

Entrega 5: Estrategias de Implementación y Aceleración

IIND-4115

José Nicolás Cárdenas Trujillo

j.cardenast – 201922006

Karen Dayana Culma Ramírez

kd.culma – 201817546

Departamento de Ingeniería Industrial

Universidad de los Andes

Bogotá D.C., Colombia

2023-02

1. Implementación de Estrategias de Red y Estrategias de Aceleración y Optimización.

En la estrategia diseñada para la reconfiguración de redes de distribución de energía eléctrica (RSD), se exploraron diversos métodos. Inicialmente, se adoptaron métodos tradicionales basados en programación matemática, priorizando la optimización de la función objetivo para minimizar las pérdidas de potencia ponderadas. Adicional, se exploraron estrategias de búsqueda local y algoritmos bien establecidos como el algoritmo de Dijkstra para la determinación de rutas más cortas. Aunque tradicionalmente asociado con la búsqueda de caminos mínimos en grafos, el algoritmo de Dijkstra podría desempeñar un papel significativo en el contexto de RSD, y más aún si se implementa el grafo como un montículo binario.

El algoritmo de Dijkstra y el uso de montículos binarios representan elementos fundamentales en la resolución de problemas de flujo en redes debido a su eficiencia y capacidad para encontrar las rutas más cortas en grafos ponderados. La importancia radica en su habilidad para determinar de manera óptima el camino con el menor costo entre nodos en un grafo dirigido y ponderado.

En contextos de flujo en redes, la optimización de rutas es esencial para maximizar la eficiencia en la transferencia de información o recursos entre nodos. La utilización del algoritmo de Dijkstra en conjunto con montículos binarios permite alcanzar esta optimización en múltiples niveles:

- (1) Encontrar la ruta más corta: El algoritmo de Dijkstra es invaluable para determinar la ruta más corta entre un nodo origen y todos los demás nodos en un grafo ponderado, lo cual es fundamental en problemas de flujo de redes. Esto permite identificar la trayectoria óptima para el envío de datos o recursos, minimizando los costos asociados, ya sea en términos de tiempo, distancia, o cualquier otro factor de ponderación.
- (2) Eficiencia computacional: El uso de montículos binarios en la implementación del algoritmo de Dijkstra proporciona una eficiencia computacional notable. La capacidad de los montículos binarios para realizar operaciones de inserción, extracción del mínimo y actualización de claves en tiempo logarítmico ($O(\log n)$) resulta crucial en grafos extensos, reduciendo significativamente el tiempo requerido para encontrar las rutas óptimas.
- (3) Aplicaciones en problemas de flujo de redes: En problemas de redes, como la optimización de rutas en sistemas de telecomunicaciones, logística, transporte, distribución de recursos, entre otros, la identificación de las rutas más cortas y eficientes es esencial para mejorar el rendimiento, minimizar costos operativos y maximizar la utilización de los recursos disponibles.
- (4) Escalabilidad y flexibilidad: La eficiencia y versatilidad del algoritmo de Dijkstra con montículos binarios permiten su aplicación en una amplia gama de contextos de flujo en redes, desde redes de comunicación hasta logística y distribución de datos, demostrando su escalabilidad y adaptabilidad a diferentes entornos y problemáticas.

Por otro lado, el uso del montículo binario es vital. Esta se destaca como una estructura de datos crucial en la optimización de algoritmos, particularmente en problemas relacionados con grafos y redes, debido a su eficiencia y su capacidad para manejar eficazmente operaciones de prioridad.

- (1) Eficiencia en operaciones fundamentales: El montículo binario permite operaciones clave, como inserción, extracción del mínimo y reducción de claves, en un tiempo logarítmico ($O(\log n)$). Esta eficiencia en tiempo de ejecución es esencial en algoritmos que requieren manejo de prioridades, como Dijkstra o algoritmos basados en árboles de búsqueda, lo que los hace fundamentales en problemas de flujo en redes.
- (2) Optimización de estructuras jerárquicas: La estructura jerárquica del montículo binario, implementada típicamente como un árbol binario completo representado en forma de arreglo, permite una organización eficiente de datos. Esta organización jerárquica facilita la identificación y manipulación de

elementos según su prioridad, fundamental para encontrar las rutas más cortas o resolver problemas de flujo en redes optimizando caminos y recursos.

