

Cátedra ENIA

IA3: Cátedra de Inteligencia Artificial en Aeronáutica y Aeroespacio

PT3: Gemelo Digital mediante simulación de sistemas aeronáuticos

Gemelos Digitales

¿Qué son?



Representación **virtual dinámica** de un **sistema físico** con intercambio **bidireccional** de datos con él.

Gemelos Digitales

Primeros acercamientos



Proyecto Apollo de la NASA:

- La **NASA** no podía probar los sistemas en el espacio.
- Crearon una **réplica física exacta** de la nave espacial para realizar pruebas en tierra.
- Debido a las similitudes con el concepto de gemelo digital, se considera un **Gemelo Físico**.

Gemelos Digitales

Formalización

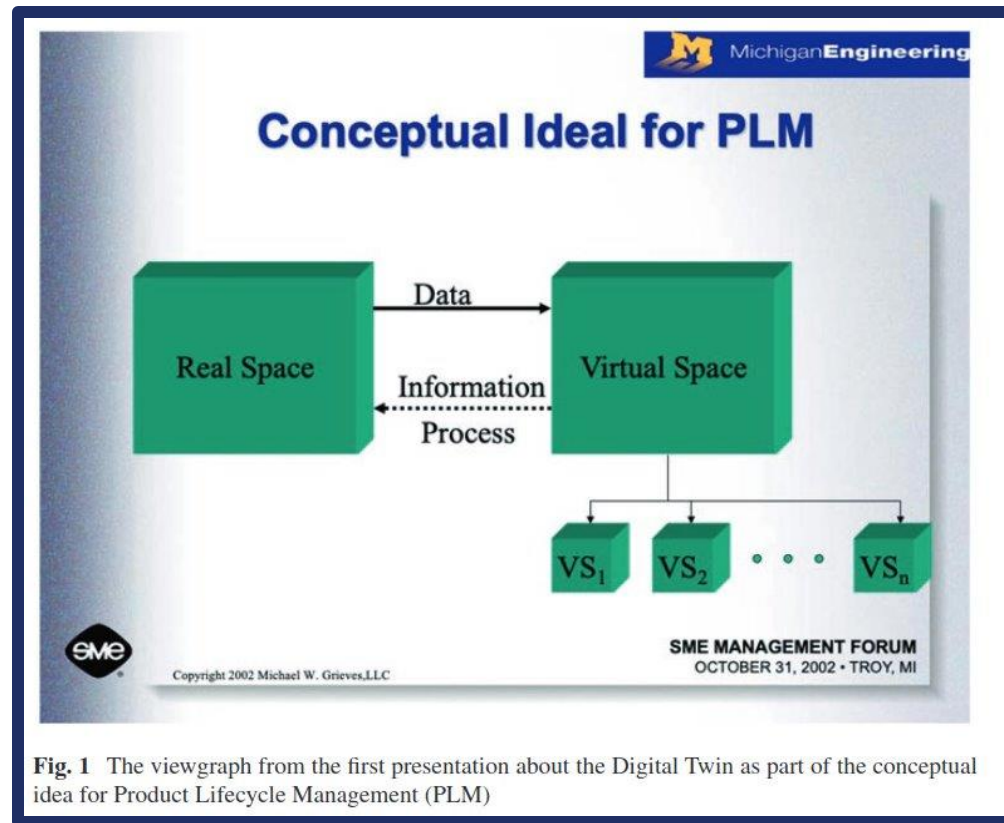
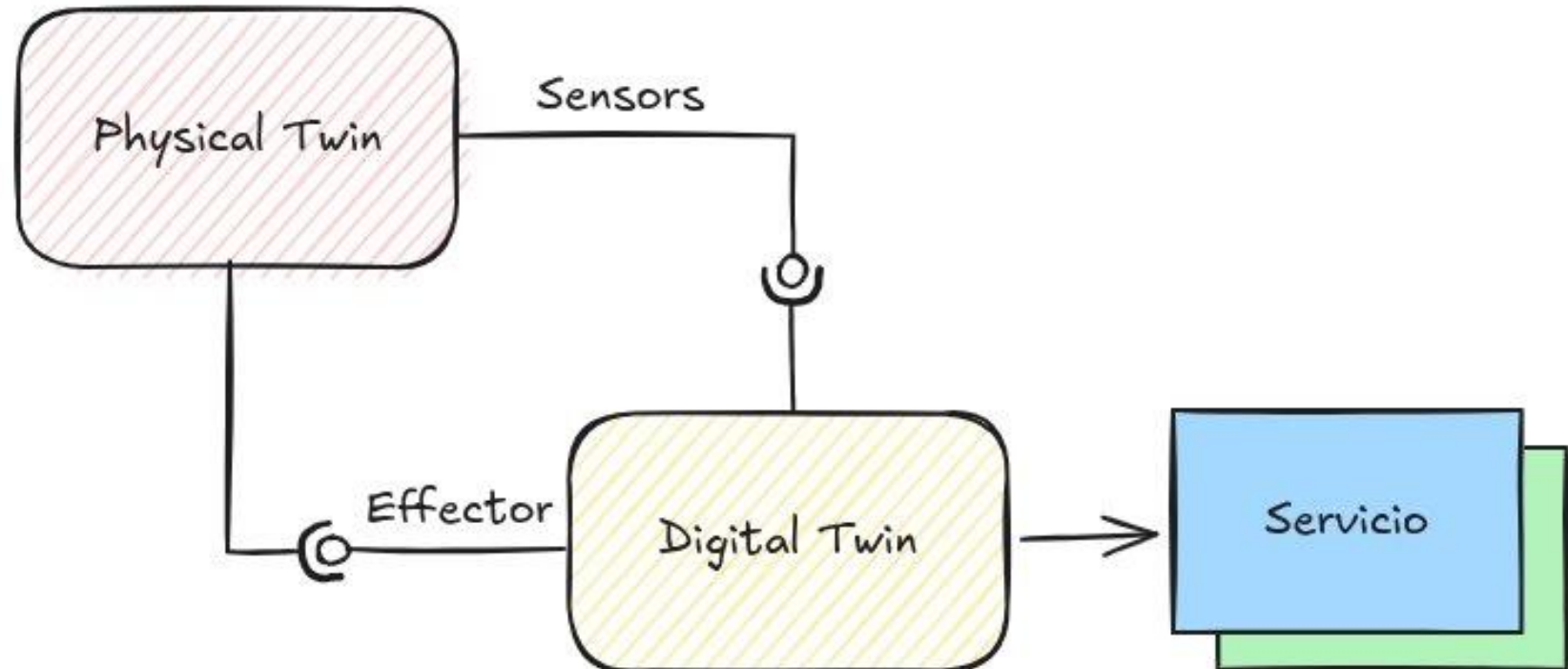


