

PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DE REDES DE TRANSMISIÓN: METODOLOGÍAS, HERRAMIENTAS Y APLICACIONES

ALEJANDRO DUQUE GÓMEZ, M.Sc.



¿Quiénes somos?

Somos una empresa de servicios públicos mixta, constituida como sociedad anónima, encargada de desarrollar, administrar, operar y mantener los activos de ISA en el Sistema Interconectado Nacional.





INTERCOLOMBIA – INFORMACIÓN GENERAL



INTERCOLOMBIA



75 Sub.

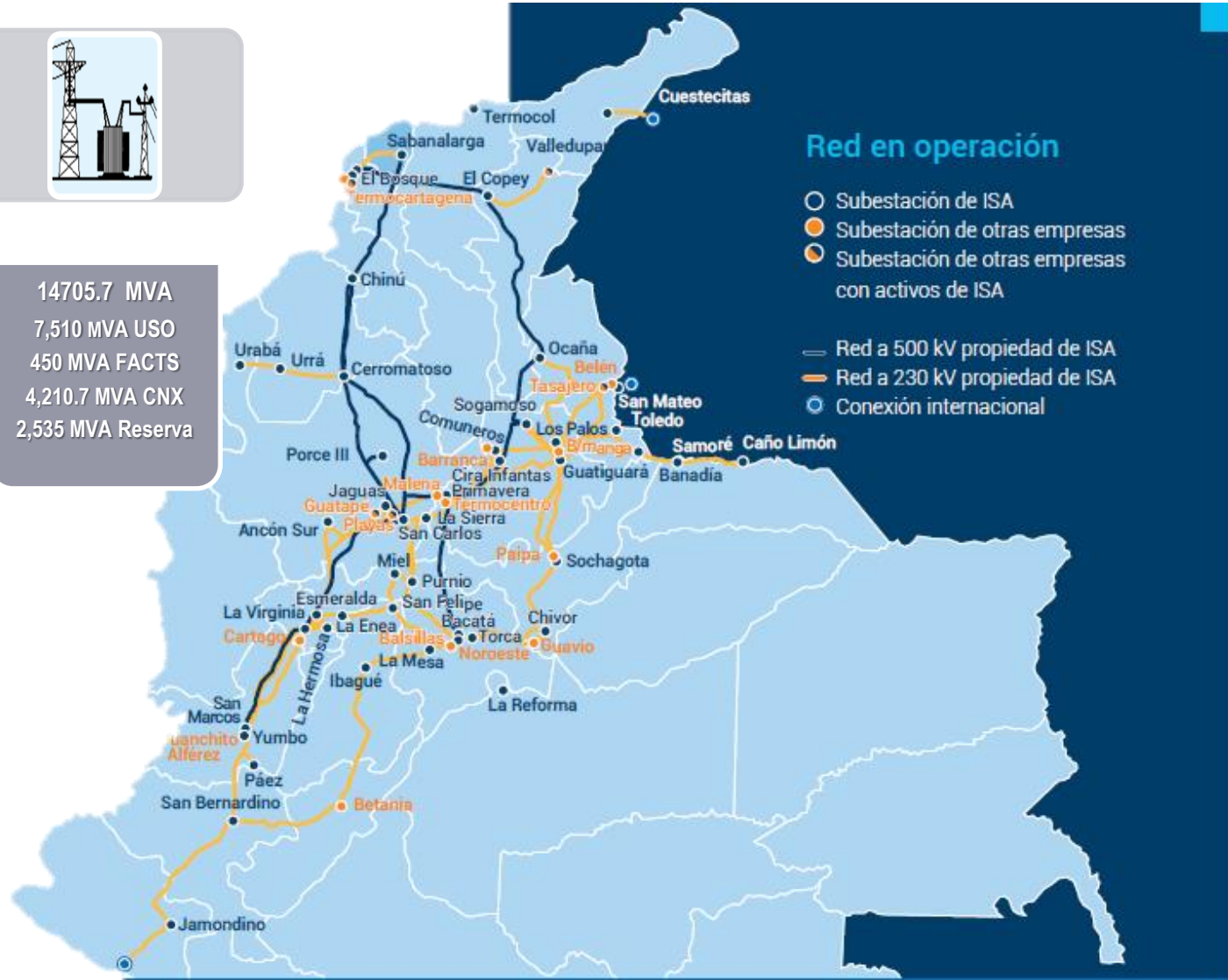
13 en 500 kV
42 en 220 o 230kV
20 < 220 kV

10309.1 km

2,489.8 km en 500 kV
7,647.43 km en 220 o 230 kV
171.93 km < 220 kV

14705.7 MVA

7,510 MVA USO
450 MVA FACTS
4,210.7 MVA CNX
2,535 MVA Reserva





INTERCOLOMBIA – INFORMACIÓN GENERAL

INTERCOLOMBIA



El mayor transportador de energía en el país y el único con cubrimiento nacional.

