

CONEXIÓN ÓPTIMA DE SUBESTACIONES DE TRACCIÓN (SETM) AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN POR TEORÍA DE GRAFOS.

Optimal connection of traction substations (SETM) to the distribution system by graph theory

RESUMEN

El presente documento determina las demandas de las subestaciones rectificadoras y las metodologías para los esquemas de conexión entre ellas y las subestaciones reductoras de AT/MT requeridas para la integración de un operador férreo al operador de red.

PALABRAS CLAVES: Contingencia, carga máxima coincidente, regulación de voltaje, SETM, AT/MT, subestación rectificadora, tranvía, grafos, UIC, SLACK.

ABSTRACT

This document defines the demands of tractions substations and methodologies for schemes of connection between them and distribution substation required the integration of a railway operator and a network operator.

KEYWORDS: Contingency, coincident peak load, voltage regulation, SETM, AT/MT, traction substation, tramway, graph, UIC, SLACK.

IVAN CAMILO DURAN

Ingeniero Eléctrico, M. Sc.
Universidad de los Andes
ic.duran91@uniandes.edu.co

MARIO ALBERTO RIOS

Ingeniero Eléctrico, Ph.D.
Profesor Asociado
Universidad de los Andes
mrios@uniandes.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La implementación de un sistema de tracción eléctrica o sistema eléctrico de transporte masivo (SETM), ha sido uno de los temas de interés a nivel nacional debido a los graves problemas de movilidad en las principales ciudades del país, además de los constantes aumentos en los precios del combustible y su mala calidad en cuanto al nivel de contaminación.

Uno de los retos más importantes para la implementación de un sistema de tracción eléctrica es la forma de conexión entre el distribuidor de energía y el usuario (SETM). Cuando se trabaja con redes de MT se emplean sistemas de distribución convencionales como son las conexiones radiales, y para ello existen en la actualidad métodos y técnicas de optimización de planeamiento por medio de algoritmos genéticos. [1], [2].

Un problema que presenta la conexión de sistemas de tracción eléctrica se debe a que estos son considerados grandes usuarios, con consumos superiores a los 10MVA y requieren de conexiones exclusivas por parte del operador de red (OR). Adicionalmente el SETM debe tener como requisito una confiabilidad que garantice la operación en cualquiera y todas las condiciones N-1 que puedan llegar a estar en el sistema mediante conexión en anillo.

El empleo de sistemas anillados para la interconexión entre los sistemas de distribución urbanos con los sistemas de tracción permite asegurar la continuidad de los servicios del operador ferroviario, dado que en dichas configuraciones se garantiza una confiabilidad en la operación en caso de tener contingencias simples (N-1)

en las redes o en las subestaciones. Contrario a los sistemas radiales comúnmente utilizados en sistemas de distribución, donde una pérdida de energía por la falla en de las redes podría llevar a una pérdida total del sistema ferroviario.

Los esquemas elaborados con anillo cerrado en MT son especialmente utilizados cuando se desea interconectar por medio de una sola subestación reductora con un solo alimentador, mientras que los esquemas con anillo abierto requiere que los extremos del anillo se cierren por medio de alimentadores a dos subestaciones reductoras de AT/MT, asegurando en ambos casos la confiabilidad.

2. CONEXIÓN DE ALTERNATIVA SELECCIONADA POR TEORÍA DE GRAFOS

La metodología propuesta e implementada para la construcción de las alternativas de conexión entre el SETM y el OR se realiza por medio de teoría de grafos. Este método es capaz de suministrar la cantidad de esquemas posibles para ser evaluados técnica mediante flujo de carga y económicamente por optimización lineal y con ello obtener la solución óptima para la implementación del sistema.

El empleo del método mencionado anteriormente requiere el cumplimiento de ciertos requisitos de confiabilidad en casos de contingencia, redundancia en las conexiones, regulación de voltaje por parte del lado DC de las subestaciones rectificadoras, entre otros. La Ref. [3] muestra los requisitos establecidos por medio de normas europeas, además de sugerencias por experiencia en proyectos ya desarrollados.

