

## **¿Cómo un algoritmo de redes neuronales disminuye los costos de reparación en motores de turbina a gas para aeronaves?**

Medina Campero Brandon Josue, estudiante de 3 / 9 semestre de la carrera de Ingeniería Mecánica FES Aragón, UNAM. 9 de octubre de 2024

### **Tabla de contenidos**

1. Glosario
2. Abstract
3. Introducción
4. Desarrollo del proyecto
  - a. ¿Cómo el mantenimiento preventivo disminuye costos de reparación?
  - b. Contexto de la situación
  - c. Funcionamiento de la turbina
  - d. Toma de datos
  - e. EDA
  - f. Creación del modelo de IA
    - i. Región para índices de vida
    - ii. Creación de la función que se ajuste a los datos (Porcentaje)
    - iii. Red neuronal que estima el índice de salud
  - g. Proyecto sostenible. Alcances
5. Resultados
6. Fuente
7. Anexo
  - a. Instrucciones para descargar el modelo
  - b. Descarga de los datos y modelo de ML

### **1. Glosario**

- a) Mantenimiento predictivo: Se toman y analizan datos para predecir cuándo y de qué manera ocurrirá una falla. Esto permite planificar las reparaciones o reemplazo de la maquinaria.
- b) Algoritmo o modelo: Conjunto de instrucciones para resolver un problema matemático.
- c) Modelo de IA o de Machine Learning: Algoritmo matemático basado en datos para realizar predicciones.
- d) Red neuronal (RN) ó (RNN) : Conjunto de modelos de IA.
- e) Epochs: Número de veces que se ha entrenado el modelo.
- f) Set de entrenamiento: Conjunto de datos que se usará para entrenar el modelo.
- g) Set de prueba: Conjunto de datos para medir la exactitud del modelo
- h) Columna, atributo o variable: Luego de tomar datos de una prueba se almacenan dentro de una tabla en forma vertical
- i) EDA (Análisis exploratorio de datos): Flujo de trabajo usado por la mayoría de las empresas que consiste en explorar los datos y conocer las variables,

limpiar los datos y graficar, conocer cómo se relacionan, crear un modelo de ajuste a los datos, medir la exactitud del algoritmo.(5)

- j) Python: Lenguaje de programación con el cual he creado el modelo
- k) Jupyter notebook: Herramienta que facilita el análisis de datos mediante el uso de Python.
- l) Servidor: Sistema informático (puede ser hardware o software) que proporciona servicios, recursos o datos a otros dispositivos todo el tiempo.
- m) std o desviaciones estandar: medida estadística que indica cuando se alejan los datos de la tendencia central

## 2. Abstract

Una de las aplicaciones de los modelos de inteligencia artificial es el mantenimiento preventivo, esta aplicación la encontramos en la mayoría de las máquinas y aparatos tecnológicos que usamos día a día, en este documento realicé un modelo de IA el cual me permitió predecir si una turbina presenta fallos críticos o no con una eficiencia del 92% (promedio), los datos fueron proporcionados por las pruebas hechas en los laboratorios de la Nasa, las pruebas las llevaron los ingenieros Abhinav Saxena, Kai Goebel; el algoritmo puede tomar datos en tiempo real al momento de operar la turbina, esto lo hace ecológico debido a que no necesita los recursos de un servidor. Es necesario un segundo proyecto para definir qué se hará con el resultado del modelo en relación a la turbina.

## 3. Introducción

La toma de datos mediante sensores es indispensable en aparatos tecnológicos y máquinas de nuestro día a día, estos nacieron por la necesidad de monitorear diversas variables físicas y ambientales, como temperatura, presión, humedad, y vibraciones; estas variables son útiles para que la máquina o el usuario pueda tomar decisiones. Los sensores se hicieron cada vez más precisos y el uso de la ciencia de datos combinada con modelos de inteligencia artificial, se volvió el nuevo standard para la toma de decisiones (por parte del usuario y de las máquinas); esta tendencia la vemos en nuestro día a día un claro ejemplo de esta aplicación se encuentra en el metro de la Ciudad de México (1), donde se utilizan sensores para monitorear el estado de los vagones y vías, posteriormente estos datos son analizados y se ajusta un modelo de inteligencia artificial, este permite programar mantenimientos antes de que se produzcan fallas; un segundo ejemplo lo encontramos en los vehículos modernos, los cuales cuentan con sistemas de diagnóstico integrados en la computadora del automóvil, mediante algoritmos de machine learning, analizan datos en tiempo real para enviar una señal de alerta haciendo saber al usuario que el vehículo necesita mantenimiento (2); un tercer ejemplo lo encontramos en las impresoras Epson(3), estas detectan el nivel de tinta del cartucho y anidando estos datos a otros sensores, un modelo de IA toma la decisión de bloquear la impresora para que la falta de tinta no genere fallas en el sistema.