Fig. 1 The viewgraph from the first presentation about the Digital Twin as part of the conceptual idea for Product Lifecycle Management (PLM)

- **Michael Grieves** formalizó el concepto en 2002 en una conferencia de gestión del ciclo de vida del producto por
- En 2005 le pone nombres como "**Mirrored Spaces**"
- 2006 lo llama "**Digital Twin**" o "**Virtual Doppelganger**".

Gemelos Digitales

Definición



Gemelo Digital en el sector aeroespacial

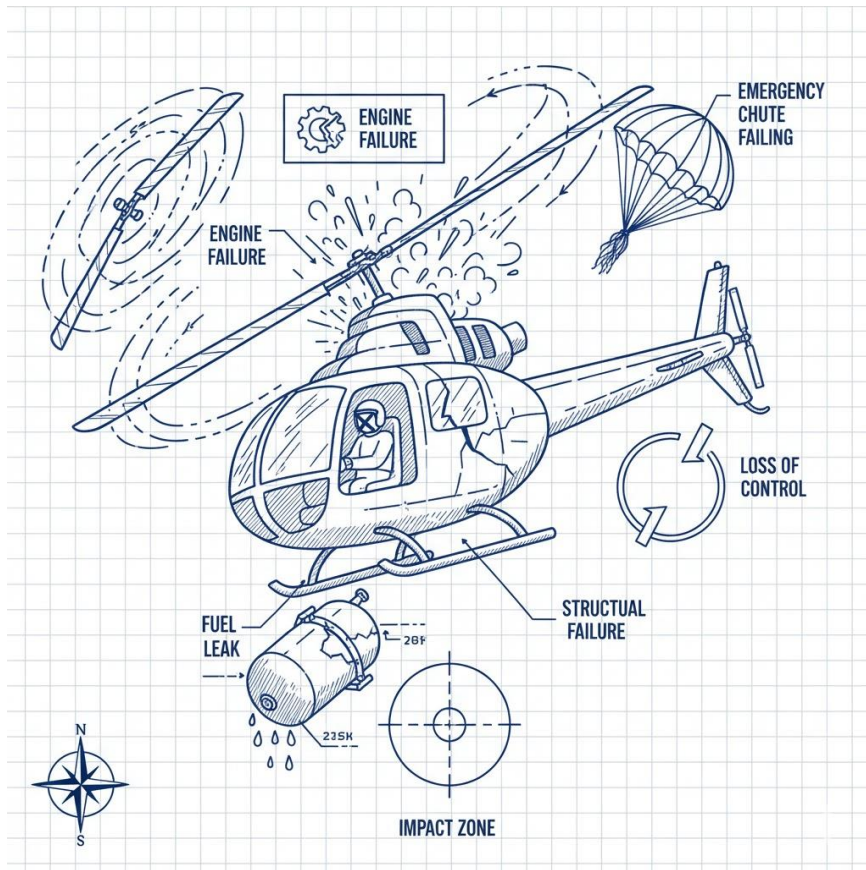
Simular miles de diseños

Someter a un **ala de avión** a un **huracán**

Monitorear en **tiempo real** el desgaste de una pieza para predecir cuando cambiarla

