

---

Facultad de Matemática y Computación. Universidad de La Habana.  
Inteligencia Artificial y Simulación.

[Repositorio del Proyecto en GitHub](#)

## Simulación de un Sistema Eléctrico basado en Plantas Termoelectricas.

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

Daniel Toledo Martínez - [daniel020126@gmail.com](mailto:daniel020126@gmail.com)

Osvaldo R. Moreno Prieto - [osvaldo020213@gmail.com](mailto:osvaldo020213@gmail.com)

October 11, 2024

### Resumen

Este proyecto se centra en la simulación de un sistema de plantas termoelectricas que abastecen de energía a varios circuitos distribuidos en una región geográfica. Se implementa un generador de un mapa del sistema, ubicando circuitos, termoelectricas y una línea principal a la que se conectan todos los componentes y por la que pasa toda la energía producida. Cada termoelectrica cuenta con varias partes o piezas que garantizan su funcionamiento, y un agente planificador con arquitectura BDI que se encarga de tomar decisiones sobre el régimen de mantenimientos y reparaciones a las piezas. Cada circuito consta de uno o más bloques que lo dividen y reciben electricidad por separado. Por último existe un agente superior que simula al Jefe de la Empresa Eléctrica y toma decisiones con respecto a la distribución óptima de electricidad, también con arquitectura BDI. Para garantizar la efectividad de las decisiones se utilizan componentes de Búsqueda, Conocimiento y Procesamiento de Lenguaje Natural.

### Abstract

This project focuses on the simulation of a system of thermoelectric plants that supply energy to various circuits distributed across a geographical region. A system map generator is implemented, placing circuits, thermoelectric plants, and a main power line connecting all components, through which all produced energy flows. Each thermoelectric plant consists of several parts that ensure its proper functioning, and a BDI (Belief-Desire-Intention) architecture planning agent is responsible for making decisions regarding the maintenance and repair schedule of these parts. Each circuit is divided into one or more blocks, which receive electricity separately. Additionally, there is a higher-level agent simulating the Chief of the Electric Company, who makes decisions regarding the optimal distribution of electricity, also based on a BDI architecture. To ensure the effectiveness of decision-making, components from the fields of Search, Knowledge Representation, and Natural Language Processing, within Artificial Intelligence, are utilized.

---

**Palabras Clave:** Termoelectrica, Circuito, Bloque, Caldera, Generador, Turbina de vapor, Serpentina, Agente, BDI, Belief, Desire, Intention, Algoritmo Genético (GA), Lógica Difusa, Modelo Extenso de Lenguaje (LLM)

### ÍNDICE

## 1 Introducción

1.1	Descripción del Proyecto . . . . .	2
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.3	Variables que describen el problema . . . . .	2
1.3.1	Tiempo entre roturas de una pieza de una planta termoelectrica. . . . .	2
1.3.2	Tiempo de reparación de una planta termoelectrica . . . . .	3
1.3.3	Demanda diaria por hora de energía de un circuito . . . . .	3
2	Generación del Mapa Inicial . . . . .	3
3	Agentes con Arquitectura BDI . . . . .	3
3.1	Agente de Termoelectrica . . . . .	3
3.2	Jefe de la Empresa Eléctrica . . . . .	4
4	Algoritmo Genético . . . . .	5
5	Lógica Difusa . . . . .	6
6	Modelo Extenso de Lenguaje . . . . .	6
7	Ejecución de la Simulación . . . . .	6
7.1	Predicción de Consumo por Circuito e Inicialización de la Generación por Termoelectrica . . . . .	7
7.2	Simulación . . . . .	8
7.3	Hipótesis Realizadas . . . . .	9
8	Resultados y Estadísticas . . . . .	9
8.1	Test de Hipótesis . . . . .	10
9	Conclusiones . . . . .	11
9.1	Recomendaciones y Mejoras . . . . .	12

## 1 INTRODUCCIÓN

En esta sección estaremos definiendo el problema en cuestión, sus componentes (que serán abordadas a detalle más adelante), los objetivos planteados y algunas cuestiones técnicas que forman parte del marco teórico sobre el que se sustenta la investigación.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El **Sistema Eléctrico** que se consideró consta de un conjunto de **Plantas Termoeléctricas** situadas relativamente cercanas a un conjunto de circuitos distribuidos en un mapa 2D. Se asume que cada termoeléctrica consta de 4 tipos de piezas principales: **Calderas, Turbina de Vapor, Serpentes, Generador** [1]. En este proyecto se decidió abstraerse de la función que cumple cada una de estas piezas en una verdadera Planta Termoeléctrica. En cambio se otorgó relevancia a la implicación de una rotura de cada una de ellas en el rendimiento de la termoeléctrica. Se asumió que una planta puede tener una o más calderas, y que la generación de la planta está dividida en cada una de sus calderas, es decir, al romperse una caldera se pierde la generación que corresponde a la capacidad máxima entre el total de calderas. Eso quiere decir que si dejan de funcionar todas las calderas al mismo tiempo la planta no producirá energía. En cuanto a las demás partes, cada planta posee una sola de cada una de ellas y su rotura implica la salida de circulación de la termoeléctrica del sistema eléctrico. Cada termoeléctrica tendrá una generación máxima, una ubicación en el mapa, una planilla del costo de suministrar energía a cada circuito, una energía almacenada y un **Agente** planificador de mantenimientos y reparaciones a sus partes. Además constan de la capacidad de almacenar la energía sobrante de la distribución, la cual pueden poner en circulación en la distribución de un próximo día.

Los **Circuitos** fueron modelados como un conjunto de **Bloques**, un consumo eléctrico por hora, un nivel de industrialización y una cantidad de ciudadanos. Cada uno tiene una ubicación en el mapa inicial y está conectado a la línea principal de la red eléctrica. Cada bloque consta de una demanda energética, un registro de los horarios de corte eléctrico, y una opinión general de sus habitantes sobre el servicio de la Empresa Eléctrica, obtenido con la ayuda de la **Lógica Difusa**. Además tienen un consumo diario por hora, una cantidad de ciudadanos y un nivel de industrialización igual al del circuito al que pertenece. La suma de los consumos de los bloques conforman el consumo del circuito. Lo mismo pasa con la cantidad de ciudadanos. Como cada circuito y cada termoeléctrica está conectada al sistema energético de toda la región, se cumple que desde cualquier planta se puede suministrar energía a cualquier circuito, teniendo en cuenta el costo por la distancia.

