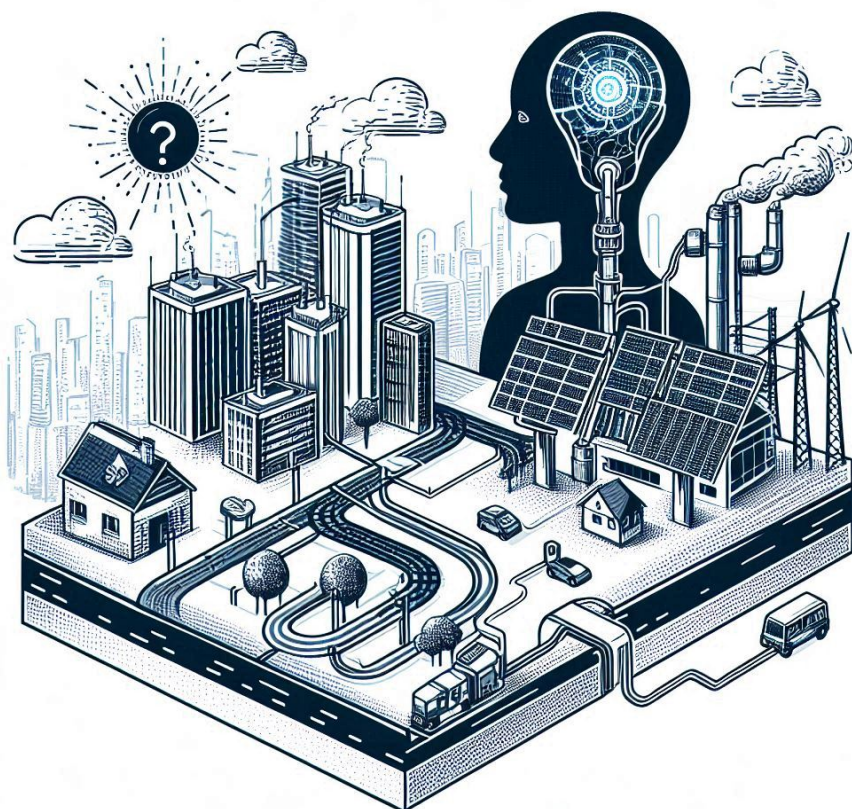


# Proyecto de Simulación

## Sistema de Eventos sobre Termoeléctricas



Daniel Machado Pérez [daniel.machado.0206@gmail.com](mailto:daniel.machado.0206@gmail.com)

Daniel Toledo Martínez [daniel.020126@gmail.com](mailto:daniel.020126@gmail.com)

Oswaldo R. Moreno P. [osvaldo020213@gmail.com](mailto:osvaldo020213@gmail.com)

Facultad de Matemática y Computación, Universidad de la Habana

Junio 2024

# Índice

<b>1. Resumen</b>	<b>3</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>3</b>
2.1. Breve descripción del proyecto . . . . .	3
2.2. Objetivos y metas . . . . .	3
2.3. Variables que describen el problema . . . . .	4
2.3.1. Tiempo entre roturas de una planta termoeléctrica. . . . .	4
2.3.2. Tiempo de reparación de una planta termoeléctrica . . . . .	5
2.3.3. Demanda diaria de energía de un circuito . . . . .	5
<b>3. Detalles de Implementación</b>	<b>6</b>
3.1. Clases implementadas . . . . .	6
3.2. Jupyter Notebook . . . . .	6
3.3. Simulación . . . . .	7
3.4. Estrategias del Agente . . . . .	7
<b>4. Resultados y Experimentos</b>	<b>8</b>
4.1. Hallazgos de la Simulación . . . . .	8
4.2. Interpretación de los resultados . . . . .	11
4.3. Hipótesis derivadas de los resultados . . . . .	11
4.4. Experimentos realizados para validar las hipótesis . . . . .	11

## 1. Resumen

Este proyecto se centra en la simulación de un sistema de plantas termoeléctricas que proporcionan energía a varios circuitos. Dentro de este sistema, pueden ocurrir eventos que interrumpen el funcionamiento óptimo de las plantas termoeléctricas, reduciendo su capacidad para satisfacer la demanda de los circuitos. Para gestionar estas situaciones, el sistema incluye un planificador que puede optar por realizar el mantenimiento de las plantas termoeléctricas o apagar un circuito. La simulación tiene como objetivo estudiar el comportamiento del sistema durante un período específico y analizar los resultados para optimizar su operación.