En este documento, menciono como hice un modelo de inteligencia artificial RN el cual modela la propagación de daños dentro de los módulos de motores de turbina de gas para aeronaves, con la finalidad de disminuir costos de mantenimiento. Como lo mencioné antes esta práctica se puede aplicar a cualquier máquina o componente que usemos en nuestro día a día, con la condición de que podamos tomar datos de este que nos lleven a crear un modelo de mantenimiento preventivo y así disminuir costos de mantenimiento.

#### **4. Desarrollo del proyecto**

##### **A) ¿Cómo el mantenimiento preventivo disminuye costos de reparación?**

La ciencia de datos anidado a los modelos de inteligencia artificial se usa para tomar decisiones informadas, para cerrar un modelo de mantenimiento preventivo se requiere tomar datos sobre nuestra maquinaria de interés, estos datos se dividen en dos grupos,

En el primer grupo la maquinaria se debe de llevar a un mal funcionamiento, en el segundo la maquinaria aún debe de seguir funcionando con una ligera pérdida de eficiencia (o cámbiese eficiencia por la variable de funcionamiento). A partir de estos dos conjuntos de datos se puede crear un modelo que prediga si la maquinaria presentará fallos o no, a partir de esta predicción se puede tomar una decisión para prevenir deterioro parcial o completo de la maquinaria, por ejemplo, se puede detener la producción de una troqueladora, si el modelo predice que está por tener un fallo crítico, al detener la máquina se le da mantenimiento preventivo y de esta manera se evitan las pérdidas económicas que se pudieron haber generado si la máquina hubiese fallado completamente.

##### **B) Contexto de la situación**

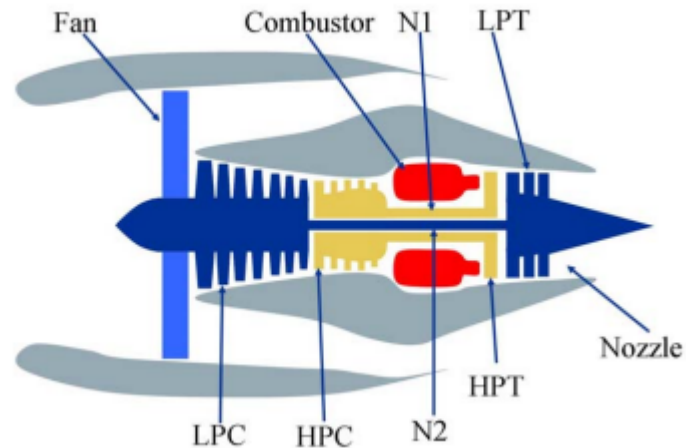
Abhinav Saxena, Kai Goebel, científicos de la NASA hicieron 27 pruebas a diversas turbinas iguales, algunas de estas, como se mencionó anteriormente, se llevaron hasta una falla crítica, los datos que se obtuvieron los detallo en el punto D, a partir del punto E, menciono como hice un modelo de IA que se usa para mantenimiento preventivo de las turbinas.

##### **C) Funcionamiento de la turbina**

Una turbina de gas para aeronaves es un tipo de motor que convierte la energía del combustible en energía mecánica a través de un proceso de combustión, y se utiliza principalmente para propulsar aviones. Este motor funciona mediante la mezcla de aire con combustible, que se quema en una cámara de combustión, generando gases a alta temperatura y presión. Estos gases se expanden y pasan a través de una serie de componentes, como las turbinas y los compresores, para producir empuje.

A esta turbina se le agregó un sistema de control que consiste en un controlador de velocidad del ventilador y un conjunto de reguladores y limitadores.