- (3) Aplicabilidad en algoritmos de búsqueda y optimización: Su versatilidad lo convierte en una opción esencial en la implementación de algoritmos de búsqueda como Dijkstra y en la resolución de problemas de optimización, ya que su capacidad para mantener una estructura de árbol parcialmente ordenado permite la rápida identificación y manipulación de elementos prioritarios.
- (4) Escalabilidad y flexibilidad: El montículo binario se adapta a distintos contextos y problemas, y su eficiencia se mantiene incluso en grafos o conjuntos de datos extensos. Esta escalabilidad y flexibilidad lo convierten en una elección óptima para la gestión eficiente de prioridades en diversas aplicaciones, incluidos los problemas de flujo en redes.

En el marco de la reconfiguración de redes eléctricas, la aplicación del algoritmo de Dijkstra podría facilitar la identificación de las rutas de menor resistencia eléctrica, contribuyendo así a la minimización de pérdidas y al mejoramiento de la eficiencia del sistema. La capacidad de calcular rutas óptimas entre nodos específicos podría ser crucial para la toma de decisiones informadas en el proceso de reconfiguración.

La aplicación del algoritmo de Dijkstra en conjunción con la estructura de datos del montículo binario ofrece un enfoque poderoso y eficiente para abordar el desafío de la reconfiguración de redes en sistemas de distribución eléctrica, específicamente para la reducción de pérdidas y el equilibrio de cargas.

El problema de reconfiguración de redes en sistemas de distribución eléctrica implica la optimización de la topología de la red, modificando el estado de los dispositivos reconfigurables, como interruptores, con el propósito de minimizar las pérdidas de energía y lograr un equilibrio adecuado de cargas. Esta optimización requiere determinar la configuración óptima de la red eléctrica entre múltiples configuraciones posibles, lo que se asemeja a encontrar las rutas más cortas en un grafo ponderado.

El algoritmo de Dijkstra se destaca por su capacidad para encontrar eficientemente la ruta más corta entre un nodo origen y todos los demás nodos en un grafo ponderado, lo que resulta altamente pertinente en la identificación de configuraciones de red óptimas. Su aplicabilidad se extiende a la determinación de rutas de menor resistencia eléctrica, equivalentes a caminos de menor costo en términos de pérdidas de energía en el sistema de distribución.

La eficiencia del algoritmo de Dijkstra se ve potenciada aún más al emplear un montículo binario para manejar las operaciones de prioridad, como la extracción del nodo con la menor distancia estimada. La estructura jerárquica del montículo binario permite acceder rápidamente al nodo con la menor distancia actualizada, reduciendo la complejidad computacional al encontrar las rutas más cortas y óptimas en el grafo de la red eléctrica.

Además, la capacidad de los montículos binarios para realizar operaciones fundamentales, como inserción, extracción y actualización de claves, en tiempo logarítmico garantiza una búsqueda eficiente de las configuraciones óptimas de red en términos de pérdidas de energía y equilibrio de cargas.

El uso sinérgico del algoritmo de Dijkstra y el montículo binario ofrece una metodología rigurosa y escalable para abordar el desafío complejo de la reconfiguración de redes en sistemas de distribución eléctrica. Esta combinación proporciona una herramienta poderosa para determinar configuraciones de red óptimas que minimizan las pérdidas de energía y equilibran las cargas de manera eficiente, mejorando así la eficiencia operativa y la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución.

Por otro lado, la complejidad asintótica del algoritmo de Dijkstra con el montículo binario se puede analizar de la siguiente manera:

- **Construcción del montículo:** Para n nodos, la inserción de todos los nodos en un montículo binario inicialmente vacío tiene una complejidad de $O(n \log(n))$.

