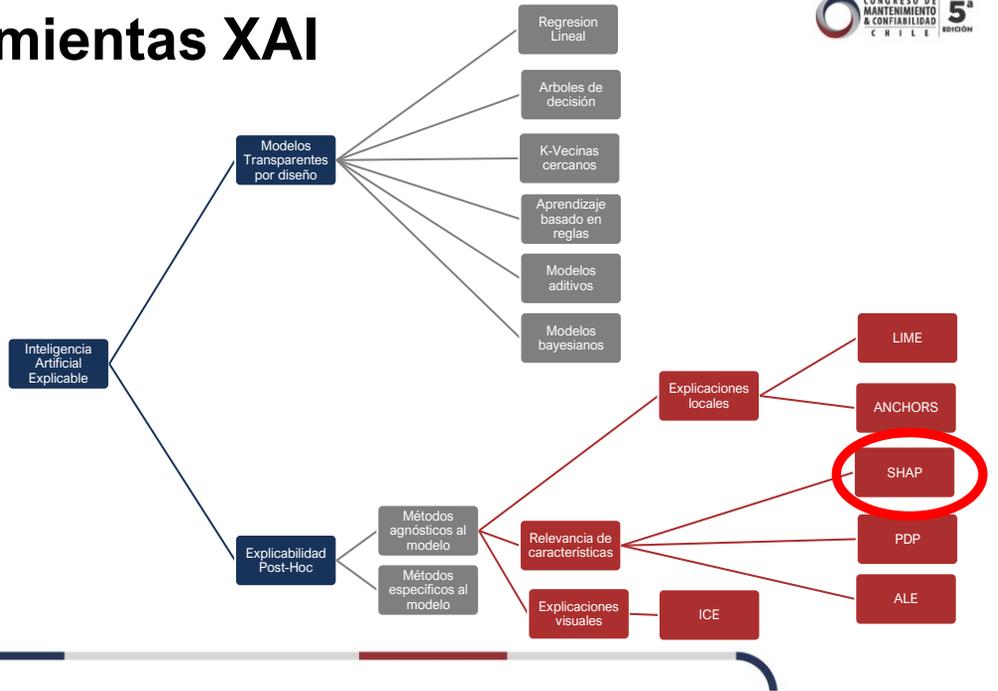


Ref: <https://www.nature.com/articles/s41929-022-00744-z>



12

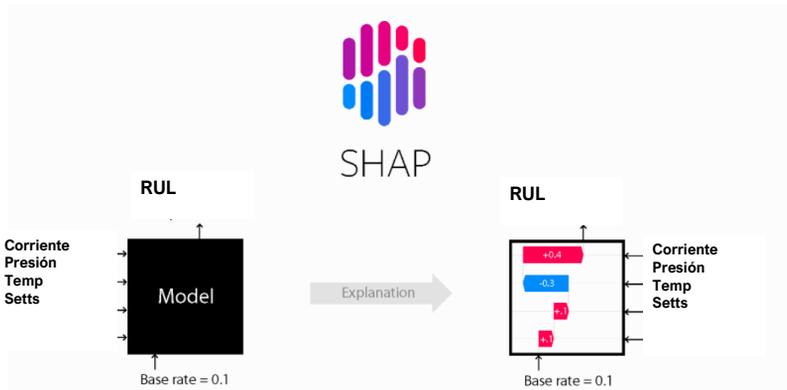
Herramientas XAI



13

SHAP (SHapley Additive exPlanations)

El método SHAP se basa en la **teoría de juegos** y asigna valores de importancia a cada **característica o atributo de entrada**, indicando su **contribución al resultado de una predicción**.



REF: <https://shap.readthedocs.io/en/latest/>

14

Teoría del Juego



Lloyd Shapley Premio Nobel en Economía 2012

¿Cuál es la contribución de cada jugador (en pulgadas)?



Permutacione	Contribución Marginal			Total
	Ana	Bernardo	Carmen	
A, B, C	2	32	4	38
A, C, B	4	34	0	38
B, A, C	2	32	4	38
B, C, A	0	28	10	38
C, A, B	2	36	0	38
C, B, A	0	28	10	38
Promedio	2	32	4	38

En base a todas las permutaciones de jugadores, se obtiene la contribución marginal de cada jugador:

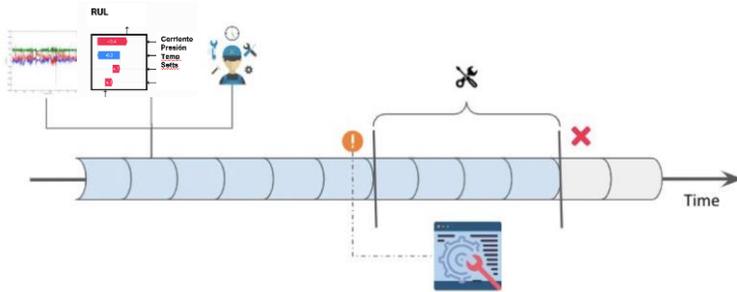
Valor de Shapley: promedio de las contribuciones marginales en todas las permutaciones

Mantenimiento Prescriptivo

Mantenimiento Predictivo + Análisis Prescriptivo

¿Cuál es el mejor momento y plan de acción para la intervención de mantenimiento basado en la condición actual del equipo?