## 2. Introducción

### 2.1. Breve descripción del proyecto

El sistema consta de un conjunto de plantas termoeléctricas que suministran energía a varios circuitos. Cada planta termoeléctrica tiene una capacidad específica de generación de energía, que puede verse afectada por eventos que ocurren con el tiempo. Estos eventos pueden clasificarse en dos tipos: eventos de mantenimiento y eventos de rotura.

Los eventos de rotura ocurren cuando una planta termoeléctrica está en estado de fallo, lo que hace que deje de generar energía. En tales casos, la planta termoeléctrica necesita reparaciones, lo que requiere un cierto tiempo. Una vez que las reparaciones se completan, la planta termoeléctrica reanuda su estado operativo normal.

Un evento de mantenimiento ocurre cuando el planificador decide que una planta termoeléctrica necesita mantenimiento según un criterio específico, como la posible proximidad de un evento de rotura. En este caso, la planta termoeléctrica se saca de circulación y entra en un estado de reparación, que debería ser más corto que cuando ocurre una rotura. Una vez completado el mantenimiento, la planta termoeléctrica reanuda el suministro al sistema con su capacidad de generación de energía.

Cada circuito tiene una demanda de energía que debe ser satisfecha por las plantas termoeléctricas. Si la energía producida por las plantas termoeléctricas es insuficiente, el sistema experimenta un déficit. En tal escenario, el planificador debe decidir bajo qué criterios y en qué proporción apagar un circuito. Apagar un circuito significa que el circuito no recibirá energía por un cierto período, lo que resulta en una cierta reducción porcentual en su demanda.

### 2.2. Objetivos y metas

Se quieren comparar diferentes estrategias de planificación para la gestión de las plantas termoeléctricas. Específicamente, se quiere determinar cuál de las siguientes estrategias es más efectiva en ciertos escenarios:

- Siempre esperar a que ocurran fallos antes de realizar las reparaciones.
- Programar mantenimiento sistemático para las plantas termoeléctricas antes de que ocurra una posible falla.

Se quiere realizar el análisis en los siguientes escenarios:

- La generación de electricidad satisface la demanda desde el principio porque el sistema es suficientemente robusto.
- El sistema no logra satisfacer la demanda debido a sus características y dimensiones iniciales.

## 2.3. Variables que describen el problema

Para describir el problema, se necesitan variables que nos permitan representar los siguientes fenómenos:

- Tiempo entre roturas de una planta termoeléctrica.
- Tiempo de reparación de una planta termoeléctrica.
- Demanda diaria de energía de un circuito.

### 2.3.1. Tiempo entre roturas de una planta termoeléctrica.

Según la literatura, *Weibull*( $\alpha, \lambda$ ) es una distribución comúnmente utilizada para modelar la distribución de fallos (en sistemas) cuando la tasa de fallos es proporcional a una potencia del tiempo, donde  $\alpha$  es el parámetro de forma y  $\lambda$  es el parámetro de escala de la distribución.

- Un valor  $\alpha < 1$  indica que la tasa de fallos disminuye con el tiempo.
- Cuando  $\alpha = 1$ , la tasa de fallos es constante en el tiempo.
- Un valor  $\alpha > 1$  indica que la tasa de fallos aumenta con el tiempo.

El parámetro  $\lambda$  es un factor de escala que estira o comprime la distribución. Proporciona una estimación de la "vida característica" del producto, que es el tiempo en el cual el 63.2 % del equipo habrá fallado.

El análisis de Weibull ayuda a predecir el comportamiento futuro de fallos de un componente o sistema. Esta capacidad predictiva ayuda en la planificación de actividades de mantenimiento, reduciendo tiempos de inactividad no planificados y aumentando la eficiencia general del sistema.