- **Bucle principal:** El bucle principal se ejecuta $|V|$ veces, donde $|V|$ es el número de vértices en el grafo. Dentro de este bucle, las operaciones en el montículo binario (extracción del mínimo, reducción de claves, inserción) tienen una complejidad de $O(\log|V|)$ cada una.

Entonces, en general, la complejidad del algoritmo de Dijkstra con montículo binario para un grafo con $|V|$ vértices y $|E|$ aristas es $O((|V| + |E|) \log|V|)$.

Las operaciones en el montículo binario dominan el tiempo de ejecución, ya que se realizan repetidamente en cada iteración del algoritmo. Esto hace que el algoritmo sea altamente eficiente para encontrar las rutas más cortas en grafos grandes y esencial en la resolución de problemas de flujo en redes que requieren la determinación de rutas óptimas.

Por último, se utilizó la función `tune()` de Gurobi, que realiza una búsqueda automática de los parámetros que pueden mejorar el rendimiento del modelo. De esta forma, se encontró un parámetro óptimo para el modelo como se muestra en la ilustración1:

```
Testing candidate parameter set 8 ...

MIPFocus 2

Solving with random seed #1 ... runtime 2.30s
Solving with random seed #2 ... runtime 2.54s+

Total elapsed tuning time 72s (58s remaining)
```

Ilustración 1. Parámetro óptimo de tune()

Lo que indica que el conjunto de parámetros 8 fue el más eficiente en términos de velocidad de ejecución. Además, el parámetro MIPFocus se estableció en 2, lo que muestra que el enfoque de solución se centró en la mejora de la relajación continua y en la búsqueda de soluciones enteras. Dado que el solver no tiene problemas en encontrar soluciones de buena calidad, una vez se establece este parámetro en el modelo, se evidencia una mejora en la eficiencia computacional y en el valor objetivo del modelo.

2. Mejora de Reconfiguración Tradicional

A continuación, se presenta el modelo matemático que busca resolver el problema de reconfiguración de redes de distribución de energía eléctrica (RSD) que se trabajó en este proyecto:

$$\min \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^{sqr}$$

s. a.

$$(1) \sum_{ki \in \Omega_1} P_{ki} - \sum_{ij \in \Omega_l} \left((P_{ij} + R_{ij} I_{ij}^{sqr}) * y_{ij} \right) = P_i^D, \quad \forall i \neq S \in \Omega_b$$

$$(2) P_i^S - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij} + R_{ij} I_{ij}^{sqr}) = 0, \quad \forall i = S \in \Omega_b$$

$$(3) \sum_{ki \in \Omega_1} Q_{ki} - \sum_{ij \in \Omega_l} \left((Q_{ij} + X_{ij} I_{ij}^{sqr}) * y_{ij} \right) = Q_i^D, \quad \forall i \neq S \in \Omega_b$$

$$(4) Q_i^S - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij} + X_{ij} I_{ij}^{sqr}) = 0, \quad \forall i = S \in \Omega_b$$

$$(5) \left(V_i^{sqr} - V_j^{sqr} - 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) + Z_{ij}^2 I_{ij}^{sqr} - \Delta_{ij}^V \right) * y_{ij} = 0, \quad \forall (i, j) \in \Omega_l$$

$$(6) -b^V(1 - y_{ij}) \leq \Delta_{ij}^V \leq b^V(1 - y_{ij}), \quad \forall (i, j) \in \Omega_l$$

$$(7) V_i^{sqr} I_{ij}^{sqr} = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2, \quad \forall (i, j) \in \Omega_l$$

$$(8) \underline{V}^2 \leq V_i^{sqr} \leq \overline{V}^2, \quad \forall i \in \Omega_b$$

$$(9) 0 \leq I_{ij}^{sqr} \leq \bar{I}_{ij}^2 y_{ij}, \quad \forall (i, j) \in \Omega_l$$

$$(10) y_{ij} + y_{ji} \leq 1, \forall (i, j) \in \Omega_l$$

$$(11) \sum_{ij \in \Omega_l} y_{ij} = |N| - 1$$

$$(12) P_{ij}, Q_{ij}, I_{ij}^{sqr}, V_i^{sqr}, \Delta_{ij}^V \in \mathbb{R}, \quad \forall (i, j) \in \Omega_l$$

$$(13) y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i, j) \in \Omega_l$$