Estos incluyen tres reguladores de límite alto que evitan que el motor supere sus límites de diseño para la velocidad del núcleo, la relación de presión del motor y la temperatura de salida de la Turbina de Alta Presión (HPT); un regulador de límite que previene que la presión estática en la salida del Compresor de Alta Presión (HPC) baje demasiado; y un limitador de aceleración y desaceleración para la velocidad del núcleo. Una estructura lógica integral integra estos componentes del sistema de control de manera similar a la utilizada en los controladores de motores reales, de tal forma que se evitan problemas de saturación del integrador. Además, todas las ganancias para el controlador de velocidad del ventilador y los cuatro reguladores de límite están programadas de tal manera que el controlador y los reguladores funcionan como se pretende en todo el rango de condiciones de vuelo y niveles de potencia.(4)



(4)

#### D) Toma de datos

Abhinav Saxena, Kai Goebel, científicos de la NASA hicieron 27 pruebas (4) bajo situaciones donde se hicieron cambiar algunas de las 14 variables, las 27 pruebas corrían durante un tiempo definido, si los daños en la turbina eran inminentes, la prueba seguía de cualquier manera hasta que la turbina fallará Las 14 variables de las que se tomaron datos fueron las siguientes .

1. Flujo de combustible
2. Eficiencia del ventilador
3. Flujo de aire del ventilador
4. Radio flujo de aire y presión del ventilador
5. Eficiencia del compresor de baja presión (LPC)
6. Flujo del compresor de baja presión
7. Radio flujo de aire y presión del LPC
8. Eficiencia del compresor de alta presión (HPC)
9. Flujo del compresor de alta presión
10. Radio flujo de aire y presión del HPC
11. Eficiencia de la turbina de alta presión (HPT)
12. Flujo de HPT
13. Eficiencia de la turbina de baja presión (LPT)
14. Flujo de LPT

En las tablas donde se llevó a cabo el análisis de datos, estas variables tienen los siguientes nombres

---

$W_f$   
 fan\_eff\_mod  
 fan\_flow\_mod  
 fan\_PR\_mod  
 LPC\_eff\_mod  
 LPC\_flow\_mod  
 LPC\_PR\_mod  
 HPC\_eff\_mod  
 HPC\_flow\_mod  
 HPC\_PR\_mod  
 HPT\_eff\_mod  
 HPT\_flow\_mod  
 LPT\_eff\_mod  
 LPT\_flow\_mod

Estas variables se usaron como parámetros para fórmulas(4) que resultaron en las siguientes columnas de datos

1. Temperatura del ventilador
2. Temperatura del LPC
3. temperatura del HPC
4. Temperatura del LPT
5. Presión en la entrada del ventilador
6. Presión total
7. Presión en la salida del HPC
8. Velocidad del ventilador
9. Velocidad del aire
10. Presión del motor entre presión del ventilador
11. Presión estática en la salida del HPC
12. Flujo de la salida de combustible
13. Media de la velocidad del ventilador
14. Media de la velocidad del aire
15. Flujo de salida de aire
16. Radio de combustible entre aire en el motor
17. Entalpía

En las tablas donde se llevó a cabo el análisis de datos, estas variables tienen los siguientes nombres

**T2**  
**T24**  
**T30**  
**T50**  
**P2**  
**P15**  
**P30**  
**Nf**  
**Nc**  
**epr**  
**Ps30**  
**phi**  
**NRf**  
**NRc**  
**BPR**  
**farB**  
**htBleed**

Finalmente todas las columnas anteriores se usaron como parámetros para fórmulas que usamos para determinar el índice de vida de la turbina, esto resulta en

1. Temperatura total en la salida del HPT
2. Vida útil del ventilador
3. Vida útil de LPC
4. Vida útil de HPC

En las tablas donde se llevó a cabo el análisis de datos, estas variables tienen los siguientes nombres