Hacer los sistemas más **seguros, eficientes y fiables**

Falta de datos de fallos



- Sistemas **alta fiabilidad** y muchos **controles**
- Datos restringidos por cuestiones de **seguridad, confidencialidad o regulación**
- Sistemas **sin hardware** necesario
- Sistemas que **no registran** los datos históricos
 - Generación de datos sintéticos
 - Técnicas avanzadas (aprendizaje no supervisado)

Tipos de Modelos simulación

Modelos basados en Física

- **Funcionamiento:** Construido sobre ecuaciones fundamentales físicas
- **Ventajas:** Alta fidelidad, explicabilidad
- **Desventajas:** Requiere conocimiento del dominio, en ocasiones lento.

Modelos basados en Datos

- Funcionamiento:** Aprende patrones estadísticos de datos existentes
- Ventajas:** No se necesita un modelo matemático exacto, datos de ejecución. Velocidad
- Desventajas:** Caja negra, necesidad de muchos datos.

Modelos basados en física

MATLAB

Simulink

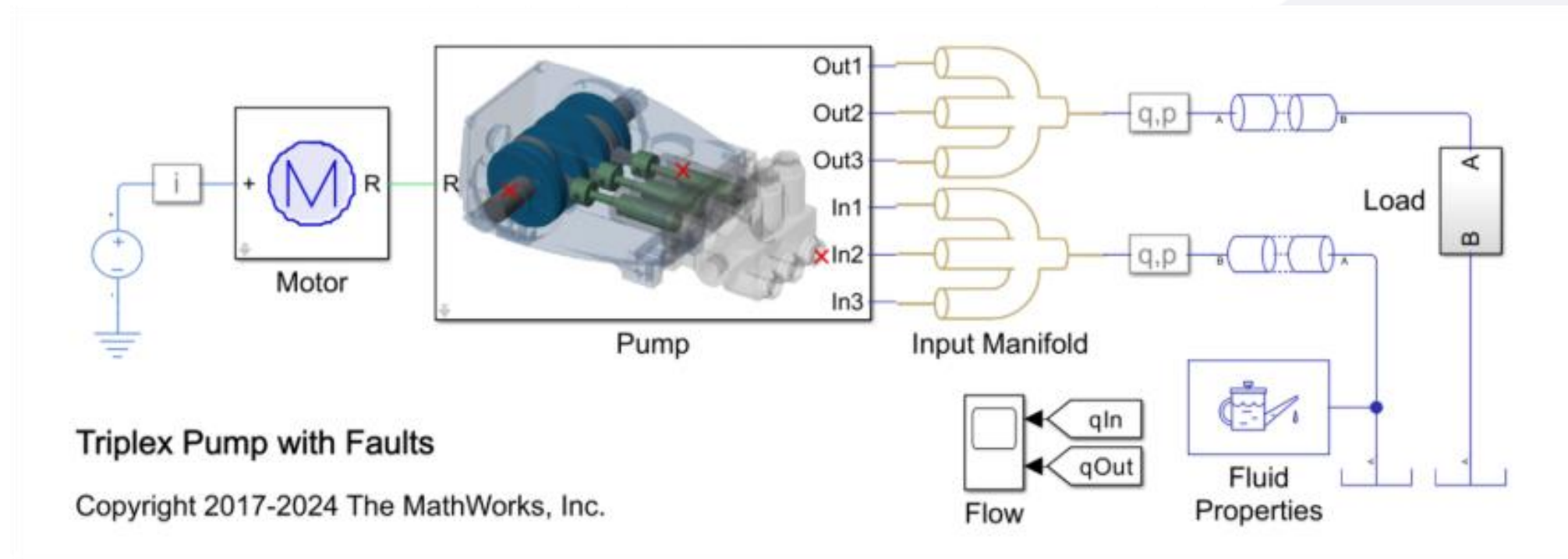
- Herramienta de **simulación** y **diseño** basada en **diagramas de bloques** para modelar, analizar y probar sistemas dinámicos multidominio.

Simscape

- Permite crear rápidamente modelos de **sistemas físicos** dentro del entorno de Simulink
- Simplifica el modelado de sistemas físicos al permitir trabajar directamente con **componentes predefinidos** (resistencias, motores, válvulas, etc.) y ecuaciones físicas integradas en estos.