De manera específica, el objetivo es minimizar la suma ponderada de las pérdidas de potencia en los diferentes arcos, considerando resistencias y raíces cuadradas de flujos de corriente. Se busca optimizar la eficiencia del sistema eléctrico. Para ello, se tiene en cuenta las siguientes restricciones:

(1) Balance de Potencia Activa: Garantiza que la suma de flujos de potencia activa entrantes y salientes en un nodo sea igual a la demanda activa del nodo. (2) Se ajusta para la subestación considerando que es un nodo que no tiene demanda y es generador en el sistema.

(3) Balance de Potencia Reactiva: Similar al balance de potencia activa, asegura que la suma de flujos de potencia reactiva entrantes y salientes en un nodo sea igual a la demanda reactiva del nodo. (4) Se ajusta para la subestación considerando su demanda de cero y que es un nodo que no tiene arcos entrantes.

(5) Ley de Ohm para Disminución de Voltaje: Implementa la ley de Ohm para modelar la disminución de voltaje en un arco específico. Multiplica los flujos de potencia activa y reactiva por resistencias y reactancias, respectivamente.

(6) Intervalo de Discretización del Voltaje: Define el intervalo de discretización del voltaje en un arco, considerando el estado del interruptor.

(7) Magnitud del Flujo de Corriente: Calcula la magnitud del flujo de corriente en un arco mediante la ley de Ohm y las raíces cuadradas de flujos de potencia activa y reactiva.

(8) Límites de voltaje: Establece límites para el voltaje en cada nodo de la red eléctrica. Garantiza la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico al controlar los niveles de voltaje en cada punto de la red.

(9) Límites del Flujo de Corriente: Establece límites para el flujo de corriente en los arcos, considerando el estado del interruptor.

(10) Restricción para Arco con Solo un Sentido: Garantiza que cada arco tenga un solo sentido, evitando flujos bidireccionales. Se asegura de que la suma de variables binarias correspondientes a ambos sentidos del arco sea menor o igual a 1.

(11) Topología Radial: Asegura que la red tenga topología radial, garantizando un único arco entrante a cada nodo (excluyendo la subestación).

En la resolución del problema de reconfiguración de la red eléctrica mediante programación matemática, se ha diseñado un modelo que busca optimizar la eficiencia y minimizar las pérdidas de potencia. Este enfoque se sustenta en la definición de variables de decisión que representan flujos de potencia activa y reactiva, voltajes, intervalos de discretización y el estado de los interruptores en los arcos (12) y (13). Las restricciones incorporadas en el modelo reflejan con precisión las complejidades del sistema eléctrico, abordando aspectos como el balance de potencia activa y reactiva en cada nodo, la ley de Ohm para la disminución de voltaje en los arcos, y la imposición de límites en los flujos de corriente. La consideración especial para la subestación asegura la coherencia del modelo con la realidad operativa de la red.

Por su lado, la función objetivo, centrada en minimizar las pérdidas de potencia ponderadas, resalta la intención de mejorar la eficiencia del sistema eléctrico, un objetivo fundamental en la gestión de redes de distribución de energía eléctrica. En cuanto a la solución óptima, obtenida mediante el modelo matemático, proporciona una configuración de red que cumple con todas las restricciones y objetivos establecidos. La representación gráfica de esta solución revela una topología radial, coherente con la estructura deseada para una red eléctrica eficiente.