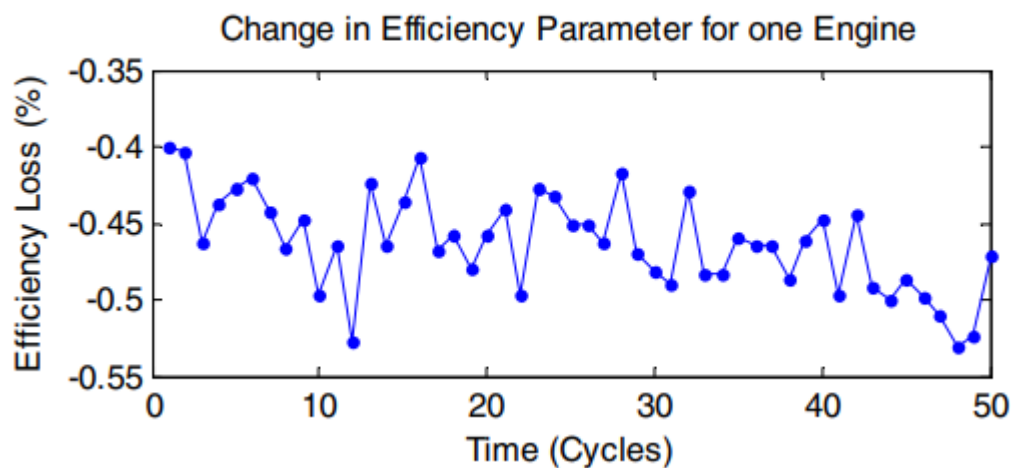
**T48 (EGT)**

**SmFan**

**SmLPC**

**SmHPC**

Finalmente hicieron una tabla de datos en donde calcularon la pérdida de eficiencia en cada ciclo, definen un ciclo como “ejecución de la turbina donde sus componentes presentan un índice de salud aceptable durante 10 minutos”. Este dato será de extrema importancia para el éxito del proyecto.



(4)

No está claro la manera en que se han tomado estos datos, debido a que esta información está protegida bajo las **normas MIL-STD**, sin embargo estas normas también nos aseguran la calidad del proyecto, bajo la norma **MIL-STD-810**, la cual define pruebas ambientales para evaluar la durabilidad de equipos en condiciones extremas, como vibraciones, humedad, polvo y temperaturas extremas, factores clave para sensores en turbinas; y la norma **MIL-STD-461**, la cual trata sobre la compatibilidad electromagnética, asegurando que los sensores no interfieran con otros sistemas electrónicos a bordo.

### E) EDA (Análisis exploratorio de datos)

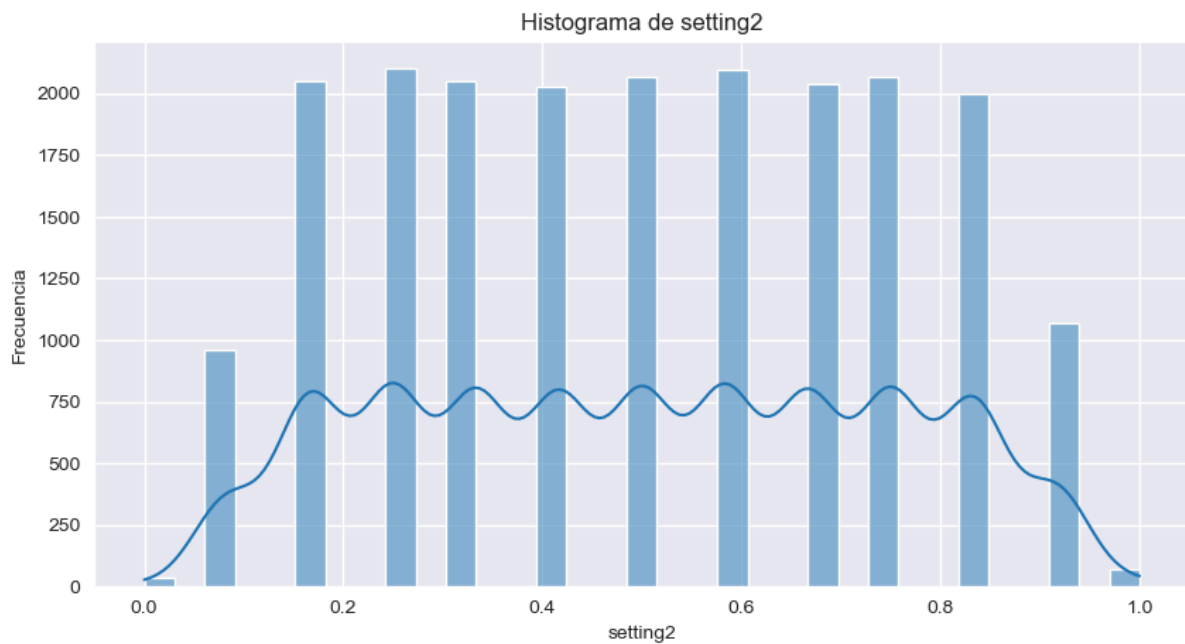
Descargué los datos de las pruebas mencionadas anteriormente, y un manual que detalla cómo se tomaron los datos, inicié un análisis exploratorio de datos, usando la herramienta Jupyter notebook y el lenguaje de programación python. Empecé haciendo una limpieza de datos, eliminé las columnas vacías y revisé consistencia en el rango de valores (que no haya valores fuera de 6 desviaciones estándar), asigne nombres a las columnas para identificar lo que se midió, según lo indicado en el manual. Revisé que los tipos de datos fueran coherentes (que no hubiera datos categóricos con continuos por ejemplo) y grafique como se ven los datos de cada columna.