Salida: un plan de mantenimiento, gestión de recursos, sistema de soporte de decisiones



17

Pronóstico: Mantenimiento Prescriptivo

Analizar diferentes opciones de mantenimiento y los posibles resultados de cada una para:

- Optimizar el costo de mantenimiento
- Maximizar la vida útil del equipo

Desafíos

Calidad de los datos

- Los sistemas de gestión de activos y mantenimiento DEBEN estar muy bien integrados
- Los datos precisos y consistentes son esenciales

Costos

- La implementación puede ser costosa
- Requiere inversiones continuas en tecnología y capacitación

18

Implementación

19

Motores de Reacción

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
C W I L E 5^a
EDICIÓN

Data Set: FD001

- Train trjectories: 100
 - Test trajectories: 100
 - Conditions: ONE (Sea Level)
 - Fault Modes: ONE (HPC Degradation)
- Modo de Falla 1

Data Set: FD003

- Train trjectories: 100
 - Test trajectories: 100
 - Conditions: ONE (Sea Level)
 - Fault Modes: TWO (HPC Degradation, Fan Degradation)
- Modo de Falla 2



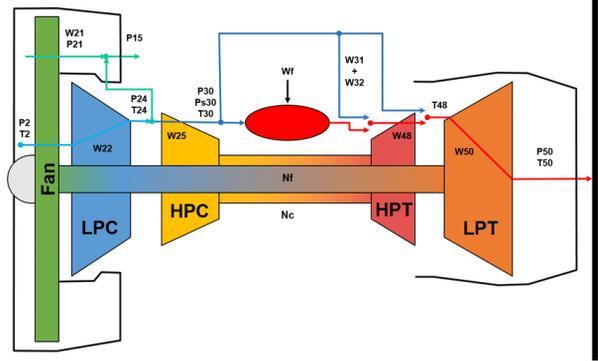
REF: Damage Propagation Modeling for Aircraft Engine Run-to-Failure Simulation [23]

20

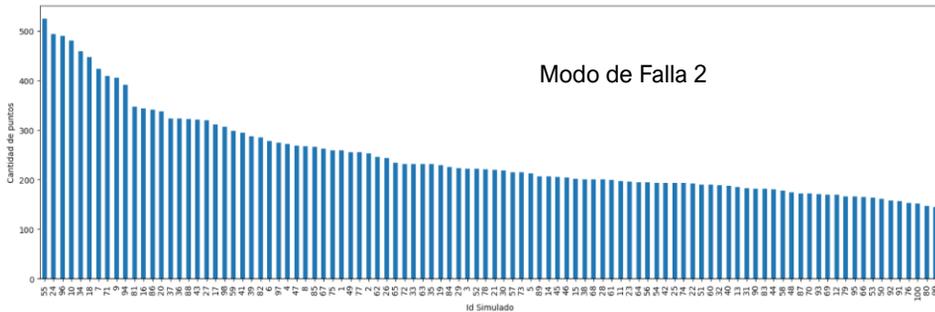
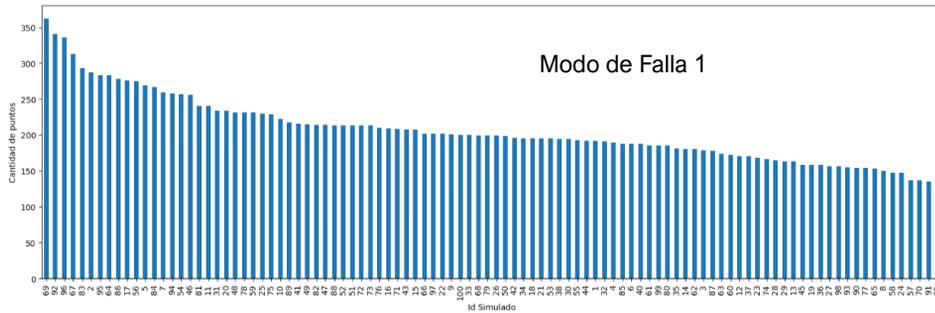
20