Este enfoque, basado en la programación matemática, constituye una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión y planificación de redes eléctricas, permitiendo una optimización precisa y fundamentada en principios físicos y operativos. La aplicabilidad de este modelo se extiende a situaciones diversas, adaptándose a cambios en la demanda, condiciones de carga y configuraciones de red.

3. Presentación de Repositorio Público y Documentación

Desde el inicio de nuestro proyecto, hemos establecido un repositorio dedicado a la gestión y almacenamiento de las distintas versiones del código principal. Asimismo, este repositorio ha sido el depósito para preservar los informes iniciales, tales como el documento introductorio y el análisis del estado del arte. Todos estos elementos se encuentran organizados dentro de la carpeta designada como "Entregas".

Dentro de esta estructura, se destaca el archivo identificado como "Entrega5", el cual alberga el texto plano que comprende el código ejecutable en su forma operativa. Este archivo constituye una pieza clave en la entrega actual, conteniendo la representación textual del código que ha sido ejecutado y evaluado durante este ciclo específico del proyecto.

La jerarquía y clasificación meticulosa de la información en el repositorio no solo facilita el seguimiento y la referencia histórica de las distintas versiones del código, sino que también proporciona una estructura ordenada para el almacenamiento y acceso a los documentos iniciales, cruciales para comprender la evolución y el contexto del proyecto desde sus etapas iniciales.

La designación clara y precisa de los archivos, así como su ubicación dentro de la estructura de carpetas, garantiza la integridad y disponibilidad de los recursos fundamentales para la continuidad y el desarrollo eficiente del proyecto. Esta práctica también facilita la colaboración entre los miembros del equipo al permitir un acceso organizado y uniforme a los materiales esenciales del proyecto.

El uso de un repositorio en un proyecto conlleva una importancia sustancial y aporta un valor significativo en múltiples aspectos clave. Esta plataforma centralizada y estructurada se convierte en el epicentro para la gestión, almacenamiento y seguimiento de todos los elementos vinculados al desarrollo del proyecto, desde el código fuente hasta la documentación pertinente. Uno de los principales beneficios radica en el control de versiones que ofrece el repositorio. Al mantener un historial completo de las diversas iteraciones del código y los documentos asociados, permite el seguimiento preciso de los cambios realizados, la

identificación de los responsables de cada modificación y la capacidad de regresar a versiones anteriores si fuese necesario. Asimismo, esta herramienta fomenta la colaboración eficiente entre los miembros del equipo. Al almacenar todos los activos del proyecto en un espacio central, facilita el acceso uniforme a los recursos, posibilitando la revisión, la colaboración simultánea y la integración de las contribuciones individuales de manera armonizada.

La estructura organizada del repositorio, con sus carpetas y etiquetas, simplifica la gestión de archivos al permitir una clasificación clara y una búsqueda más efectiva de elementos específicos. Esta organización mejora la eficiencia al acceder a los recursos pertinentes, reduciendo el tiempo dedicado a la localización de activos. La seguridad y respaldo también son aspectos cruciales que aporta el repositorio. Con medidas de seguridad integradas y la capacidad de realizar copias de seguridad, ofrece una protección sólida para garantizar la integridad de los datos, minimizando así el riesgo de pérdida de información. Finalmente, la integración del repositorio con herramientas de desarrollo simplifica el flujo de trabajo y permite la automatización de procesos, como la implementación y pruebas, añadiendo una capa adicional de eficiencia al proyecto en su conjunto.

El repositorio puede encontrarse en el siguiente enlace:

- <https://github.com/nicolascardenast/ProyectoFlujoEnRedes>.