2.1. Restricciones Técnicas

Las restricciones técnicas que deben cumplir las alternativas de conexión entre el OR y el SETM son las siguientes:

- 1) Capacidad de la Fuente: toda subestación reductora (S/E) de AT/MT se simula como nodo SLACK ya que se desconoce el aporte de capacidad al sistema. Además la demanda máxima coincidente en condiciones normales (N-0) será la demanda de las subestaciones rectificadoras.

Nominal [V]	Mínima mantenida [V]	Máxima mantenida [V]	ΔV [V]
600	400	720	200
750	500	900	250
1500	1000	1800	500
3000	2000	3600	1000

Tabla 1 Regulación de voltaje DC según norma "EN 50163" [3].

- 2) Confiabilidad: se debe cumplir con confiabilidad en el lado DC de la subestación rectificadora (SEE) de la Figura 1 [4], si falla el punto B, A y C deben cubrir la falla sin sobrepasar los límites de caída de tensión en el punto Q como establece la norma europea para voltajes en DC (Tabla 1). También el mínimo número de conexiones que tengan las SEE debe ser mayor a 2 para que cumpla la restricción de confiabilidad que garantice la operación del sistema en condiciones N-1.

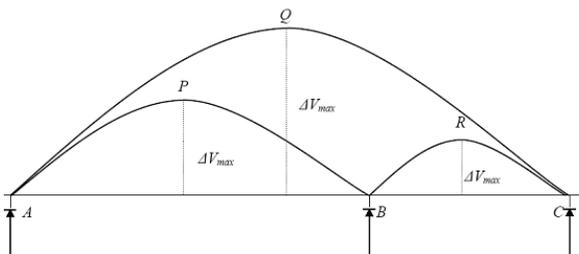


Figura 1. Confiabilidad del sistema por caídas de tensión modificada de [4].

- 3) Restricción por redundancia. El número de conexiones de las SEE no debe sobrepasar de 4 para evitar redundancia en cada nodo y así minimizar costos. También que el número de S/E de AT/MT sea menor o igual al número de SEE en el trayecto.
- 4) Restricción por vecindad. Las conexiones de los alimentadores debe limitarse a las vecindades entre subestaciones para evitar sobrecostos por grandes longitudes de conductor y aumento de pérdidas en el sistema.

2.2. Teoría de Grafos

Un grafo es un par de elementos $G = (V,E)$, donde V corresponde a un conjunto finito diferente de cero de elementos llamados vértices (nodos para el caso de los esquemas de conexión) y E es el multiconjunto de pares no ordenados de vértices, denotados a los cuales se le denominan aristas. La matriz de incidencia de G es una matriz $M(G) = m_{ij}$, donde m_{ij} representa la cantidad de veces que la arista o arco e_j se une con el vértice v_i . Si el vértice no tiene aristas incidentes, a este se le denota por 0, de lo contrario se le denota con 1 como se observa en la Figura. 2. El grado en un vértice es la cantidad de aristas incidentes en él [5].

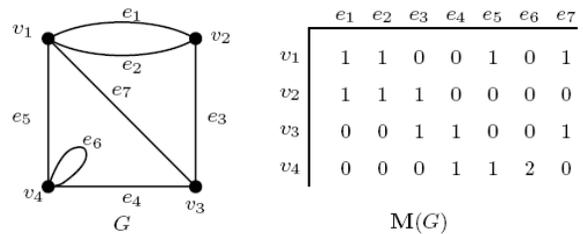


Figura. 2. Representación grafica y matricial de un grafo $G(V,E)$ [5].

Para la conexión en anillo se debe conocer los grafos regulares de grado k o k-regular, ya que cada vértice tiene grado k; es decir, un grafo es regular si todos los vértices tienen el mismo grado. La Figura 3, muestra la representación de los grafos regulares. Ésta información sobre teoría de grafos es extraída de la referencia [5].