Para decidir la distribución de energía en el sistema existe el **Jefe de la Empresa Eléctrica**, modelado con otro agente con arquitectura **BDI**, que recibe información del estado de las termoeléctricas y los circuitos, dígame generación, demanda, estado de opinión, impacto económico, etc, y con la asistencia de componentes de **Inteligencia Artificial** optimiza la el abastecimiento. Este agente tiene la potestad de dejar de suministrar energía a un bloque en determinados horarios, cosa que estará obligado a hacer en el caso de la existencia de déficit.

## 1.2 OBJETIVOS

Se simula el comportamiento del sistema y las interacciones de los agentes buscando una planificación eficiente de la distribución de energía. Se pretende crear un método que dado cualquier configuración geográfica inicial de un sistema eléctrico, sea capaz de modelar escenarios donde se manejen los recursos de manera efectiva y se muestre un buen rendimiento relativo a las condiciones con las que se cuentan.

## 1.3 VARIABLES QUE DESCRIBEN EL PROBLEMA

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

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

### 1.3.1 TIEMPO ENTRE ROTURAS DE UNA PIEZA 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.

### 1.3.2 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:

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

### 1.3.3 DEMANDA DIARIA POR HORA DE ENERGÍA DE UN CIRCUITO

El consumo diario de energía de un circuito puede ser modelado con una mezcla de distribuciones normales (*Gaussian Mixture*), puesto que en un día común se experimentan 2 picos de consumo energético, uno en la mañana aproximadamente de 5:00am a 9:00am y otro mayor en la noche de 5:00pm a 9:00pm. Partiendo de un consumo base y proporcionando como parámetros la variabilidad, desviación estándar, media y peso de cada pico puede obtenerse una distribución del consumo en las 24 horas de un día.

## 2 GENERACIÓN DEL MAPA INICIAL

Para la creación del mapa se implementó un generador que primeramente coloca circuitos en posiciones aleatorias de una matriz 2D. Luego utilizando clusterización ubica las  $n$  termoelectricas en los  $n$  centroides calculados. A continuación, utilizando interpolación primeramente por las termoelectricas y hasta que no existan puntos aislados se generan las **Torres de Alta Tensión**, que están unidas por segmentos que conforman la línea principal del Sistema Energético. Finalmente a través de geometría básica

se genera el ‘cableado’ con la menor distancia de cada termoelectrica y circuito a la línea principal, calculando y guardando dichas distancias en el proceso.

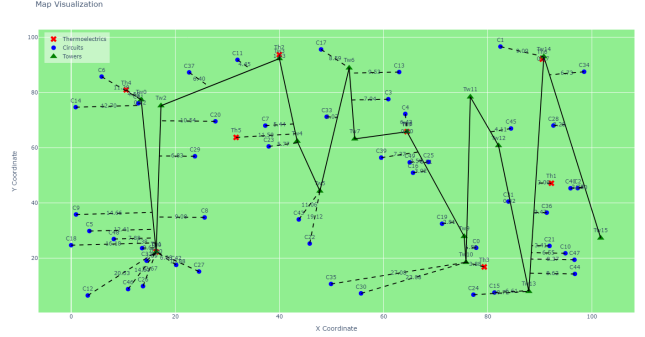


Figure 1: Ejemplo de mapa.

## 3 AGENTES CON ARQUITECTURA BDI

La arquitectura BDI (Beliefs-Desires-Intentions) en la simulación mediante agentes les permite modificar su conocimiento del medio o creencias a través del recibimiento de una percepción, generar nuevas opciones para reformular sus deseos y filtrar las intenciones que debe tener para llevarlos a cabo, para de esta manera actuar e interactuar para lograr sus objetivos. [2] En este proyecto fueron utilizados dos tipos de agentes con arquitectura BDI:

- **Agente de Termoelectrica:** Existe uno en cada Termoelectrica y sus objetivo es mantenerla funcionando para aportar el mejor rendimiento posible al Sistema Eléctrico.
- **Jefe de la Empresa Eléctrica:** Existe solo uno y se encarga de encontrar y ejecutar la mejor planificación posible de la distribución de energía en dependencia de sus circunstancias en cada momento.

### 3.1 AGENTE DE TERMOELÉCTRICA

Su percepción se basa en el conocimiento del estado de su termoelectrica y de algunos datos del estado general del sistema como la demanda y la oferta del día anterior. También puede conocer un tiempo estimado de rotura de las piezas de la termoelectrica, lo cual serviría para planificar posibles mantenimientos, su máxima generación posible, su generación actual y la pérdida de capacidad de generación ante la rotura de una pieza.

#### Beliefs

- **plant\_is\_working:** True si la Planta Termoelectrica del Agente está funcionando, False en caso contrario.
- **parts\_status:** Una lista de tuplas con 3 elementos, donde el primer elemento es la instancia de la parte, el segundo es True si la parte está funcionando y False

en caso contrario, y el tercer elemento indica el tiempo de vida útil estimado restante.

- **broken\_parts**: Una lista de partes que están actualmente rotas.
- **max\_capacity**: La capacidad máxima de la Planta Termoeléctrica.
- **current\_capacity**: La capacidad actual de la Planta Termoeléctrica.
- **power\_output\_reduction\_on\_part\_failure**: Una lista de tuplas donde el primer elemento es la Parte y el segundo es la reducción de producción de energía cuando falla.
- **general\_deficit**: El déficit general del Sistema Eléctrico.
- **general\_demand**: La demanda general del Sistema Eléctrico.
- **general\_offer**: La oferta general del Sistema Eléctrico.
- **all\_desires**: Todos los deseos posibles del Agente.
- **current\_desires**: Los deseos actuales del Agente.

#### Desires

- **maintain\_maximum\_power\_output**: Deseo de mantener la máxima producción de energía. (True o False)
- **minimize\_downtime**: Deseo de minimizar el tiempo de inactividad. (True o False)
- **meet\_energy\_demand**: Deseo de satisfacer la demanda de energía. (True o False)
- **prioritize\_critical\_part\_repair**: Deseo de priorizar la reparación de partes críticas. (True o False)
- **prevent\_unexpected\_breakdowns**: Deseo de prevenir fallos inesperados. (True o False)
- **repair\_parts**: Deseo de reparar las partes dañadas. (True o False).