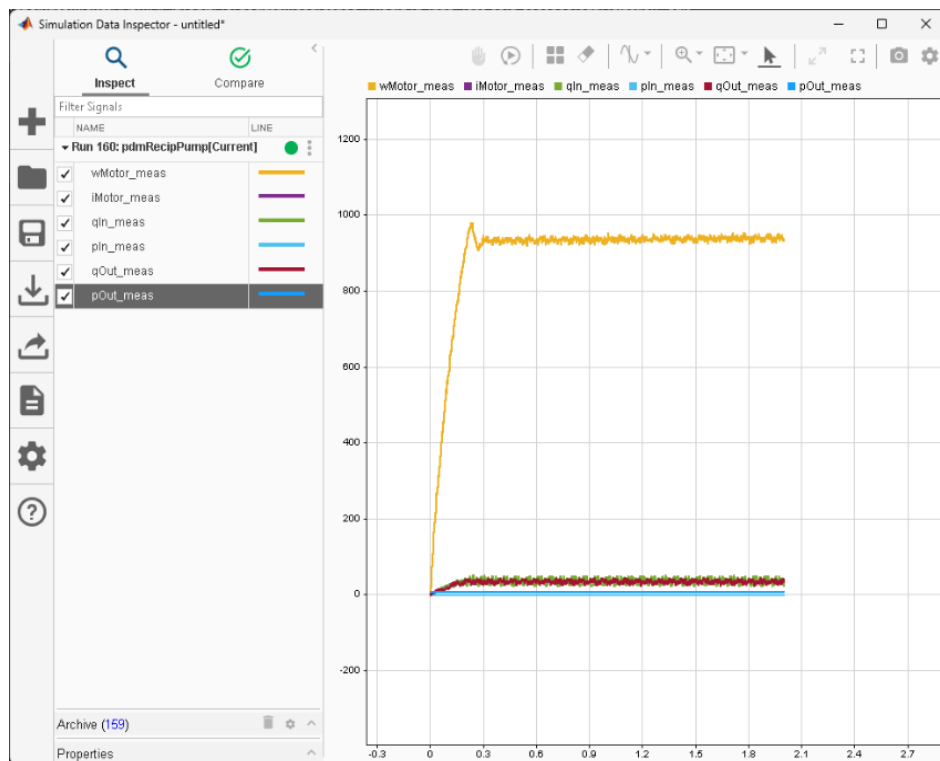
Modelos basados en física

Caso de uso bomba hidráulica

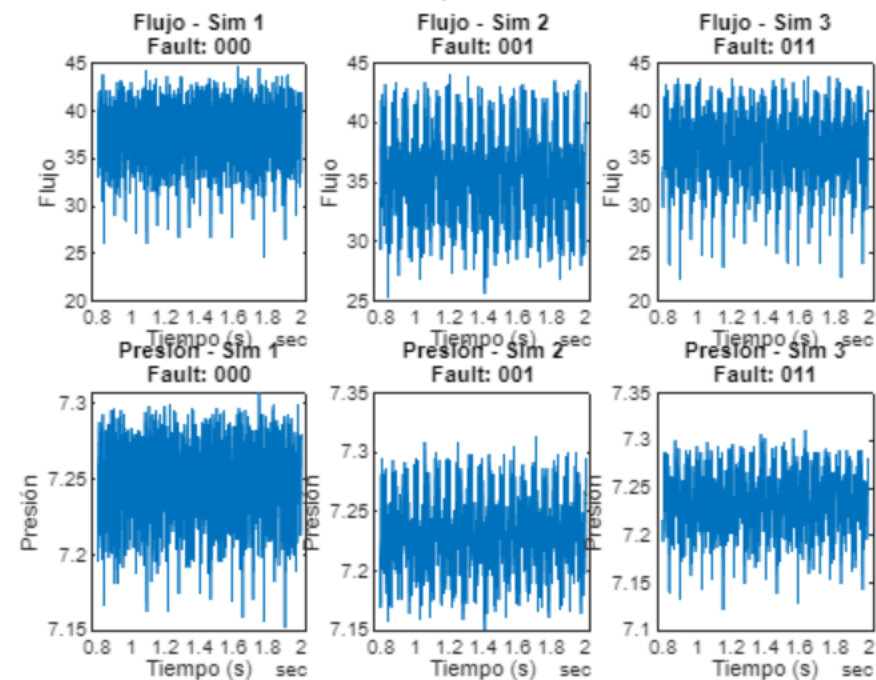


Modelos basados en física

Caso de uso bomba hidráulica

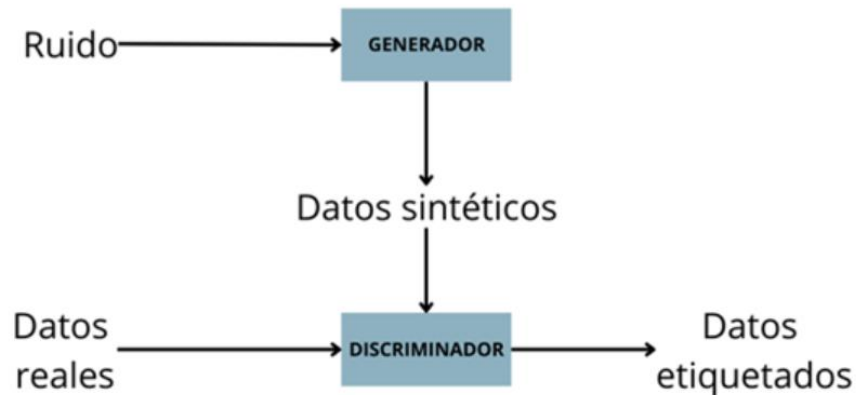