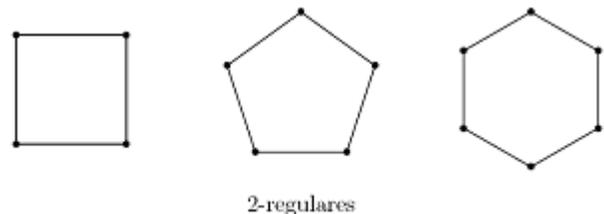


Figura 3. Representación grafica de grafos regulares modificado de [5].

2.3. Listado de alternativas de conexión

Para la construcción de los grafos se deben tener en cuenta, además de las restricciones establecidas en la sección 2.1, que no debe haber conexión o entre las S/E de AT/MT ya que se sabe que éstas S/E están anilladas por el lado de AT.

3. CALCULO ALTERNATIVA ÓPTIMA

Para la optimización del esquema de conexión, se debe considerar los costos de totales en proyectos de redes de distribución en MT.

3.1. Función de Optimización

Como el parámetro es costo, se debe minimizar por lo tanto. La función objetivo que se va a emplear es la siguiente:

$$CT = CIR + CIS + CPT \quad (1)$$

Donde CT corresponde al costo total de inversión, CIR corresponde al costo de inversión de la red de MT, CIS es el costo de inversión de las subestaciones (aumento de capacidad, alimentadores) y CP es el costo de las pérdidas de las redes en MT. Costo de inversión de la red de MT se compone de:

- Cantidad de los alimentadores que se desea instalar NF.
- Longitud de cada alimentador LF en metros.
- Costo de los conductores por unidad de longitud Cu [\$/m] (el valor debe estar en unidades constructivas).

$$CIR = Cu \left(\sum_{i=1}^{NF} LF_i \right) + LR \quad (2)$$

El costo de inversión de las subestaciones de AT/MT no incluye la construcción de una nueva instalación para el presente estudio, solamente la instalación de alimentadores nuevos, por tanto las variables para (3) son las siguientes:

- Costo constructivo de una celda CF.
- Número de celdas o alimentadores NF.

$$CIS = CF \times NF \quad (3)$$

El costo de inversión de redes y el costo de inversión de subestaciones se pueden sumar como un solo costo de inversión, tal como se observa en (4).

$$CI = CIR + CIS \quad (4)$$

Las variables de los costos totales de pérdidas de energía en la red de MT (5) son las siguientes:

$$CPT = \sum_{t=1}^Y \frac{CU \times P_{picoperdidas} \times fp}{(1 + TD)^t} \quad (5)$$

$$TD = \frac{1 + WACC}{1 + f} \quad (6)$$

- Carga de uso CU de una red de MT [\$/kWh] para nivel de MT.
- Potencia activa $P_{picoperdidas}$ [kW] que se disipa en el recorrido de la corriente por las líneas.
- Factor de perdidas fp.
- La tasa de descuento TD.

- Periodo de estudio Y en años.

TD (6) depende de la inflación promedio f y el promedio ponderado del costo de capital (WACC).

3.2. Algoritmo de Conexión y Optimización

La estructura del algoritmo se compone por tres módulos principales. El primero es un módulo de Grafos que construye todas las alternativas de conexión entre las subestaciones. El segundo módulo que se encarga de realizar los flujos de carga de las conexiones que pasen las restricciones. El tercer módulo evalúa económicamente cada alternativa. Luego esta información es almacenada para determinar cuál es la de mínimo costo.

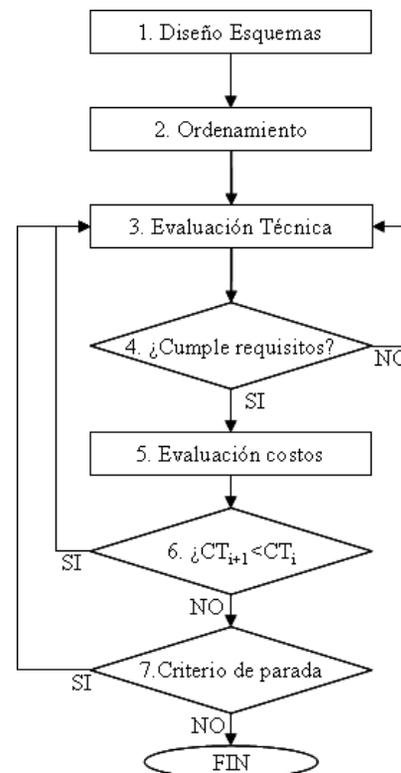


Figura. 4. Diagrama del algoritmo de conexión y optimización

El diagrama de flujos del algoritmo se muestra en la Figura. 4, y los pasos que realiza en las operaciones se describen a continuación.