#### Intentions

- **operate\_at\_full\_capacity**: Intención de operar a plena capacidad.
- **reduce\_downtime**: Intención de reducir el tiempo de inactividad.
- **increase\_power\_output**: Intención de aumentar la producción de energía.
- **prioritize\_repair\_of\_critical\_parts**: Intención de priorizar la reparación de partes críticas.
- **perform\_maintenance\_on\_parts**: Intención de brindar mantenimiento.
- **repair\_parts**: Intención de realizar reparaciones.

### 3.2 JEFE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA

Su percepción está dada por una lista de todas las termoelectricas, todos los circuitos, la matriz de las distancias entre objetos del mapa, la demanda por bloque, la generación por termoelectrica, el coeficiente de importancia, industrialización y estado de opinión por circuito, un registro de los cortes de electricidad que han ocurrido y los datos generales del sistema como el déficit.

#### Beliefs

- **thermoelectrics\_id**: El identificador único de cada termoelectrica.
- **circuits\_id**: El identificador único de cada circuito.
- **generation\_per\_thermoelectric**: La electricidad generada por cada termoelectrica.
- **distance\_matrix**: El costo de transmitir energía de cada termoelectrica a cada circuito.
- **demand\_per\_block\_in\_circuits**: La demanda por hora de cada bloque en cada circuito.
- **total\_demand\_per\_circuits**: La demanda total por hora por cada circuito.
- **general\_demand**: La demanda general del sistema.
- **general\_offer**: La generación total del sistema.
- **general\_deficit**: El déficit total del sistema.
- **circuits\_importance**: El coeficiente de importancia de cada circuito.
- **importance\_per\_block\_in\_circuits**: El coeficiente de importancia de cada bloque.
- **opinion\_per\_block\_in\_circuits**: El estado de opinión de los ciudadanos de cada bloque.
- **opinion\_per\_circuit**: El estado de opinión de los ciudadanos de cada bloque.
- **industrialization\_per\_circuit**: El coeficiente de industrialización de cada circuito.
- **last\_days\_off\_per\_block\_in\_circuits**: El número de días con corte de electricidad por cada bloque.
- **longest\_sequence\_off\_per\_block\_in\_circuits**: El número de días consecutivos con cortes de electricidad por cada bloque.
- **working\_thermoelectrics\_amount**: El número de termoelectricas que se encuentran funcionando.
- **thermoelectric\_state**: El estado operacional de cada termoelectrica.
- **general\_opinion**: El estado de opinión general de los ciudadanos del sistema.

- **all\_desires:** El conjunto de todos los posibles deseos.
- **current\_desires:** El conjunto de deseos actualmente activos.

### Desires

- **meet\_demand:** Satisfacer la demanda en situaciones de déficit de generación
- **prioritize\_block\_importance:** Priorizar el abastecimiento a los bloques más importantes
- **prioritize\_block\_opinion:** Priorizar el abastecimiento a los bloques con peor opinión ciudadana
- **prioritize\_consecutive\_days\_off:** Priorizar el abastecimiento a los bloques con más días consecutivos sin energía
- **prioritize\_days\_off:** Priorizar el abastecimiento a los bloques que han tenido más cortes de electricidad
- **max\_stored\_energy:** Maximizar la energía almacenada en caso de estar sobrecubierta la demanda

### Intentions

- **meet\_demand:** Intención de satisfacer la demanda incrementando la capacidad actual.
- **prioritize\_block\_importance:** Intención de priorizar bloques con mayor importancia.
- **prioritize\_block\_opinion:** Intención de priorizar bloques basándose en las opiniones de sus ciudadanos.
- **prioritize\_consecutive\_days\_off:** Intención de priorizar los bloques con más días consecutivos con cortes de electricidad.
- **prioritize\_days\_off:** Intención de priorizar los bloques con más días con cortes de electricidad.
- **max\_stored\_energy:** Intención de maximizar la energía almacenada en el sistema.

Este agente tiene la peculiaridad de poseer dinamismo en cuanto a la elección de sus opciones para generar los *desires*. Ello se logra mediante la comunicación con un **LLM**, al que se le proporciona una instrucción inicial con una lista de los posibles *desires* y ciertas condiciones y su tarea es proporcionar la lista de condiciones seleccionadas y la lista de *desires* que considera que deberían ser activados bajo esas condiciones. De esta forma se logra generar *desires* de una forma más dinámica y flexible. En próximas secciones se abordará más sobre el **LLM**.

## 4 ALGORITMO GENÉTICO

Para que el agente **Jefe de la Empresa Eléctrica** sea capaz de resolver el problema de búsqueda de decidir una buena planificación de la distribución de electricidad se decidió implementar un **Algoritmo Genético**. Para ellos se siguieron los siguientes pasos: **inicialización, evaluación, selección, cruce (*crossover*), mutación, y repetición a través de generaciones.**

### Inicialización

El algoritmo empieza creando una población inicial de soluciones aleatorias (cromosomas), cada una de ellas representando una posible asignación de termoelectricas a bloques. El tamaño de la población es definido por el parámetro **pop\_size**. En nuestra población cada cromosoma es una matriz (lista de listas), donde cada fila representa un bloque, cada columna el momento del día (24 horas en total) y la casilla significa la termoelectrica que provee energía al bloque de la fila en la hora de la columna.

### Evaluación

Cada cromosoma es evaluado usando una función de aptitud (*fitness function*), que mide cuán buena es la asignación, teniendo en cuenta las intenciones del **Jefe de la Empresa Eléctrica**.

Esta función no es más que la suma ponderada de los coeficientes que se calculan para cuantificar la calidad de la asignación de termoelectricas a bloques atendiendo a los criterios de las intenciones del agente. La ponderación se utiliza para establecer una prioridad del criterio de la intención que se va a ejecutar por encima de los demás criterios.

### Selección

Después de evaluar a la población, se seleccionan los mejores cromosomas (las soluciones más aptas) para servir de modelos de la siguiente generación.

### Cruce

Se combina la información genética de los cromosomas seleccionados (padres) para crear nuevos cromosomas (hijos). Este paso introduce diversidad en la población y permite que las características de ambos padres se transmitan a los hijos. La selección de las parejas a combinar se realiza de forma aleatoria.