#### **Función de Distribución Acumulada:**

$$F(x) = 1 - e^{-(\lambda x)^\alpha}, \text{ para } x > 0$$

Para generar valores con una distribución Weibull, se utilizó su implementación de la biblioteca **random** de Python.

### 2.3.2. Tiempo de reparación de una planta termoeléctrica

Una distribución log-normal es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo está distribuido normalmente. En otras palabras, si una variable  $X$  sigue una distribución log-normal, entonces  $\ln(X)$  sigue una distribución normal. La distribución log-normal es útil para modelar datos positivos que son asimétricos y tienen una cola larga a la derecha, lo que significa que los valores extremos altos son más comunes.

Debido a esta característica, dicha distribución se ajusta bien en esta parte del problema, ya que los tiempos de reparación tienden a concentrarse hacia el extremo derecho (mayor) de los datos.

#### Propiedades de la Distribución Log-normal:

**Definición Matemática:** Si  $X$  es una variable aleatoria distribuida log-normal, entonces:

$$X \sim \text{Lognormal}(\mu, \sigma^2) \Rightarrow \ln(X) \sim N(\mu, \sigma^2)$$

Aquí,  $\mu$  y  $\sigma$  son los parámetros de la distribución normal de  $\ln(X)$ , donde  $\mu$  es la media y  $\sigma^2$  es la varianza.

#### Función de Densidad de Probabilidad (PDF):

La función de densidad de probabilidad de una distribución log-normal se define como:

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \text{ para } x > 0$$

### 2.3.3. Demanda diaria de energía de un circuito

Del mismo modo, el consumo diario de energía de un circuito puede ser modelado con una distribución log-normal, ya que se supone que el consumo se concentra hacia valores más altos.

Para obtener valores con una distribución log-normal, se utilizó la implementación del generador de la biblioteca **random** de Python.

### 3. Detalles de Implementación

La investigación se realizó utilizando Python. Como fuentes externas, se utilizaron las siguientes bibliotecas para el procesamiento de datos:

- random (rnd)
- numpy (np)
- matplotlib.pyplot (plt)

#### 3.1. Clases implementadas

- Weibull y LogNormal para cada termoeléctrica para llevar un seguimiento de sus parámetros de distribución. Cada una de estas clases utiliza la distribución correspondiente de rnd.
- ThermoElectric y Circuit fueron creadas para llevar un seguimiento de las características de nuestras entidades, como la capacidad de generación de cada termoeléctrica y sus eventos previos y futuros. Los circuitos son un caso similar, tienen su valor de demanda eléctrica, su historial de valores de déficit y el valor total de déficit.
- La clase Event es autoexplicativa, ya que contiene los eventos de ruptura y reparación de cada termoeléctrica.
- En la clase Agent almacenamos las diferentes estrategias de planificación para todas las comparaciones y el posterior análisis de datos.
- Finalmente, RoundRobin permite la rotación de circuitos cuando es necesario realizar cortes de energía porque la demanda supera la capacidad de generación.

#### 3.2. Jupyter Notebook

##### Creación de las Termoeléctricas

- La clase Weibull recibe como  $\alpha$  un valor aleatorio en rangos especificados en el notebook. De igual forma ocurre con el valor  $\lambda$ . (Nota: La implementación de Weibull en **random** recibe el parámetro de escala como el primer parámetro ( $\alpha$ ), y el segundo es el parámetro de forma ( $\lambda$ )).
- LogNormal recibe un valor aleatorio uniforme en un rango como  $\mu$ , y otro valor aleatorio como  $\sigma^2$ .
- La generación eléctrica tiene un valor aleatorio entre 200 y 1000.

Se tienen métodos auxiliares para obtener el próximo evento general dado el día actual, determinar el tiempo medio de trabajo de todas las termoeléctricas dado su estado final a lo largo del tiempo después de ejecutar una sola simulación. También se tiene un método para ejecutar una sola simulación, donde la salida es el estado de todas las termoeléctricas durante la simulación, y un método para ejecutar k simulaciones consecutivas con diferentes parámetros, cuya salida es el promedio de días de trabajo después de la k-ésima simulación.