1. *Diseños de esquemas conexión:* El algoritmo construye todas las alternativas de conexión por medio de grafos y descarta todas las posibilidades que no cumplan las restricciones establecidas anteriormente.
2. *Ordenamiento por costos de inversión.* Se calcula los costos de inversión de las alternativas con restricciones (4) y se organizan de forma ascendente.

3. *Evaluación técnica.* El algoritmo realiza el flujo de carga para condiciones normales (sin contingencia) y todas las condiciones N-1 (contingencia simple) de la alternativa de conexión.
4. *¿Cumple los requisitos técnicos?* Si las corrientes circulantes por los conductores y la potencia entregada por las S/E de AT/MT no sobrepasan los límites establecidos se acepta la alternativa de conexión. Si no cumple los requisitos técnicos se descarta la alternativa y pasa al siguiente grafo.
5. *Evaluar los costos asociados.* Se realiza la evaluación económica de las pérdidas y de Costo Total con (1), (5) y (6). El esquema $i = 1$ se vuelve el costo de comparación.
6. *¿ CT_{i+1} es menor a CT_i ?* Si el costo resulta ser inferior, entonces pasa a ser nuevo costo mínimo de comparación y se pasa al siguiente grafo. De ser falso entonces se descarta como alternativa optima.
7. *Criterio de Parada.* Se compara el costo total mínimo de referencia con el costo de inversión actual. Mientras el costo de inversión sea menor al costo total, el algoritmo continua evaluando técnica y económicamente los grafos almacenados hasta no darse el caso contrario.

4. CASO DE ESTUDIO

En este caso se tomará un recorrido de un sistema tranvía en un trayecto por la troncal número 1 del sistema Megabus de la ciudad de Pereira con una longitud de 10349m de recorrido, con un tiempo de ida y vuelta de 41 minutos, para una cantidad de 40 trenes en vía entre el intercambiador de Dosquebradas y el intercambiador de Cuba. Los parámetros del vehículo de la Tabla 3 son tomados de la empresa TEAM [6] y CAF [7] de España y EUSKOTRAN [8].

Nombre parámetro	Unidad	Valor
# De pasajeros x tren		244
# Ejes por vehículo		12
# De motores por vehículo		8
Peso por cada eje	kg	4000
Tiempo de despacho	s	120
Frenado regenerativo		Si
Gradiente de elevación vía		0,01
Gradiente de descenso vía		0
Peso x vehículo	kg	40100
Velocidad promedio	km/h	30

Tabla 2 Parámetros generales para el tranvía

Para el caso de estudio se tendrán en cuenta los siguientes parámetros y condiciones cuando se realice el análisis de flujo de carga y optimización de costos:

- Se utilizan 4 conductores como alternativas, estos conductores son AWG 4/0, 250MCM, 350MCM y 500MCM.

- Los costos asociados y las variables para el análisis económico se muestran en la Tabla 3. Datos obtenidos por medio de empresas consultoras en proyectos realizados en el año 2007 y por medio de la CREG [9].
- La distancia total y la velocidad promedio se determina el tiempo de recorrido de un tren (ida y regreso excluyendo paradas) por medio de (7) [10] y [11].
- Con el tiempo de recorrido se calcula el número inicial de trenes (8) que debe circular por la troncal. Éste parámetro se modifica para obtener el valor más apropiado.