### Mutación

Después del cruce, se introduce una probabilidad de mutación en los cromosomas para mantener la diversidad genética y evitar la convergencia prematura. Un cromosoma puede experimentar una pequeña alteración (como reasignar una termoelectrica a un bloque diferente). La tasa de mutación controla la frecuencia con la que ocurre este proceso.

## Repetición a través de generaciones

El algoritmo continúa repitiendo los pasos de evaluación, selección, cruce y mutación por un número definido de generaciones. En cada generación se crea una nueva población que reemplaza a la anterior, con la esperanza de que las soluciones mejoren con el tiempo. El algoritmo compara los cromosomas generados con el mejor cromosoma encontrado hasta el momento y lo actualiza si encuentra uno con mejor aptitud. Al finalizar el número de generaciones, el algoritmo devuelve el mejor cromosoma encontrado y su valor de aptitud

## 5 LÓGICA DIFUSA

Para evaluar el nivel de satisfacción personal de los ciudadanos de un bloque y con ello generar el estado de opinión, se utiliza un sistema de **Lógica Difusa**. Este se encarga de procesar entradas imprecisas o subjetivas y generar una salida que representa la satisfacción personal. Los factores que influyen en la satisfacción personal del ciudadano son los siguientes:

- **last\_day\_off**: Representa el tiempo transcurrido desde el último día sin electricidad.
- **days\_off\_relation**: Relación entre los días con y sin servicio eléctrico.
- **industrialization**: Refleja el nivel de industrialización del circuito en el que viven los ciudadanos, lo que influye en la necesidad de la energía eléctrica en la prestación de servicios.
- **general\_satisfaction**: Representa la satisfacción general, lo que puede afectar la satisfacción personal.

Estas variables se definen de forma difusa en categorías como: reciente, moderado, distante, bajo, medio y alto. Luego se establecen las reglas difusas que determinan cómo la combinación de factores de la entrada afectan la satisfacción personal. Por ejemplo una regla podría ser que si el último día sin corriente fue reciente, la relación de días sin servicio es alta, entonces la satisfacción personal será baja. Después de definir las reglas, se crea un sistema de control difuso que se utiliza para realizar simulaciones. Se proporcionan los valores de entrada al sistema de simulación, que representan las percepciones actuales del ciudadano. Después de proporcionar las entradas y aplicar las reglas, el sistema calcula el nivel de satisfacción personal. La el atributo **opinion** de la clase **Citizen** almacena el resultado final, que representa el nivel de satisfacción personal del ciudadano basado en las percepciones difusas y las reglas.

## 6 MODELO EXTENSO DE LENGUAJE

Para agregar dinamismo al comportamiento del agente **Jefe de la Empresa Eléctrica** se decidió utilizar un **Modelo Extenso de Lenguaje** (LLM). Ello se logra

proporcionando una instrucción al sistema con las especificaciones de lo que se quiere obtener, aclarando el formato de la entrada y de la salida. En dicha instrucción se refleja el conjunto total de deseos del agente, para que al ser proporcionada una lista de condiciones basadas en las percepciones, el modelo decida qué deseos deberían ser activados por algún subconjunto de dichas condiciones y de esa forma se genere una nueva regla. Las consultas al modelo se realizarán en algunos momentos de la simulación.

Se utilizó la API de **Gemini** de Google, específicamente el modelo **gemini-1.5-flash**.

## 7 EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Para comenzar se importan los parámetros globales y se genera el mapa. Esto nos brinda una disposición geográfica de todos los elementos de la simulación, pudiendo calcular a través de ella los costos de abastecimiento de energía desde cada termoelectrica hasta cada circuito. Como cada objeto está conectado al sistema eléctrico principal, es posible llevar la energía de cualquier termoelectrica a cualquier circuito. El resultado se vería como en la figura 1.

Por cada circuito se genera una cantidad de bloques, que a su vez generan una cantidad de ciudadanos, de lo que depende el consumo energético que tendrá cada uno. En la figura 2 se observa un ejemplo de la cantidad de ciudadanos por circuito. Además se genera para cada circuito un nivel de industrialización que también será el de los bloques contenidos en él. Con el dato de la cantidad de ciudadanos y el nivel de industrialización se calcula un coeficiente de importancia. En la figura ?? podemos ver un ejemplo.

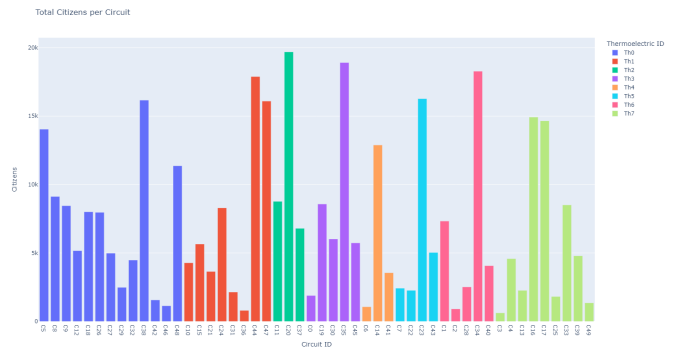


Figure 2: Ejemplo de distribución de ciudadanos por circuito.

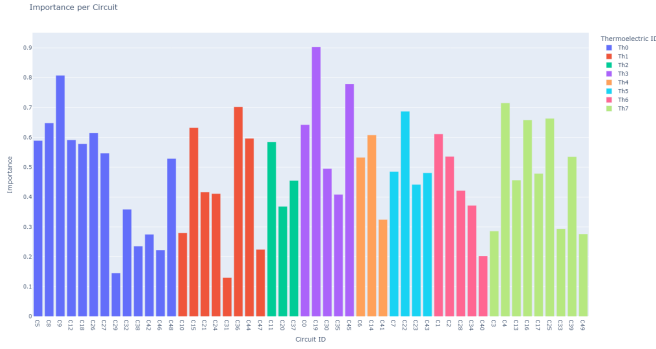


Figure 3: Ejemplo de distribución de importancia por circuito.



Figure 4: Ejemplo de predicción de consumo por hora de los bloques de un circuito.

## 7.1 PREDICCIÓN DE CONSUMO POR CIRCUITO E INICIALIZACIÓN DE LA GENERACIÓN POR TERMOELÉCTRICA

El cálculo del consumo de cada circuito y la generación de cada termoelectrica se realiza de la siguiente forma:

### Consumo de los Bloques

Para cada bloque, se calcula y almacena una predicción de su consumo diario. Esto se logra generando varias *Gaussian Mixtures*, cada una proporcionando una distribución de consumo por hora en un día. A partir de estas distribuciones, se construye una estimación máxima tomando el consumo máximo predicho para cada hora. Este resultado constituye la predicción del consumo para cada bloque, sobre la cual los agentes basarán sus decisiones. El consumo real del bloque se calcula diariamente durante la simulación mediante la generación de una *Gaussian Mixture*.