Sensores

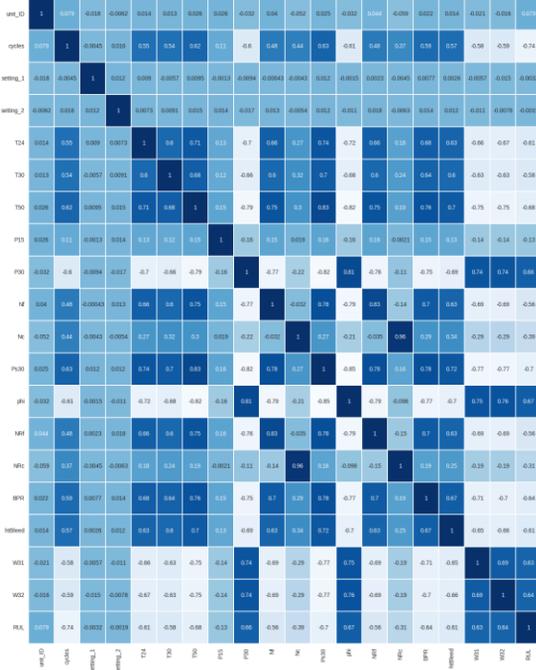
- T2: Temperatura total en la entrada del ventilador (°R)
- T24: Temperatura total en la salida del LPC (°R)
- T30: Temperatura total en la salida del HPC (°R)
- T50: Temperatura total en la salida del LPT (°R)
- P2: Presión en la entrada del ventilador (psia)
- P15: Presión total en el conducto de derivación (psia)
- P30: Presión total en la salida del HPC (psia)
- Nf: Velocidad física del ventilador (rpm)
- Nc: Velocidad física del núcleo (rpm)
- Epr: Relación de presión del motor P50/P2
- Ps30: Presión estática en la salida del HPC (psia)
- Phi: Relación de flujo de combustible a Ps30 pps/psi
- Nrf: Velocidad corregida del ventilador (rpm)
- Nrc: Velocidad corregida del núcleo (rpm)
- BPR: Relación de derivación
- farB: Relación combustible-aire en el quemador
- htBleed: Entalpía de purga
- W31** Purga de refrigerante del HPT lbm/s
- W32** Purga de refrigerante del LPT lbm/s



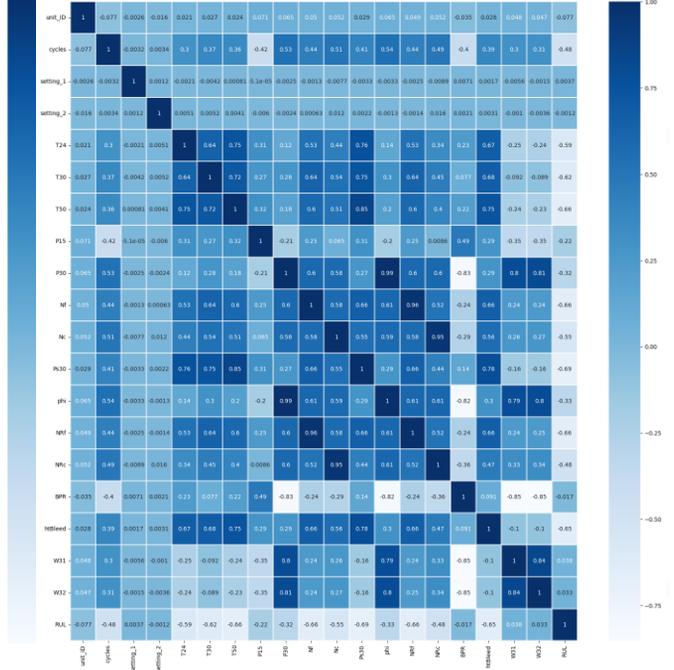
REF: Damage Propagation Modeling for Aircraft Engine Run-to-Failure Simulation [23]



Modo de Falla 1



Modo de Falla 2

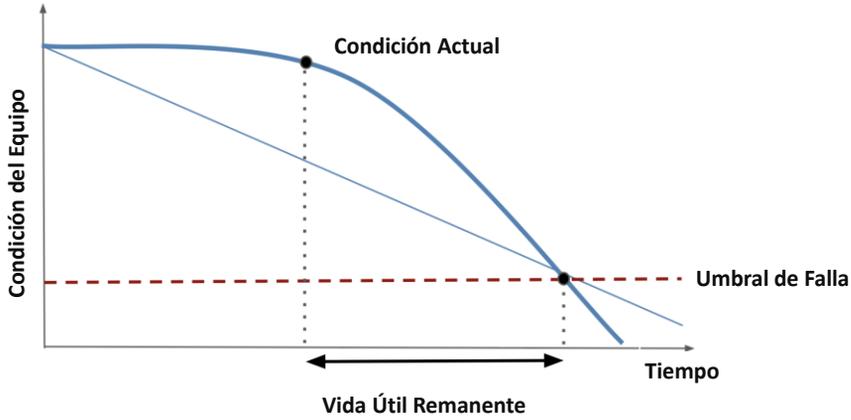


Vida Útil Remanente (RUL)