4. Bibliografía

- [1] Baran, M.E., & Wu, F.F. (1989). Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. *IEEE Power Engineering Review*, 9, 101-102.
- [2] Borges, M. C. O., Franco, J. F., & Rider, M. J. (2014). Optimal Reconfiguration of Electrical Distribution Systems Using Mathematical Programming. Fecha de publicación: 28 de agosto de 2013. URL: [https://github.com/tabarespozoz/Flujo en redes 202302/blob/main/Proyecto/2-Optimal%20Reconfiguration](https://github.com/tabarespozoz/Flujo%20en%20redes%20202302/blob/main/Proyecto/2-Optimal%20Reconfiguration)
- [3] Carvajal, S. X., López, J. M., & Lemoine, C. A. (2009). Reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica usando un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas. *Tecnura*, 12(24), 14-22.
- [4] Gebru, Y., Aeggegn, D., Kefale, H., & Gizaw, K. (2021). Performance enhancement of radial distribution system using simultaneous network reconfiguration and switched capacitor bank placement. *Cogent Engineering*, 8, 1897929. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1897929>
- [5] Hernández Figueroa, J. (2013). Reconfiguración de redes eléctricas en sistemas de distribución de energía eléctrica utilizando Teoría de Grafos.
- [6] Jabr, Rabih. (2013). Polyhedral Formulations and Loop Elimination Constraints for Distribution Network Expansion Planning. *Power Systems, IEEE Transactions on*. 28. 1888-1897. 10.1109/TPWRS.2012.2230652.
- [7] Lavorato, M., Franco, J.F., Rider, M.J., & Romero, R.A. (2012). Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27, 172-180.
- [8] Mariño, W. (2022). Reconfiguración del sistema de distribución para mejora del perfil de voltaje utilizando la optimización mejorada de enjambre de partículas (Trabajo de titulación de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana de Quito)

- [9] Mirjalili, S. M., & Yang, X.-S. (2014). Binary bat algorithm. *Neural Computing and Applications*, 25(3-4), 663-681. <https://doi.org/10.1007/s00521-013-1525-5>
- [10] Mon, M.Y. (2014). Design and Calculation of 5 MVAR Shunt Capacitor Bank at 33 kV Bus in Distribution Substation.
- [11] Mantovani, J. R. S., Casari, F., & Romero, R. A. (2000). Reconfiguracao de sistemas de distribuicao radiais utilizando o criterio de queda de tensao. *Controle and Automacao*, 11(3), 150-159.
- [12] Quintero Durán, M, Candelo Becerra, J y Cabana Jiménez, K. (2019). Distribution network reconfiguration with large number of switches solved by a modified binary bat algorithm and improved seed population. *Tehnicki vjesnik*.
- [13] Salau, A.O., Gebru, Y.W., & Bitew, D. (2020). Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems. *Heliyon*, 6.
- [14] Shafik, M., Rashed, G., Chen, H., Elkadeem, M. R., & Wang, S. (2019). Reconfiguration Strategy for Active Distribution Networks with Soft Open Points. En *Proceedings of the 2019 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications* (pp. 330-334). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2019.8833865>
- [15] Tran The, T, Vo Ngoc, D., & Tran Anh, N. (2020). Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Reduction and Voltage Profile Improvement Using Chaotic Stochastic Fractal Search Algorithm. *Complexity*, 2020, 2353901. <https://doi.org/10.1155/2020/2353901>
- [16] Short, T. A. (2003). *Electric Power Distribution Handbook*. Power Publishing. 9 Flujo en Redes Universidad de los Andes
- [17] Venkatesh, B., Ranjan, R., & Gooi, H. B. (2004). Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 260-266.
- [18] Verma, E. P. (2016). Mesh Interconnection Network Definition, Advantages, Disadvantages. YuvaYana. <https://er.yuvayana.org/mesh-interconnection-network-definition-advantages-disadvantages/>
- [19] Wen-jie, G., Litao, Y., Aoyang, H., & Zhengjie, L. (2021). Optimal Dispatch Model of Active Distribution Network Based on Particle Swarm optimization Algorithm with Random Weight. 2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE), 482-485.10 Flujo en Redes Universidad de los Andes
- [20] Zheng, W., Huang, W., Hill, D. J., & Hou, Y. (2021). An Adaptive Distributionally Robust Model for Three-Phase Distribution Network Reconfiguration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(2), 1224-1237. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3030299>