### Consumo de los Circuitos

Una vez generada la predicción del consumo por bloque, la predicción del consumo de un circuito se calcula como la suma de las predicciones de sus bloques. En la figura 4 se muestra un ejemplo de predicciones de consumo para unos bloques y en la figura 5 la predicción resultante para el circuito correspondiente. Luego en la figura 6 se muestra un ejemplo de distribución de consumo diario predicho por cada circuito.

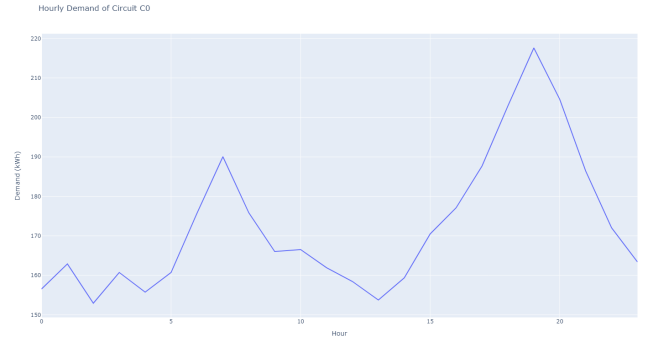


Figure 5: Ejemplo de predicción de consumo por hora del circuito correspondiente.

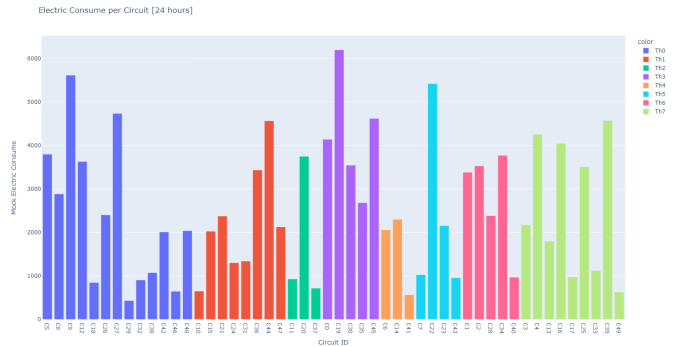


Figure 6: Ejemplo de distribución de las predicciones de consumos diarios por circuitos.

### Asignación de Circuitos a Termoelectricas

Para cada circuito, se determina cuál es su termoelectrica más cercana en el sistema para de esta forma confeccionar una estructura donde se tenga para cada termoelectrica cuáles son los circuitos que en teoría dependen de ella. Quedaría algo como lo que se muestra en la figura 7



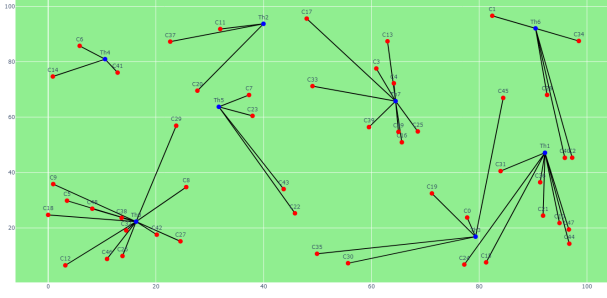


Figure 7: Ejemplo de asignación de circuitos a termoelectricas para calcular la generación de cada termoelectrica.

### Generación de Termoelectricas

Luego se establece la generación de una termoelectrica como la suma de los consumos predichos de los circuitos más cercanos, teniendo en cuenta el costo de las distancias y con un excedente de 1000kWh. Esto se realiza de esta forma siguiendo la premisa de que el sistema debe estar construido de forma tal que al presentar condiciones óptimas sea capaz de abastecer a todos los circuitos. En la figura 8 se muestra un ejemplo.

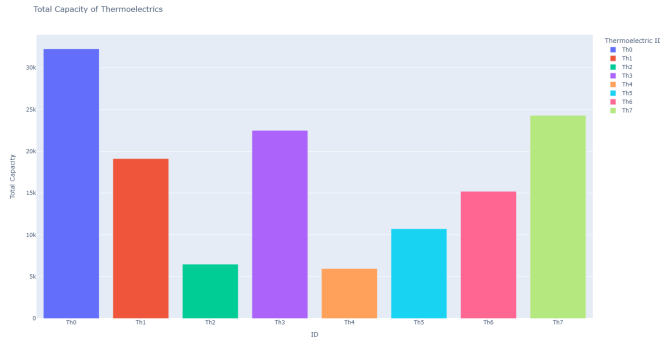


Figure 8: Ejemplo de distribución de la generación diaria por termoelectrica.

## 7.2 SIMULACIÓN

Para manejar los parámetros globales, actualizarlos, etc, existe una clase llamada **WorldState**. Por cada termoelectrica se creará un agente con arquitectura BDI representado por la clase **ThermoelectricAgent** que es el que se encargará de decidir el régimen de reparaciones y mantenimientos en la termoelectrica que se le asigne. Para actualizar sus *Beliefs* se nutrirá de la información recopilada en un objeto de tipo **ThermoelectricAgentPerception** que se actualizará en cada *step* de la simulación. También se creará un único agente Jefe de la Empresa Eléctrica, representado por la clase **ChiefElectricCompanyAgent** cuya percepción se almacena en un objeto de tipo **ChiefElectricCompanyAgent-**

**Perception** que también se actualizará en cada *step* de la simulación. Antes de iniciar se declararán las reglas que determinarán la actualización de los deseos de cada agente. Una vez hecho esto comenzará la simulación.