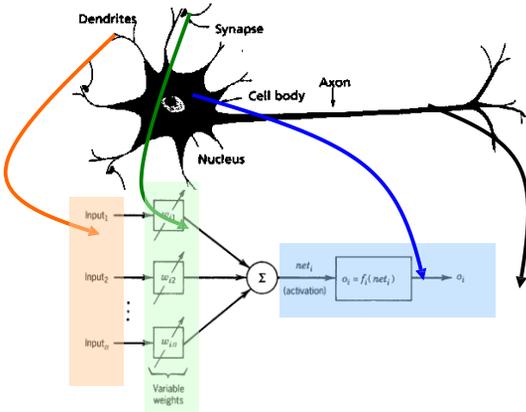
- La Vida Útil Remanente (RUL) es el intervalo de tiempo desde un momento de operación hasta que el sistema es incapaz de funcionar.
- ¿Cuánto tiempo se espera que el equipo funcione hasta que ya no cumpla con las especificaciones?
- Mapeo entre los datos del sensor y un indicador de salud del equipo
- El modelo utiliza el estado actual para estimar la RUL basado en la tendencia de degradación

Vida Útil Remanente (RUL)



25

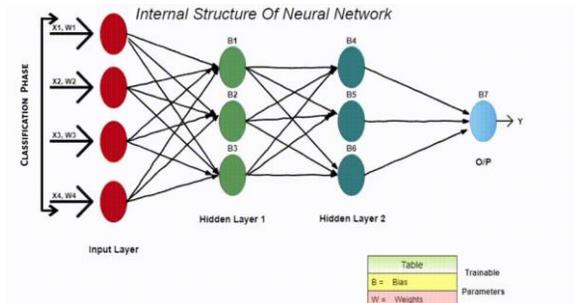
Modelos predictivos



Model: "model_4"

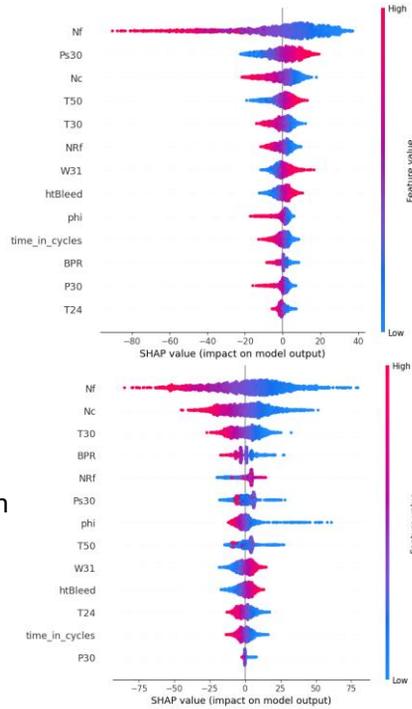
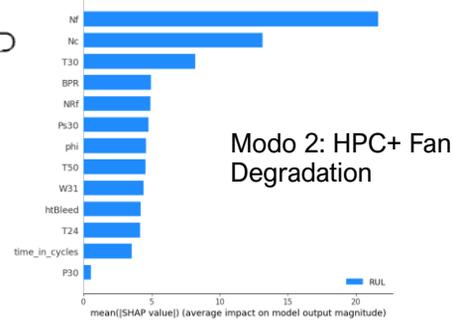
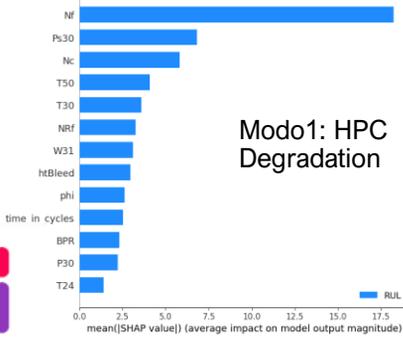
Layer (type)	Output Shape	Param #
input_5 (InputLayer)	[(None, 13)]	0
dense_12 (Dense)	(None, 200)	2800
dense_13 (Dense)	(None, 200)	40200
dense_14 (Dense)	(None, 200)	40200
layer5 (Dense)	(None, 1)	201

Total params: 83,401
 Trainable params: 83,401
 Non-trainable params: 0



26

27



27

Prescripción



¡Sabemos cuándo pasa, cómo pasa y porqué pasa!

¡Los patrones de falla “catalogada” y “estudiada” en ACR se presentan!



28



iGracias!

Raymi Vásquez M.
raymi.vasquez@usm.cl