Visualización de los resultados procesados con fallos identificados



Modelos basados en Datos

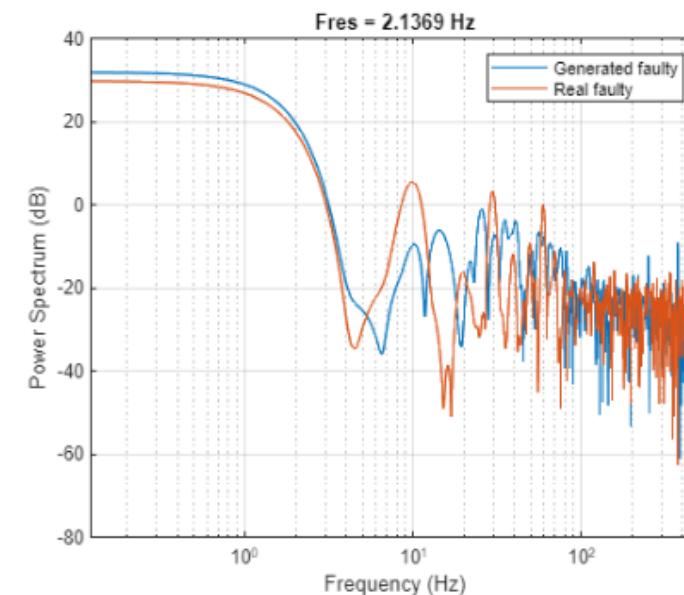
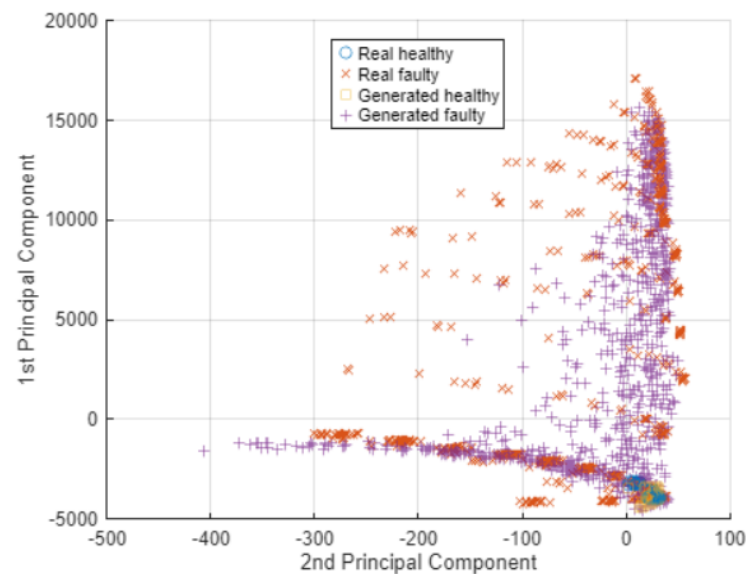
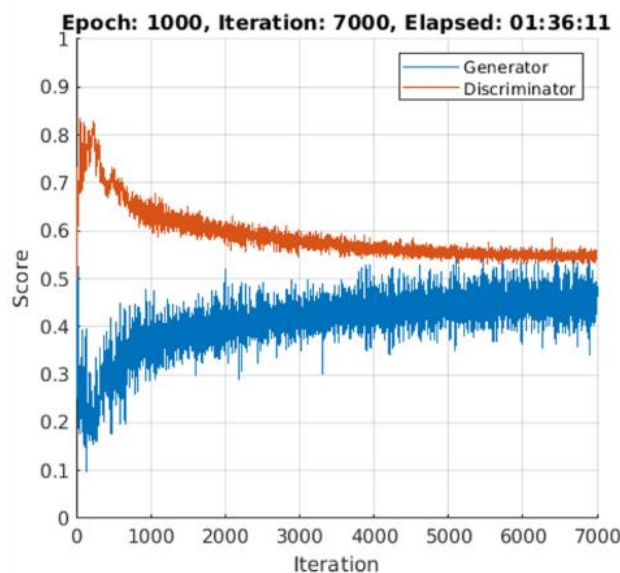
Caso de uso bomba hidráulica