En cada *step* (cada día en este caso) se hará lo siguiente:

### Acción de Agentes de Termoelectrica:

Primero se crea una permutación de los agentes para variar el orden de su ejecución por cada día. Esto es necesario pues la acción de uno de estos agentes depende del estado del sistema en el momento en el que se ejecuta, y este puede ser variado por la acción de los agente que se ejecutaron previamente. Luego, por cada agente se crea su percepción y se ejecuta su método **action()**, que es el que ejecuta el *pipeline* del agente. Ahí se llama al método **brf()** o *Belief Revision Function* que actualiza los *Beliefs* basándose en la percepción actual. Después se llama al método **generate\_desires()** que ordena y evalúa las reglas definidas para el agente en dependencia de su peso. El resultado es una lista de *Desires* que se activan y que luego determinan la *Intention* que va a ser ejecutada mediante el método **filter\_intentions()**. Finalmente con el método **execute()** se garantiza la aplicación de la *Intention* seleccionada. La acción que realiza el agente se registra en un objeto de tipo **ThermoelectricAgentAction** y se guarda en el historial de acciones. Inmediatamente se actualiza, tanto en la termoelectrica como en el **WorldState**, la capacidad de generación de la termoelectrica a la que pertenece el agente y que puede haber cambiado por la acción ejecutada.

Una vez terminado el ciclo de ejecución de los Agentes de Termoelectrica, se procede con el Agente Jefe de la Empresa Eléctrica de manera similar. Este agente tiene la particularidad de ser el encargado de decidir la distribución energética óptima para las condiciones actuales a las que se enfrenta y que recibe de su percepción. Para ello utiliza un **Algoritmo Genético**, cuya función objetivo se determina por las *Intentions* que se ejecuten. Es decir, cada *Intention* de este agente representa priorizar un aspecto diferente en la repartición. Todos los aspectos de las *Intentions* filtradas tendrán mayor peso que las demás a la hora de encontrar la distribución óptima. Además el Jefe de la Empresa Eléctrica destaca por su dinamismo a la hora de generar sus *Desires*, efecto que se logra mediante la comunicación con un **LLM** en algunos momentos de la simulación. La comunicación consiste en brindarle una lista de posibles *Desires* y una lista de condiciones y que el Modelo de Lenguaje devuelva la lista del subconjunto de *Desires* que entiende que deberían ser activados por algún subconjunto de las condiciones, y la las condiciones que los activan. De esta manera el agente aprende nuevas reglas que dependen del estado actual de la simulación. Las acciones realizadas también se guardan, ahora en un objeto de tipo **ChiefElectric-**



## CompanyAction.

Luego de todo lo anterior y para finalizar la simulación de un día, se actualizan los estados de los circuitos, las termoeléctricas y el **WorldState**. Durante la actualización de los circuitos también se actualizan los bloques, donde, entre otras cosas, cada 30 días se actualiza el estado de opinión de los ciudadanos. En esta parte es donde se utiliza la **Lógica Difusa**, que mediante un conjunto de reglas establece las condiciones con las que cambia la opinión. La opinión general de los ciudadanos cada circuito depende directamente de las opiniones de cada bloque, y de la misma forma la opinión general de los ciudadanos del sistema depende de las de los circuitos. Diariamente se calculan los consumos reales de los bloques y circuitos, lo que se utiliza para determinar la efectividad de las decisiones tomadas teniendo en cuenta las predicciones realizadas y el estado actual.

Finalmente se pasa de día y se repite el ciclo hasta el fin de la simulación.

### 7.3 HIPÓTESIS REALIZADAS

Teniendo en cuenta que cuando un agente de una termoeléctrica planifica un mantenimiento a una pieza, lo hace basándose en la predicción que tiene del tiempo de rotura de dicha pieza y en comparación con una reparación un mantenimiento demora menos tiempo y prolonga el tiempo de vida de la pieza después de ser suministrado se plantearon las siguientes hipótesis.

#### Hipótesis sobre diferencia entre brindar o no mantenimientos en el rendimiento del sistema

- $H_0$ : Es significativa la diferencia entre las generaciones generales de energía al efectuar y no efectuar mantenimientos.
- $H_1$ : No es significativa la diferencia entre las generaciones generales de energía al efectuar y no efectuar mantenimientos.

Además dado que se estudia el rendimiento del sistema se hace pertinente analizar el comportamiento de la capacidad de las termoeléctricas, tanto de manera general como individual, lo que conduce a las siguientes hipótesis:

#### Hipótesis sobre la capacidad general de las termoeléctricas

- $H_0$ : La capacidad general media del sistema cambia significativamente a lo largo del tiempo.
- $H_1$ : La capacidad general media del sistema no cambia significativamente a lo largo del tiempo.

#### Hipótesis sobre la capacidad individual de las termoeléctricas

- $H_0$ : La capacidad media de cada termoeléctrica cambia significativamente a lo largo del tiempo.
- $H_1$ : La capacidad media de cada termoeléctrica no cambia significativamente a lo largo del tiempo.

También es imprescindible cuestionarse el comportamiento del algoritmo genético. En particular se quiso analizar la relación de la variación de la tasa de mutación con la eficiencia del algoritmo y por tanto de la distribución de electricidad generada.

#### Hipótesis sobre la tasa de mutación

- $H_0$ : La tasa de mutación no tiene un efecto significativo en la eficiencia del algoritmo genético.
- $H_1$ : La tasa de mutación tiene un efecto significativo en la eficiencia del algoritmo genético.

## 8 RESULTADOS Y ESTADÍSTICAS

Las simulaciones que comenzaron en escenarios positivos mostraron buenos rendimientos y mantuvieron el sistema en un buen estado general. En la figura 9 se muestra el comportamiento de algunas estadísticas del sistema. En la figura 10 se puede ver la distribución obtenida de la cantidad de termoeléctricas funcionando por día.

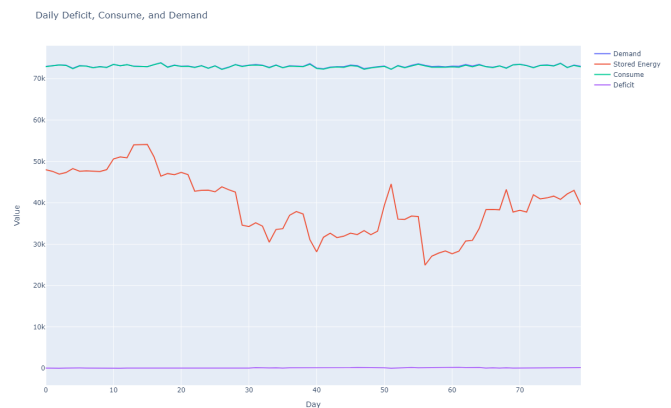


Figure 9: Déficit diario, consumo, demanda y energía almacenada durante la simulación de un escenario positivo.