Representamos, administramos, operamos y mantenemos 10.309 km de circuito y activos en 75 subestaciones*

Contamos con 552 empleados altamente capacitados

Tenemos presencia en 356 municipios del país

Usamos responsablemente los recursos, en equilibrio con el medio ambiente y en el marco de una gestión sostenible.

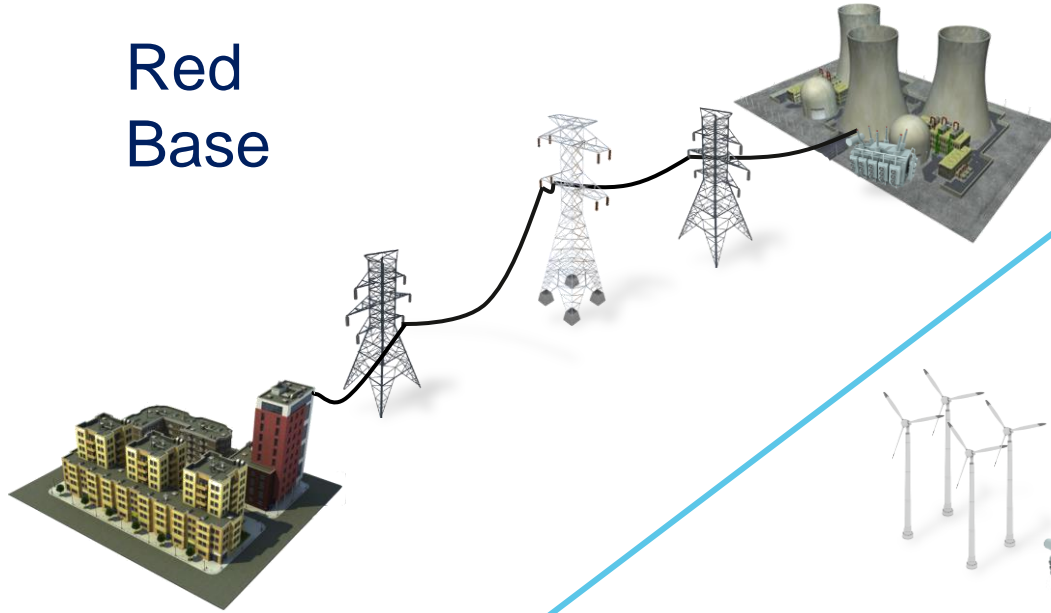
Desarrollamos proyectos de transmisión de energía con seguridad, confiabilidad y oportunidad

*87 subestaciones del Sistema Interconectado Nacional, de las cuales 75 son de propiedad de ISA.

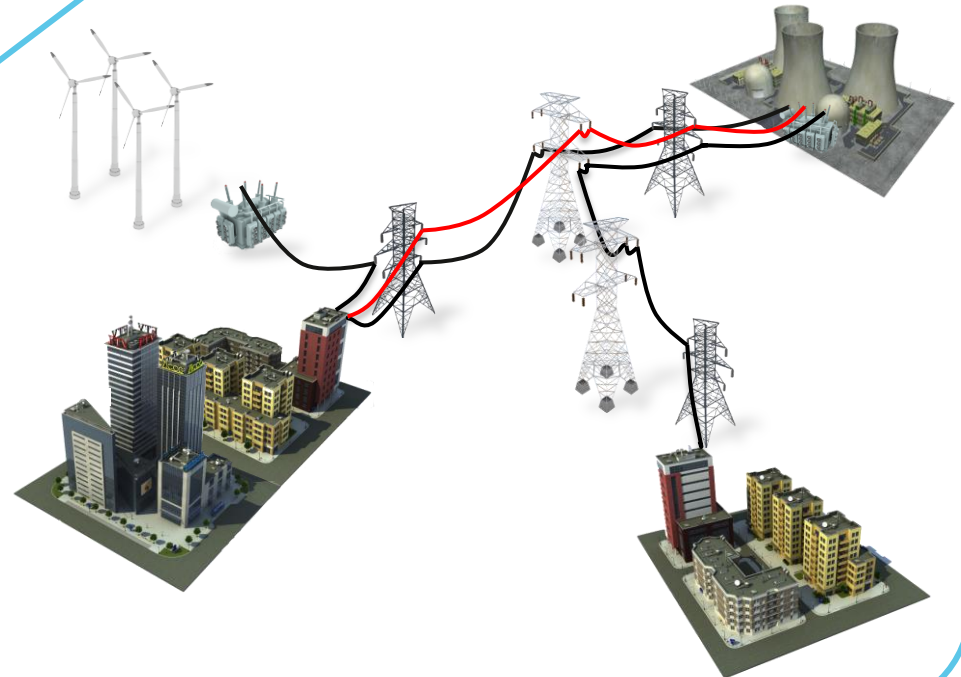
- Provee múltiples rutas para el flujo de potencia entre los centros de generación y los puntos de consumo.
- Provee rutas de transferencia económica en Sistemas Interconectados.
- Garantiza el suministro continuo de energía eléctrica a los usuarios.