- Se destila un modelo a partir de los **datos simulados**
- Arquitectura **GAN** (Red Generativa Adversaria)
- Se predice la variable del **flujo de salida**
- La entrada:
 - Ruido
 - Condición:
 - Bomba saludable
 - Fuga
 - Obstrucción
 - Desgaste

Modelos basados en Datos

Caso de uso bomba hidráulica



Resultados

Caso de uso bomba hidráulica

Característica	Modelo Basado en Física	Modelo GAN (Data-Driven)
Generación de 2000 señales	14h en CPU, 2h GPU	70 segundos
Consistencia de Señales	Mantiene la coherencia entre todas las señales.	Replica bien solo las variables objetivo .
Explicabilidad	Permite rastrear la física exacta ; ideal para validar hipótesis de diseño .	Caja Negra
Uso Ideal	No hay restricción de tiempo y cómputo , o para validar hipótesis de diseño.	Latencia factor crítico

Modelos de generación de Datos sintéticos

Simulación Explícita

- Modelos basados en agentes

Estadísticos y probabilísticos clásicos

- ARIMA/SARIMA (Series temporales)
- Hidden Markov Models (HMM)
- Gaussian Mixture Models (GMM)
- Cópulas

Aprendizaje profundo

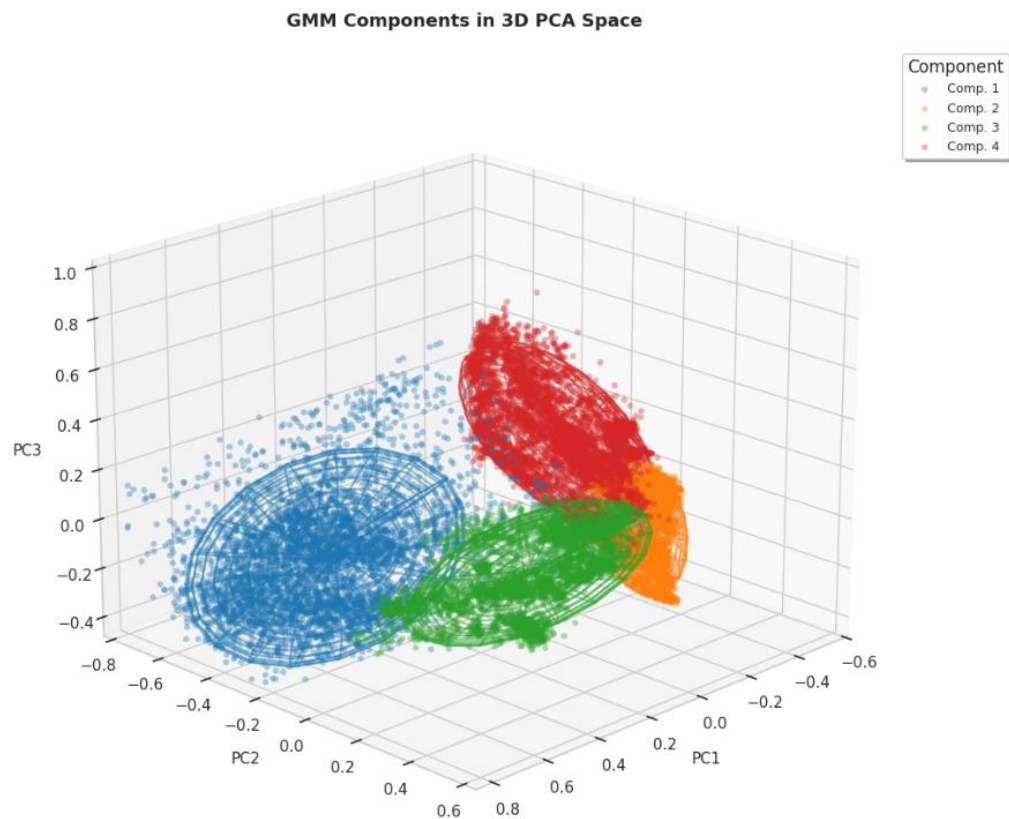
- Variational Autoencoders (VAE)
- Generative Adversarial Networks (GAN)
- Diffusion Models
- RNN/LSTM/GRU/Transformers