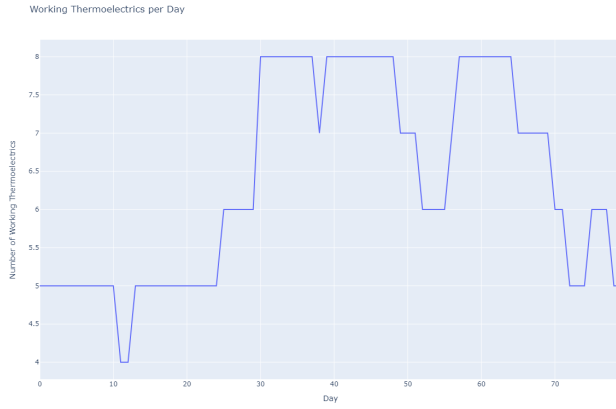


Figure 10: Cantidad de termoelectricas en funcionamiento por día.

### 8.1 TEST DE HIPÓTESIS

#### Hipótesis sobre diferencia entre brindar o no mantenimientos en el rendimiento del sistema

Se realizaron 2 simulaciones, una con mantenimientos y otra sin los mismos, cada una de 80 días de duración. Para comprobar esta hipótesis se llevó a cabo un test de T-Student entre la generación general de energía en un escenario y otro. El resultado del  $p$ -value fue de  $7.86e-05$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula de que la diferencia es significativa. En la figura 11 se pueden observar los comportamientos similares de la generación general de energía para ambos casos.

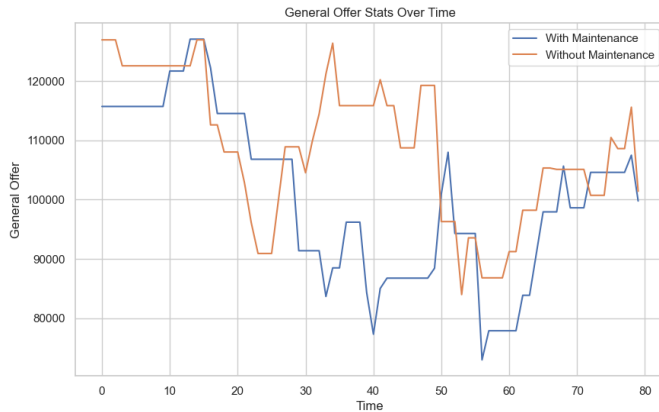


Figure 11: Generación general diaria en ambos escenarios de Mantenimiento y No Mantenimiento.

#### Hipótesis sobre la capacidad general de las termoelectricas

Se llevó a cabo una simulación de 80 días donde desde el inicio existían piezas rotas en la mitad de las termoelectricas. Se utilizó un test T-Student, que arrojó un  $p$ -value de  $1.11e-08$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula de que la capacidad general media del sistema cambia significativamente a lo largo del tiempo. En la figura 12 se observa la generación general obtenida en el experimento.

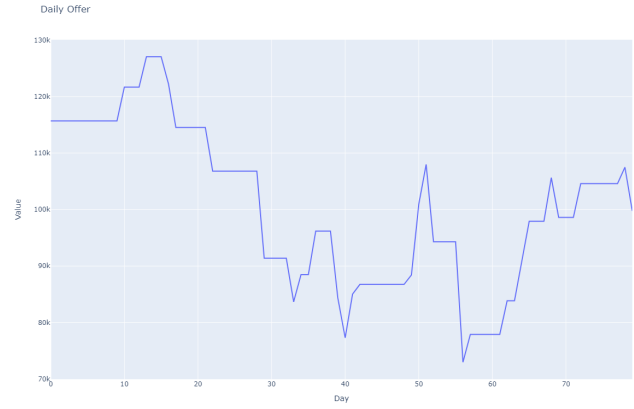


Figure 12: Generación general diaria.

#### Hipótesis sobre la capacidad individual de las termoelectricas

Sin embargo cuando se hace un análisis similar pero para cada una de las generaciones individuales de una termoelectrica se obtienen los resultados que se muestran en la tabla de la figura 13.

Thermoelectric	P-value	Null Hypothesis
Thermoelectric 0	0.9316002110593234	NOT REJECTED
Thermoelectric 1	0.14061270070625911	NOT REJECTED
Thermoelectric 2	0.4823758053377287	NOT REJECTED
Thermoelectric 3	0.09615398935179764	NOT REJECTED
Thermoelectric 4	0.9947187881070225	NOT REJECTED
Thermoelectric 5	0.997387013583485	NOT REJECTED
Thermoelectric 6	0.7611624140358144	NOT REJECTED
Thermoelectric 7	0.28012558826103523	NOT REJECTED

Figure 13: T-Student para cada generación de cada termoelectrica.

La generación diaria de una y de todas las termoelectricas se muestran en la figura 14 y 15 respectivamente. Se puede observar la variación.

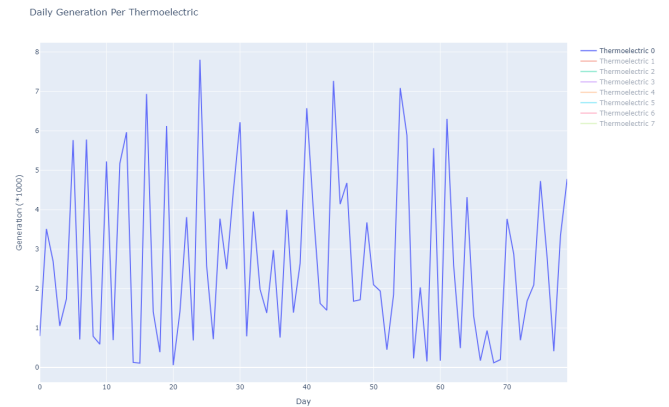


Figure 14: Generación diaria de una termoelectrica.

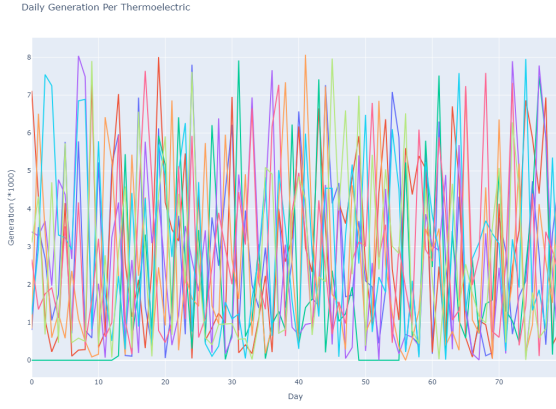


Figure 15: Generación diaria de todas las termoelectricas.