### 3.3. Simulación

La función **simulate** simula la operación de un conjunto de dispositivos termoeléctricos durante un número específico de días.

Recibe los siguientes parámetros:

- **thermoelectrics**: una lista de dispositivos termoeléctricos a simular.
- **days**: el número de días para ejecutar la simulación.
- **agent**: un agente opcional que puede gestionar los termoeléctricos y los circuitos.
- **circuits**: una lista opcional de circuitos a los que están conectados los termoeléctricos.
- **stored\_energy**: la cantidad inicial de energía almacenada.
- **rotation**: la estrategia de rotación para los circuitos.

La función inicializa listas para hacer un seguimiento del estado operativo de los termoeléctricos, el déficit de energía por día y la energía almacenada por día.

Luego entra en un bucle que se ejecuta durante un número específico de días. Para cada día, calcula la demanda total de los circuitos, permite que el agente gestione los termoeléctricos y los circuitos, y procesa cualquier evento que ocurra ese día.

La función luego calcula la energía total ofrecida por los termoeléctricos en funcionamiento y la energía almacenada, y calcula el déficit de energía y la energía almacenada para el día.

Finalmente, devuelve listas que representan el estado operativo de los termoeléctricos, el déficit de energía por día, la energía almacenada por día y los circuitos.

### 3.4. Estrategias del Agente

- **empty\_strategy**: no hace nada
- **give\_maintenance\_heuristic**: da mantenimiento a una termoeléctrica si ha estado funcionando durante un número de días igual al tiempo promedio de ruptura calculado en una k-simulación

- `disconnect_circuit_heuristic`: apaga el siguiente circuito en una proporción de  $1/4$  de su demanda hasta que la generación sea superior al consumo

## 4. Resultados y Experimentos

### 4.1. Hallazgos de la Simulación

Todos los experimentos se realizaron utilizando 115 circuitos asociados con 20 termoeléctricas, satisfaciendo inicialmente la demanda energética.

Para comprender mejor el sistema, se realizó una simulación simple en la que se recopilaban estadísticas diarias sobre el número de plantas termoeléctricas operativas, la energía almacenada y el déficit energético.

El siguiente gráfico muestra el número de plantas termoeléctricas operativas en función de los días. También muestra la cantidad de energía almacenada y el déficit energético en función de los días.



En este sistema, se observó que la demanda de los circuitos asociados con las plantas termoeléctricas se satisface en gran medida. Sin embargo, entre los días 200 y 250, se acumula un déficit energético que luego se recupera rápidamente. En consecuencia, el número de plantas termoeléctricas operativas durante esos días disminuyó significativamente.

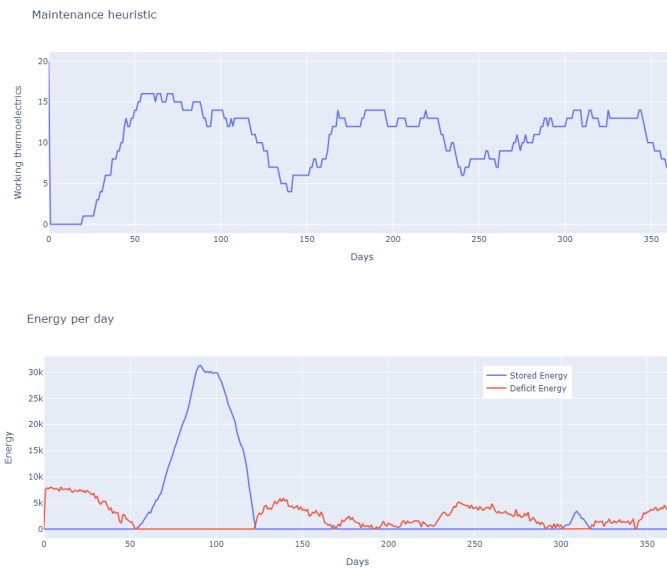
Esto conduce a considerar la posibilidad de implementar un mantenimiento preventivo en las plantas termoeléctricas como una estrategia para evitar la acumulación de déficit energético.