Otras

- SMOTE
- DBA
- Noise Injection

Generación de datos sintéticos

GMM para un autoencoder



PERFORMANCE OF AUTOENCODER WITH MAHALANOBIS DISTANCE SCORING UNDER DIFFERENT GMM AUGMENTATION SCENARIOS

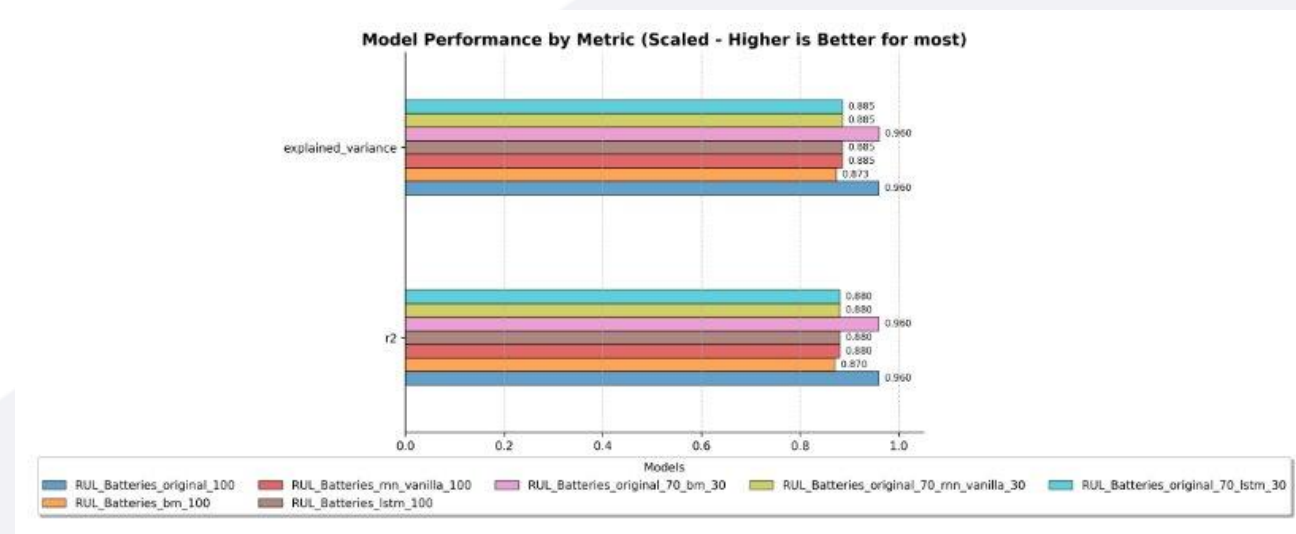
Scenario	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
A1 (25% Real)	0.7731	0.6799	0.7235	0.7927
A2.1 (25% + GMM×1)	0.8248	0.8206	0.8227	0.8589
A2.2 (25% + GMM×2)	0.8346	0.8534	0.8439	0.8740
A4 (10% Real)	0.7585	0.6155	0.6796	0.7684
A5.1 (10% + GMM×2)	0.8082	0.8008	0.8045	0.8447
A5.2 (10% + GMM×3)	0.8285	0.8312	0.8298	0.8640

Evaluación de datos

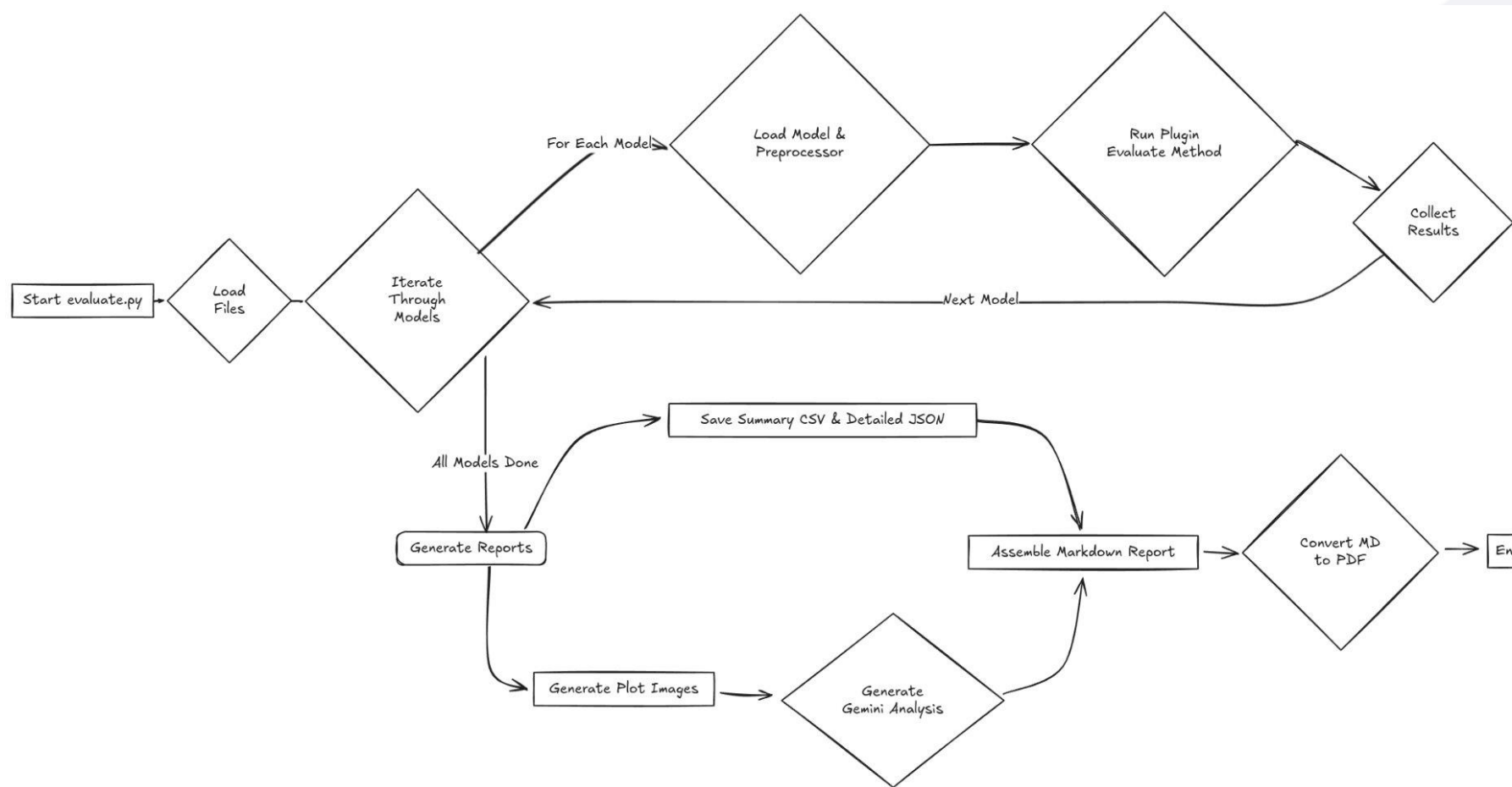
Paquete de **python** para la evaluación automática de modelos