Nombre variable	Valor
Costo del conductor 4/0 AWG con mano de obra [COP \$/m]	132.122
Costo del conductor 250 MCM con mano de obra [COP \$/m]	155.841
Costo del conductor 350 MCM con mano de obra [COP \$/m]	198.008
Costo del conductor 500 MCM con mano de obra [COP \$/m]	273.119
Costo unitario de la celda de MT [COP \$]	283.805.590
Cargo por uso de nivel de tensión II [COP \$/kWh]	195
WACC (%)	16.63
Inflación promedio de los años de estudio (%)	5
Periodo de estudio (años)	15
Factor de perdidas	0,54

Tabla 3 Datos de costos y valores de las variables (2007)

$$\text{Tiempo} = \frac{2 \times \text{distancia}}{\text{velocidad promedio}} \quad (7)$$

$$\# \text{trenes} = \frac{\text{Tiempo}}{\text{Frecuencia}_{\text{trenes}}} \quad (8)$$

El esquema que se debe conectar y optimizar se compone de 5 S/E de AT/MT (numeradas de 1 a 5) y 5 SEE (numeradas de 6 a 10), como se observa en Figura. 5. La carga de las SEE y la separación se muestra en la Tabla 4.

Trayecto	Carga Máxima Coincidente [kW]	Cantidad de SEE	Distancia desde la subestación anterior [m]
	N-0		
Megabus	3150	5	0
			2769
			3019
			282
			3688

Tabla 4. Parámetros Para El Flujo De Carga Del Tranvía

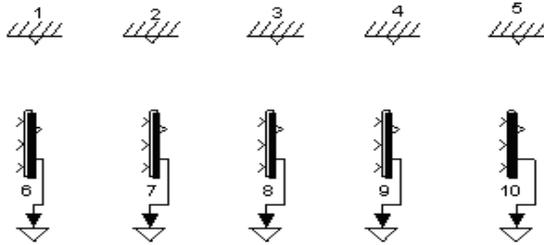


Figura 5. Diagrama de potencia inicial.

Los resultados de la simulación son los siguientes: en la Figura. 6 se observa que un total de 244 alternativas con restricciones se les evaluó el CI para los 4 conductores considerados y se ordenaron de forma ascendente.

De estas 251 alternativas, el algoritmo solo aplico el flujo de carga con PSAT y el calculó del costo total (Figura. 7) para 20 de ellas por el criterio de parada establecido anteriormente. Como resultado se tiene que el costo total asciende a COP \$4638 millones y se emplea conductor AWG 4/0, el costo de inversión es de COP \$3251 millones y el costo por pérdidas es de COP \$1387 millones.

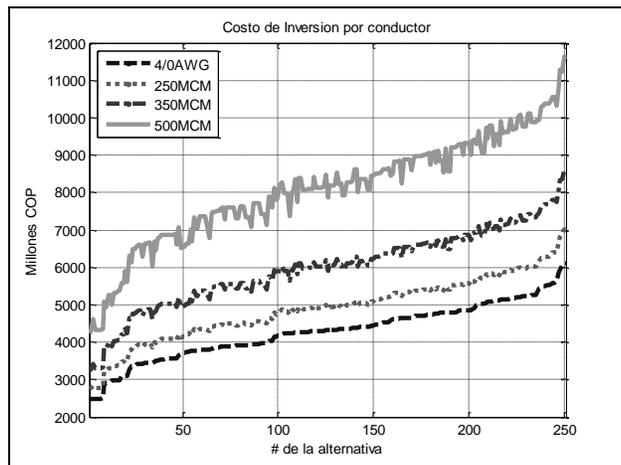


Figura 6. Costo de inversión para un sistema tranvía.

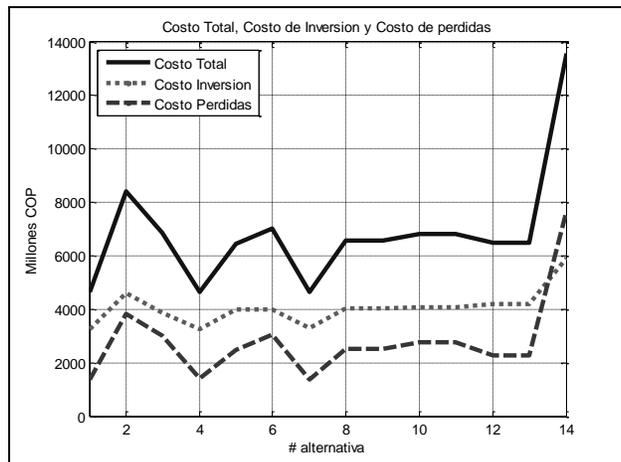


Figura 7. Costo de Total, de inversión y de pérdidas para un sistema tranvía.