Para desarrollar esta estrategia, se realizaron 10 simulaciones con diferentes



variables independientes para determinar el día esperado de una planta termoeléctrica en el que se produciría una avería.

Basándose en este promedio, se implementó un operador que desencadena el mantenimiento de una planta termoeléctrica cuando no hay déficit energético en el sistema y ha estado operando durante más días que el promedio esperado hasta la avería. Para evitar que múltiples plantas termoeléctricas se sometan a mantenimiento simultáneamente, se limitó a un máximo de una planta por día. Además, es importante tener en cuenta que el mantenimiento preventivo es de menor duración que una reparación típica después de una avería. Se observaron los siguientes resultados:



Como se puede ver, el déficit energético aumentó en los últimos días de la simulación.

Luego, se decidió simular cada caso para comparar mejor los resultados en los gráficos, lo que resultó en lo siguiente.



Realmente no se puede asegurar que esta estrategia sea la mejor, por lo que se profundizará en el tema más adelante.

Otra estrategia, que no influye en el análisis anterior pero que sirve como punto de partida para futuras ideas, fue decidir apagar los circuitos de manera uniforme usando RoundRobin, apagando un cierto porcentaje de cada circuito hasta que se satisfaga el déficit energético de ese día. Esto es para evitar que siempre se vea afectado el mismo circuito.

## 4.2. Interpretación de los resultados

A partir del análisis de la simulación, se pudo observar que cuando se tiene un sistema que proporciona toda la energía necesaria, es mejor usar la estrategia de no proporcionar mantenimiento y esperar a que ocurra la avería para realizar la reparación, todo esto teniendo en cuenta los parámetros mencionados anteriormente. Este resultado puede deberse a un mal ajuste de los parámetros debido a la falta de datos reales, al hecho de que la simulación es macroscópica o porque se necesita una mejor estrategia para obtener un mejor resultado. Sin embargo, se puede ver que cuando se satisface la demanda, aplicar esta estrategia permite obtener mejores resultados. Esto se debe a que podemos sacarlas de operación para el mantenimiento sin causar daños y reducir su tiempo de reparación, permitiendo una mejor generación.

## 4.3. Hipótesis derivadas de los resultados

Los resultados de las simulaciones condujeron a la formulación de las siguientes hipótesis:

- En un escenario donde el sistema no logra satisfacer la demanda y se genera un déficit la mayor parte del tiempo, la estrategia de brindar mantenimiento sistemático es igual o más efectiva que no proporcionarlo.
- En el escenario opuesto, donde el sistema satisface cómodamente la demanda, es mejor no proporcionar mantenimiento a las plantas termoeléctricas, sino esperar a que ocurran averías para realizar las reparaciones.

## 4.4. Experimentos realizados para validar las hipótesis

Dada la hipótesis, se diseñó el siguiente experimento para realizar comparaciones: Se ejecutaron un gran número de simulaciones con la implementación de la estrategia y un número igual sin la implementación, para finalmente obtener las siguientes estadísticas:

- El promedio del número de termoeléctricas funcionando en el día  $i$  en todas las simulaciones.
- El promedio del déficit en el día  $i$  en todas las simulaciones.
- El promedio de la energía almacenada en el día  $i$  en todas las simulaciones.
- El promedio del número de termoeléctricas funcionando a lo largo de todos los días de las simulaciones.
- El promedio del déficit a lo largo de todos los días de las simulaciones.
- El promedio de la energía almacenada a lo largo de todos los días de las simulaciones.

