
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

Daniel Toledo Martínez - daniel020126@gmail.com

Osvaldo R. Moreno Prieto - osvaldo020213@gmail.com

October 10, 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, Serpientes, Agente, BDI, Belief, Desire, Intention, Algoritmo Genético (GA), Lógica Difusa, Modelo Extenso de Lenguaje (LLM)

ÍNDICE

1 Introducción

1.1 Descripción del Proyecto	1
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	2
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
8 Resultados y Estadísticas	6
9 Conclusiones	6

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 Termoelectricas** situadas relativamente cercanas a un conjunto de circuitos distribuidos en un mapa 2D. Se asume que cada termoelectrica consta de 4 tipos de piezas principales: **Calderas, Turbina de Vapor, Serpientes, 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 α es el parámetro de forma y λ 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 λ 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, μ y σ son los parámetros de la distribución normal de $\ln(X)$, donde μ es la media y σ^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.

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

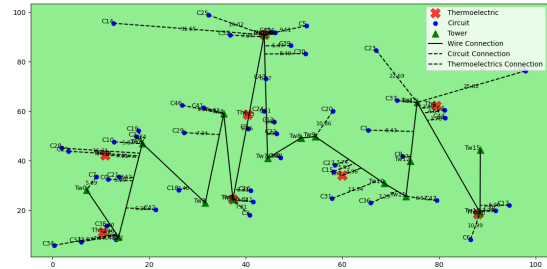


Figure 1: Ejemplo de mapa.

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 Termoeléctrica:** Existe uno en cada Termoeléctrica 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 Termoeléctrica 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

8 RESULTADOS Y ESTADÍSTICAS

9 CONCLUSIONES

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]