	id	cycle	setting1	setting2	setting3	s1	s2	s3	s4	s5	...	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18	s19	s20	s21
0	1	1	-0.0007	-0.0004	100.0	518.67	641.82	1589.70	1400.60	14.62	...	521.66	2388.02	8138.62	8.4195	0.03	392	2388	100.0	39.06	23.4190
1	1	2	0.0019	-0.0003	100.0	518.67	642.15	1591.82	1403.14	14.62	...	522.28	2388.07	8131.49	8.4318	0.03	392	2388	100.0	39.00	23.4236

En la gráfica, luego de normalizar los datos (valores de 0 a 1), que no hay datos que se alejen más de 6 std



En la grafica vemos como la linea azul muestra una función sinusoidal que no se aleja de 6 std y demás vemos como cada barra del histograma mantiene una desviación estándar que sigue el modelo de la función sinusoidal



Posteriormente, agregué la columna RUL, esta columna contiene el número de ciclos máximos restantes antes de que haya un fallo crítico según el índice de salud.

	id	cycle	max	RUL
0	1	1	192	191
1	1	2	192	190
2	1	3	192	189
3	1	4	192	188
4	1	5	192	187

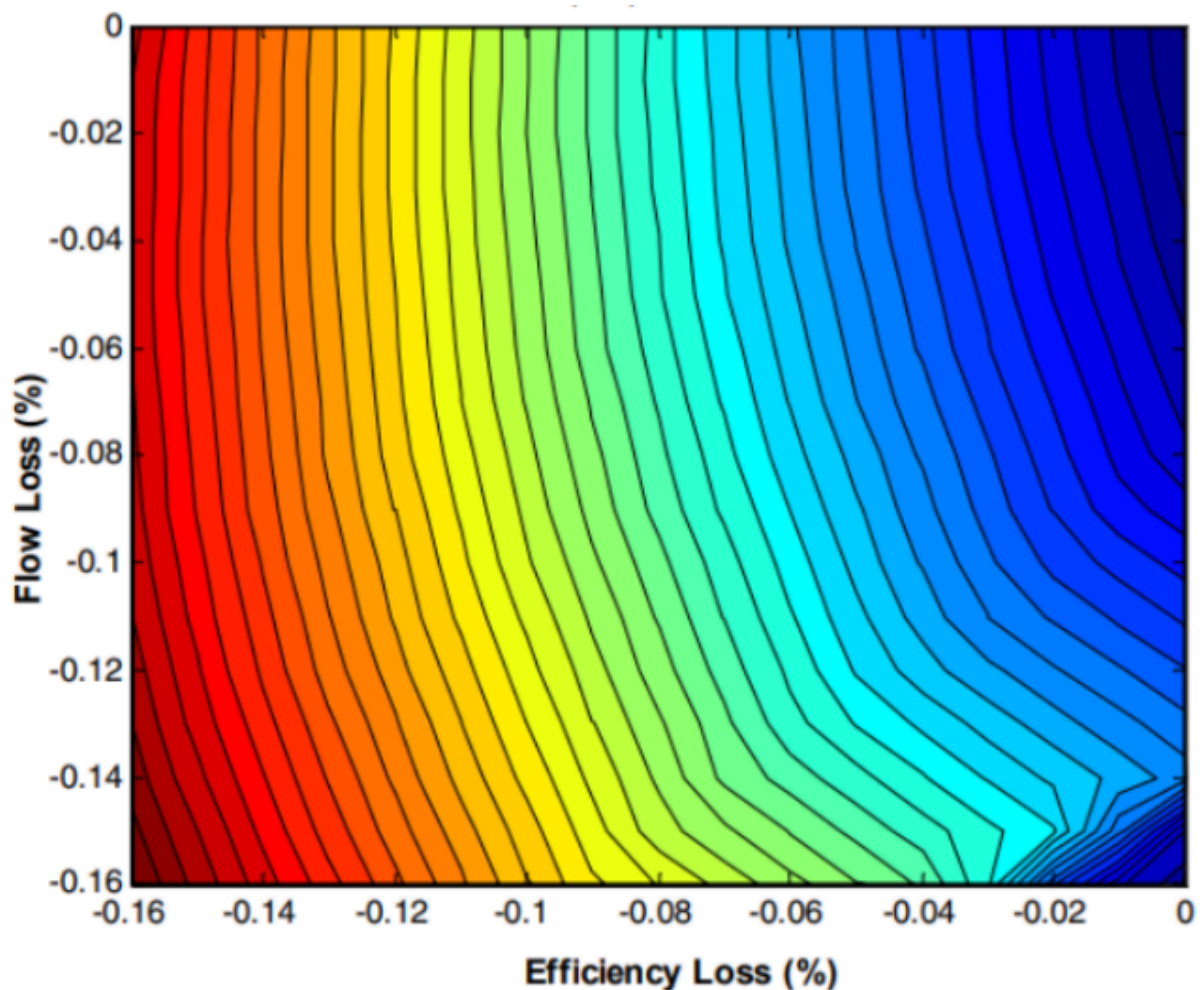


Agregué una columna de datos booleanos, donde 0 representa que hubo un fallo en crítico antes de que llegue a los ciclos máximos esperados, 1 representa que la turbina pudo cumplir con el número de ciclos máximos esperados.