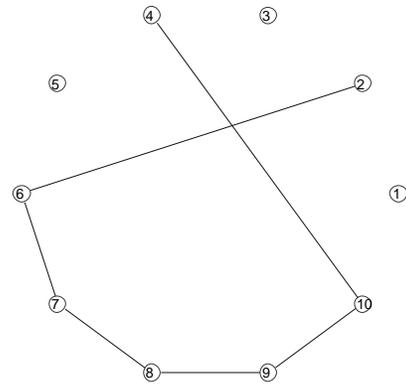


Figura 8. Grafo de conexión para un sistema tranvía.

El grafo de conexión entre las subestaciones reductoras de AT/MT aparece en la Figura. 8, donde la representación como conexión de diagrama de potencia se puede ver en la Figura. 9.

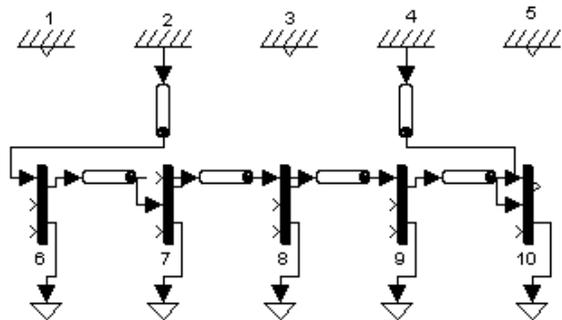


Figura 9. Interpretación del grafo como diagrama potencia de la Figura. 8.

5. CONCLUSIONES

La cantidad de configuraciones que pueden lograrse en los sistemas anillados obligan al empleo de otras herramientas como la teoría de grafos para poder determinar cuáles de estas configuraciones cumplen las restricciones impuestas por el operador de red y el operador ferroviario con el fin de tener un sistema confiable y robusto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. L. Willis, *Power Distribution Planning Reference Book*, Second Edition, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [2] A. Lillo. "Diseño de sistemas de Distribución Primaria en Media Tensión vía Algoritmos Genéticos," Memoria de Título, Universidad de Concepción, Marzo de 2008.
- [3] *Voltage Characteristics of electricity supplied for public distribution systems*, European Committee for Electrotechnical Standardization EN 50163, 2007.

- [4] Ministerio de Planeación y Cooperación de la República de Chile, “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria REDEFE, Sección 8.8.3,” Gobierno de Chile, Santiago de Chile, Abril 2003.
- [5] J. L. Chacón. “Matemática Discreta: Tema 3. Introducción a la Teoría de Grafos,” pp. 6-15, 2005. Disponible en:
<http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/jlchacon/materias/discreta/grafos.pdf>
- [6] Técnica Electrónica de Automatismo y Medida. TEAM [en línea], Disponible en: <http://www.team.es>
- [7] Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles [en línea], CAF Disponible en:
<http://www.caf.net/caste/home/index.php>
- [8] Euskotran: Eusko Trenbideak - Ferrocarriles Vascos S.A. [en línea], Disponible en:
<http://www.euskotren.es/euskotran/html/castellano/index3.html>
- [9] Comisión de Regulación en Energía y Gas, “Información de las Tarifas Aplicadas de Energía”. Disponible en:
http://www.creg.gov.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-236&p_options=
- [10] J.G. García, M.A. Ríos, y G. Ramos, “A Power Demand Simulator of Electric Transportation Systems for Distribution Utilities,” presentado en The 44th International Universities’ Power Engineering Conference, Glasgow, Escocia, 2009.
- [11] M. A. Ríos, G. García, “Modelo de cálculo de demanda de potencia eléctrica en sistemas de tracción tipo metro, tren y tranvía,” *Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes*, No. 32, pp. 7-15, Dic. 2010.