Cada una de las estadísticas anteriores fue calculada para cada enfoque, y en la comparación final, se obtuvieron los siguientes resultados:

## Escenario con Déficit

### Sin Mantenimiento

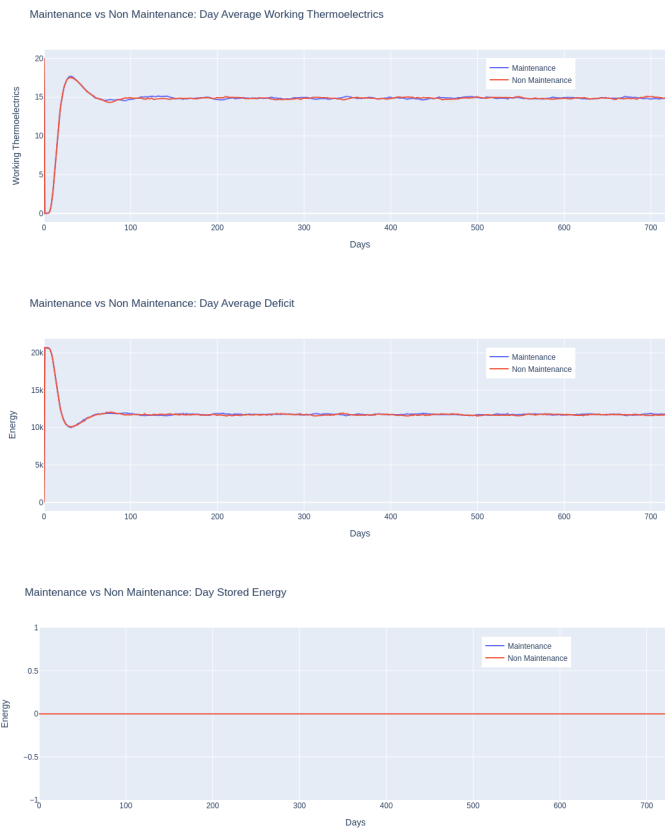
Promedios en 500 simulaciones:

- Termoeléctricas Funcionando: 14.691030136986301
- Déficit: 11839.281385171502
- Energía Almacenada: 0.0

### Mantenimiento

Promedios en 500 simulaciones:

- Termoeléctricas Funcionando: 14.708687671232877
- Déficit: 11876.289282200563
- Energía Almacenada: 0.0



### **Escenario sin Déficit**

#### **Sin Mantenimiento**

Promedios en 500 simulaciones:

- Termoeléctricas Funcionando: 14.687769863013699
- Déficit: 45.54689524173809
- Energía Almacenada: 1979794.462390682

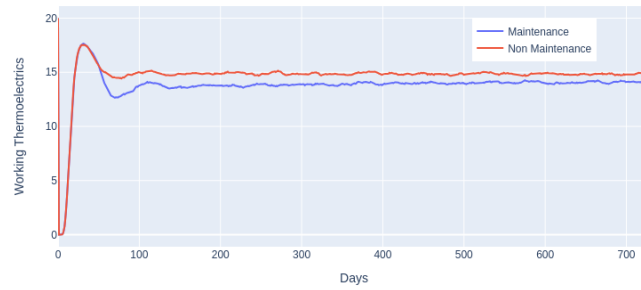
#### **Maintenance**

Average in 500 simulations:

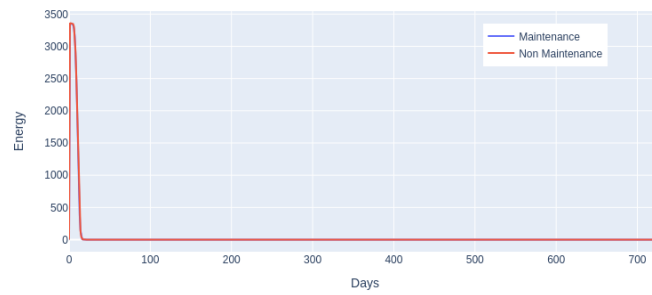
- Termoeléctricas Funcionando: 13.797731506849315
- Déficit: 45.47647307616969
- Energía Almacenada: 1782115.4892050272

Como se puede ver en los gráficos y resultados, los experimentos son consistentes con las hipótesis.

Maintenance vs Non Maintenance: Day Average Working Thermoelectrics



Maintenance vs Non Maintenance: Day Average Deficit



Maintenance vs Non Maintenance: Day Stored Energy