## F) Creación del modelo de IA

### i. Región para índices de vida

El primer paso para la creación del modelo de IA, fue calcular las regiones de cambio de eficiencia por cada variable, primero obtenemos la tasa de cambio de la variable de interés y comparamos este cambio con la pérdida de eficiencia de la turbina. Repetimos este procedimiento con todas las variables



(4)

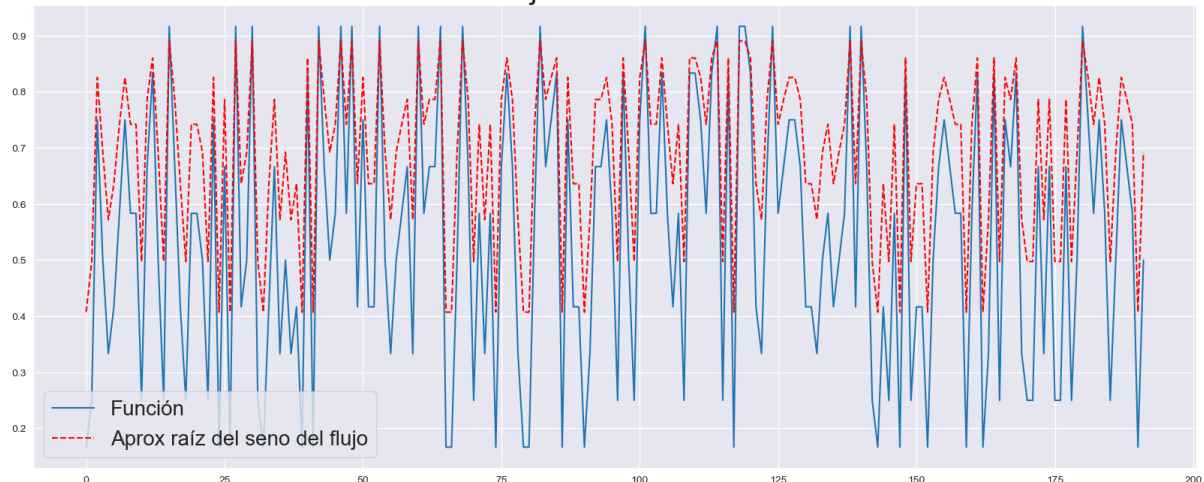
### ii. Creación de la función que se ajuste a los datos (Porcentaje)

Necesitamos una función a la cual podamos calcular la tasa de cambio, esta función debe de representar cada variable ya que al agregar datos nuevos calcularemos la pérdida de eficiencia usando esta función.

Para ello usamos redes neuronales, la red neuronal creará diferentes tipos de funciones y comparará la función creada con nuestros datos.

En este ejemplo tenemos una aproximación al flujo de aire del ventilador por cada ciclo y la aproximación a esta función usando la raíz del seno del flujo de aire.

AProx a la función del flujo de aire del ventilador en cada ciclo



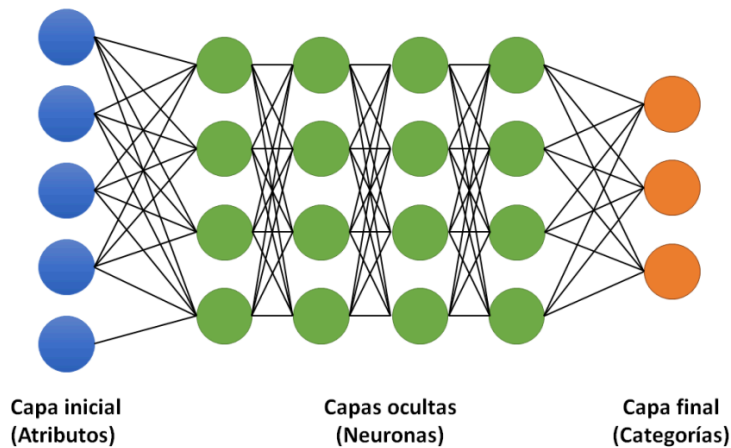
Las veces que compara la función de aproximación con nuestra función real se conocen como epochs, la manera en la que compara la exactitud de la aproximación es usando la siguiente fórmula:

$$\frac{|\text{valor aproximado} - \text{valor exacto}|}{|\text{valor exacto}|} \times 100\%$$

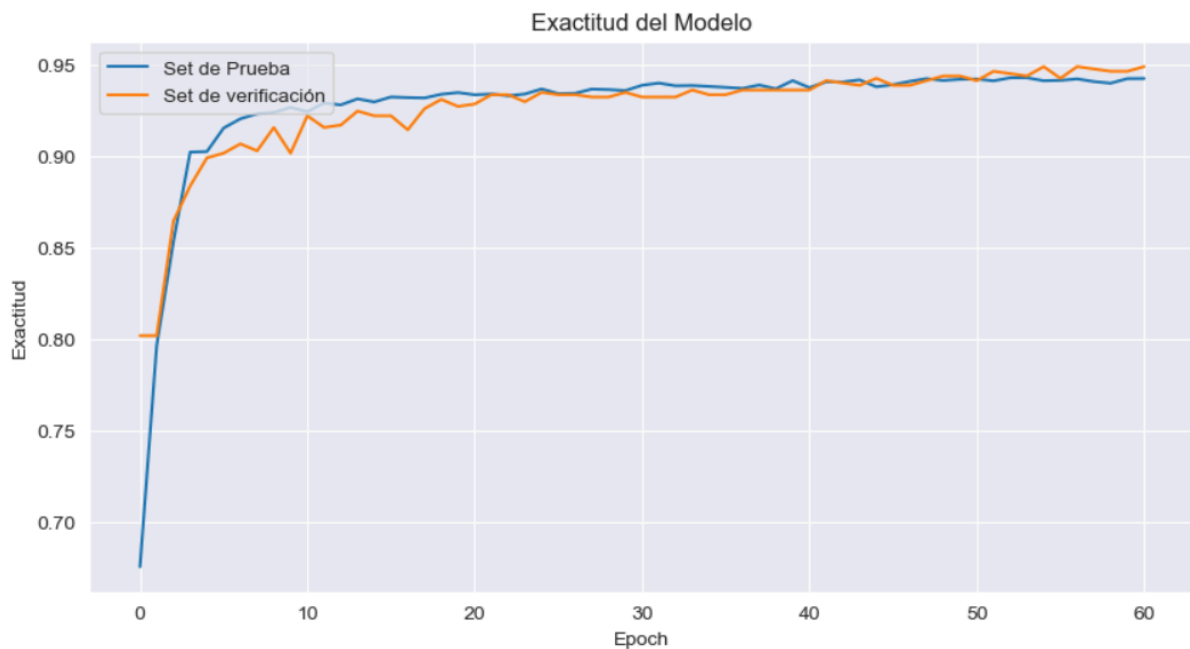
### iii. Red neuronal que estima el índice de salud

Ahora hay que unir las piezas para tener nuestro modelo de inteligencia artificial.

1. En la primer capa damos nuestros atributos (Datos)
2. En la segunda capa nuestro modelo de IA calcula la función que mejor se acerque a los datos
  - a. Luego calculamos la tasa de cambio de nuestra variable y la comparamos con la pérdida de eficiencia.
  - b. Comparamos nuestra pérdida de eficiencia con cada columna del índice de salud (esto regresarán un promedio entre 0 - 1)
3. Aplicamos un valor "meta", por ejemplo, si nuestro promedio es 0.70 o mayor, decimos que nuestra turbina fallará (redondeamos el promedio a 1), de otra forma decimos que no fallará (redondeamos el promedio a 0)



Ya tenemos nuestro modelo de Inteligencia artificial, ahora hay que hacer 2 sets de datos, uno para entrenar a nuestro modelo y otro para comparar los resultados del modelo con los datos reales, usamos la misma fórmula mencionada anteriormente para calcular la eficiencia. Llegué al siguiente resultado



En el eje de las x vemos el número de entrenamientos del modelo  
 En el eje de las y comparamos la exactitud en ambos sets de datos  
 Vemos que el modelo tiene una exactitud cerca del 95%

### G) Proyecto sostenible. Alcances

Este proyecto es amigable con el ambiente debido a que reduce el número de piezas que llegan a ser inservibles en la turbina, el modelo puede procesar los datos en tiempo real, y no se requiere de una computadora que esté encendida todo el tiempo, por lo que solo gastará los recursos de la computadora mientras la turbina esté encendida; a diferencia de otros modelos de IA que requieren un servidor encendido 24 / 7 procesando datos en tiempo real.