Es capaz de generar un informe detallado utilizando **IA Generativa**, donde se comparan los diferentes modelos para evaluar su rendimiento.

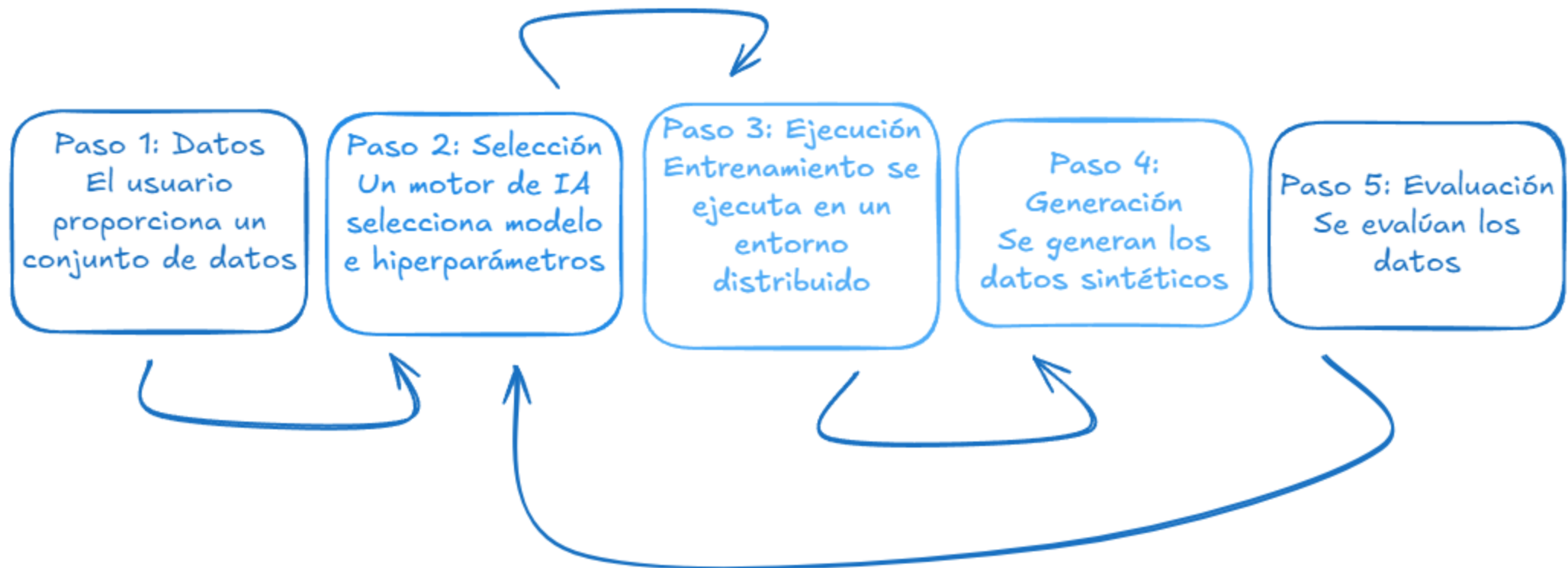
Soporta **Plugins** para modelos con evaluación o métricas personalizadas.



Evaluación de datos



Sistema de Generación de Datos Sintéticos



Muchas Gracias