### Hipótesis sobre la tasa de mutación

Para comprobar la validez de la hipótesis se utilizó un test de ANOVA de una vía. Se procedió a comparar las evaluaciones en la función de *fitness* de los cromosomas generados por el algoritmo genético con diferentes tasas de mutación. Para ello se simularon 10 días con cada tasa y se recopilaban dichos datos. Se obtuvo un *p-value* de 0.11 por lo que se concluyó que no se puede rechazar la hipótesis nula de que no hay una diferencia significativa en los resultados obtenidos con las distintas tasas de mutación. En la figura 16 se muestra un gráfico de cajas y bigotes que ayuda a visualizar la poca variación del rendimiento para diferentes valores de la tasa de mutación.

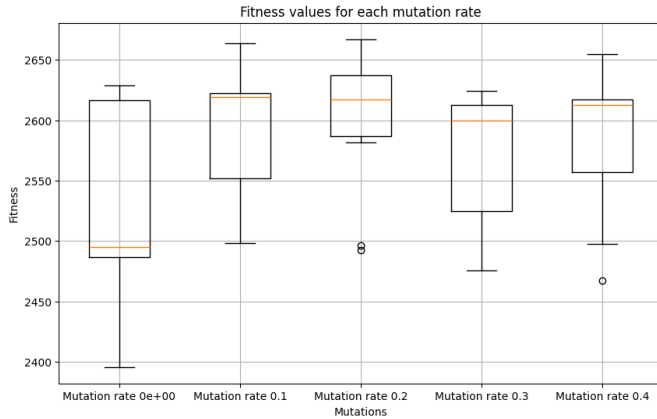


Figure 16: Gráfica de cajas y bigotes de los valores de *fitness* para cada tasa de mutación.

En la figura 17 se puede ver cómo varía el *fitness* en el tiempo para cada tasa de mutación. Es visible que comienza a tener un comportamiento variado a medida que avanza el tiempo.

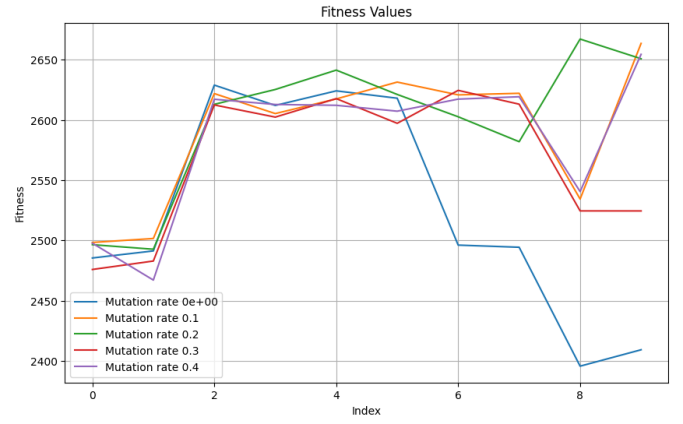


Figure 17: Gráfica de variación del *fitness* en el tiempo para cada tasa de mutación.

## 9 CONCLUSIONES

El presente proyecto demostró la viabilidad de utilizar una arquitectura de agentes BDI para la planificación y distribución eficiente de energía en un sistema eléctrico basado en plantas termoelectricas. A través de la simulación, se comprobó que el sistema puede ajustarse a diferentes escenarios geográficos y condiciones operativas, mostrando una capacidad de adaptación significativa en la toma de decisiones relacionadas con la distribución de energía, el mantenimiento preventivo de las plantas y la gestión de cortes en los circuitos.

Se validó que la implementación del algoritmo genético para optimizar la distribución energética en situaciones de déficit permitió obtener soluciones eficientes, minimizando los impactos negativos en el suministro de energía a los bloques más críticos. Asimismo, el uso de la lógica difusa proporcionó un marco adecuado para modelar la opinión ciudadana en función de la calidad del servicio eléctrico, lo que permitió priorizar la restauración del suministro en las áreas más afectadas.

En cuanto a las hipótesis planteadas, los resultados de las simulaciones confirmaron que realizar mantenimientos preventivos reporta un rendimiento general similar a no realizarlos, a pesar de reducir el tiempo de inactividad y las pérdidas de generación. Por otro lado, se observó que la variación en la tasa de mutación del algoritmo genético no produjo efectos significativos en la eficiencia del sistema, sugiriendo que el valor de este parámetro puede ser considerado menos crítico en la planificación. También se evidenció la diferencia entre el comportamiento de la generación media general que se mantiene con poca variación y los comportamientos de las generaciones medias individuales de las termoelectricas, que varían significativamente. Otro aspecto destacado fue el dinamismo logrado en la ejecución de uno de los agentes a través del uso de un LLM.

---

## 9.1 RECOMENDACIONES Y MEJORAS

Aunque el sistema mostró un comportamiento eficiente en la mayoría de los escenarios simulados, se identificaron varias áreas que podrían beneficiarse de mejoras y expansión en futuras investigaciones:

- Mejora en la predicción de fallos: Incluir modelos más avanzados para predecir fallos en las piezas de las plantas termoeléctricas, como técnicas de machine learning, podría aumentar la precisión y permitir una planificación de mantenimiento más efectiva.
- Expansión del modelo económico: El sistema actual asume un costo de transmisión basado únicamente en la distancia. Incluir factores adicionales como la variabilidad del precio de la energía o las condiciones del mercado podría generar un sistema más realista y adaptable a fluctuaciones económicas.
- Optimización multiobjetivo: El uso de un algoritmo genético multiobjetivo podría mejorar el balance entre diferentes criterios, como minimizar el costo operativo y maximizar la satisfacción de los ciudadanos.
- Mayor interacción entre agentes: Incrementar la capacidad de los agentes para negociar entre sí, tanto en términos de reparto de energía como de recursos de mantenimiento, podría generar una mayor eficiencia en el sistema a largo plazo.

## REFERENCIAS

- [1] Fundación Endesa. (s.f.). Central térmica convencional. Fundación Endesa. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional>
- [2] García Garrido, L., Martí Orosa & L., Pérez Sánchez, L. (n.d.) Temas de Simulación. [Publisher not identified]