Este modelo no actúa por sí solo, ya que si detecta que una turbina fallará, se lo hará saber al usuario, pero no hará nada para detener la turbina, por lo que se requiere un segundo proyecto en donde se tomen los datos generados por el modelo y mediante un sensor se detenga el funcionamiento de la turbina y de esta el proyecto pueda cumplir con su objetivo de reducir los costos de mantenimiento. Una segunda alternativa es apagar la turbina manualmente, esta alternativa también requiere un segundo proyecto donde se decida cómo se llevará a cabo esta acción. De cualquier manera el modelo está diseñado para cumplir con las **normas ISO/IEC 27001 e ISO/IEC 25024**, la primera vigila que los datos usados para el modelo de IA sean abiertos al público y no infrinjan violaciones a exponer datos sensibles, la segunda habla sobre la calidad del modelo, hemos visto que este modelo cumple con una exactitud medida del 92% (promedio)

## 5) Resultados

Este proyecto cumplió con su objetivo de crear un modelo de inteligencia artificial que predice si la turbina está por tener una falla crítica o no, con una exactitud promedio del 93%, se demostró que este proyecto es sostenible y amigable con el ambiente. Se puede utilizar a largo plazo ya que al ingresar nuevos datos que el modelo no había visto antes, la exactitud de mantiene, además cumple con las normas para el cuidado y calidad de los datos SO/IEC 27001 e ISO/IEC 25024, es necesario un segundo proyecto para decidir el paso a seguir luego de haber obtenido la predicción del modelo.

## 6) Fuente

1. Sistema de Transporte Colectivo. (n.d.). *Mantenimiento preventivo*. Gobierno de la Ciudad de México.  
<https://www.metro.cdmx.gob.mx/comunicacion/tipo/boletin/Mantenimiento> recuperado el 8 de octubre de 2024
2. NVIDIA. (n.d.). *Soluciones de IA y Computación Acelerada para la Industria del Automóvil*. NVIDIA. <https://www.nvidia.com/es-la/industries/automotive/> recuperado el 8 de octubre de 2024
3. Epson. (n.d.). *Maintenance technology*. Epson.  
[https://www.epson.co.uk/en\\_GB/sustainability/technologies](https://www.epson.co.uk/en_GB/sustainability/technologies) recuperado el 8 de octubre de 2024
4. NASA. (n.d.). *CMAPSS Jet Engine Simulated Data*.  
[https://data.nasa.gov/Aerospace/CMAPSS-Jet-Engine-Simulated-Data/ff5v-kuh6/about\\_data](https://data.nasa.gov/Aerospace/CMAPSS-Jet-Engine-Simulated-Data/ff5v-kuh6/about_data) recuperado el 8 de octubre de 2024
5. McKinney, W. (2018). *Python for data analysis* (2nd ed.). O'Reilly Media. recuperado el 8 de octubre de 2024

## 7) Anexos

A) Instrucciones para descargar el modelo

En el siguiente link encontrará un documento con las instrucciones para poder ejecutar el modelo de IA

<https://docs.google.com/document/d/1si0sCUYBWZU3yxwkr2LupVyNZAlnJSvKwJknSizEBdc/edit?usp=sharing>



B) Descarga de los datos y modelo de ML

<https://github.com/JosueMedina99/IntroduccionIngenieria>



ESCANEA EL QR PARA VER LA PRESENTACIÓN

**¿Cómo un algoritmo de redes neuronales disminuye los costos de reparación en motores de turbina a gas para aeronaves?**

Medina Campero Brandon Josue, estudiante de 3 / 9 semestre de la carrera de Ingeniería Mecánica FES Aragón, UNAM. 9 de octubre de 2024

<https://docs.google.com/presentation/d/1ZwBcsznUzRCYn3T757HQgN-naSyCs9nD11CnGXyeemA/edit?usp=sharing>