Red Base



Red Futura



10 ~ 20 años



La gran importancia del sistema eléctrico en la sociedad moderna, su complejidad, los elevados costos asociados y la presencia de diferentes agentes de decisión con objetivos en conflicto (oferta y demanda) incentivan la investigación en metodologías que aporten a su mejora y aprovechamiento.



Planeamiento Centralizado

Establecido y ejecutado por el gobierno.

No se evalúan costos ni riesgos.

Sobredimensionamiento mal direccionado.

Rezagos tarifarios y altos niveles de pérdidas financieras.

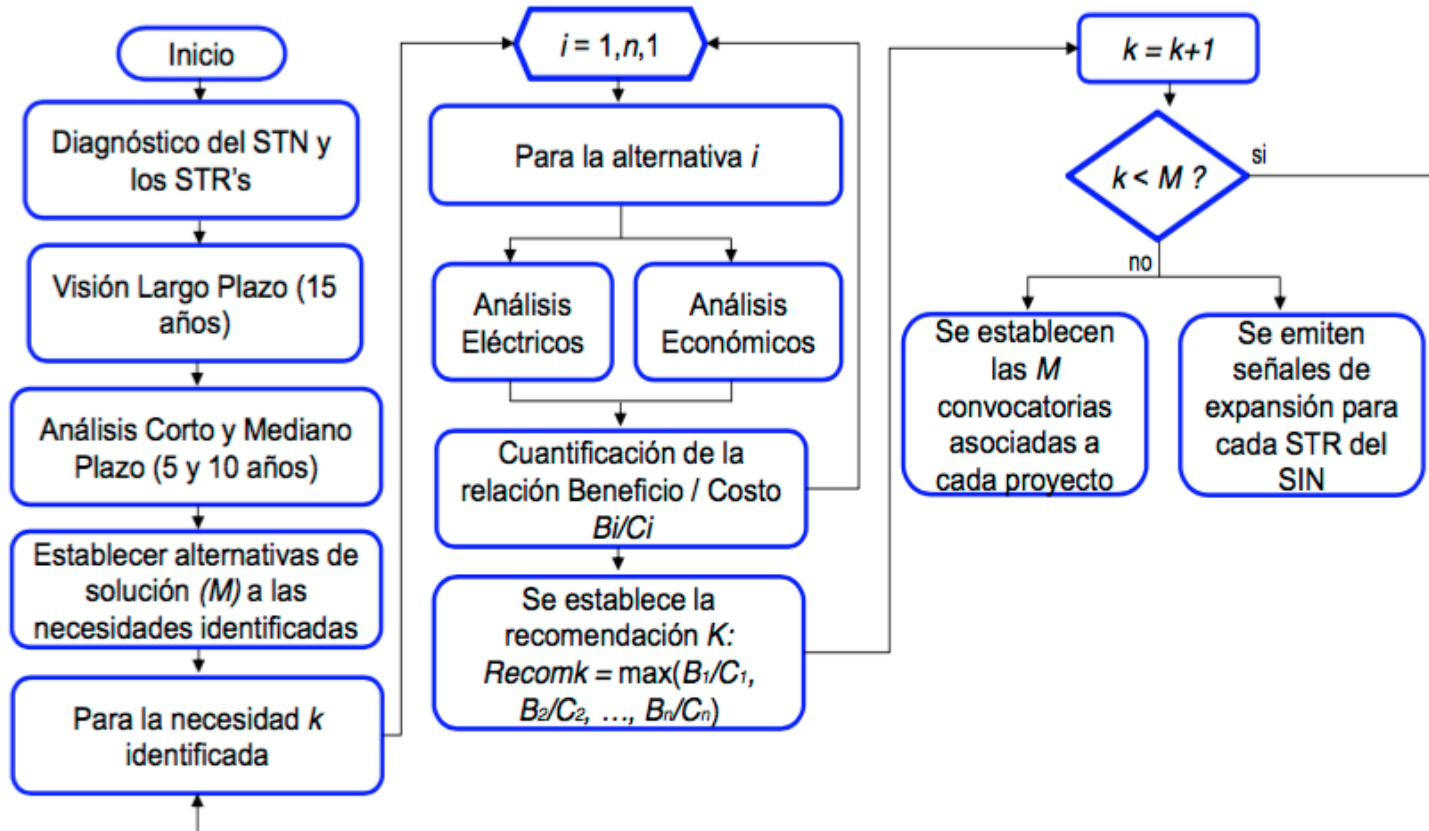
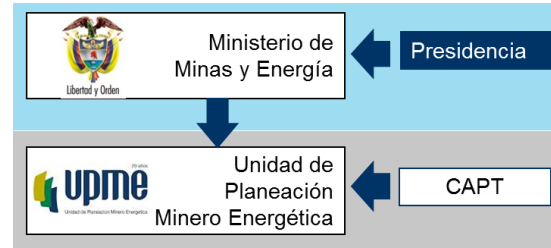
Decisiones distribuidas entre agentes.

Expansión guiada por balance entre oferta y demanda.

Se recupera la inversión.

Se evalúan costos y riesgos considerando inversiones combinadas.

Planeamiento Descentralizado



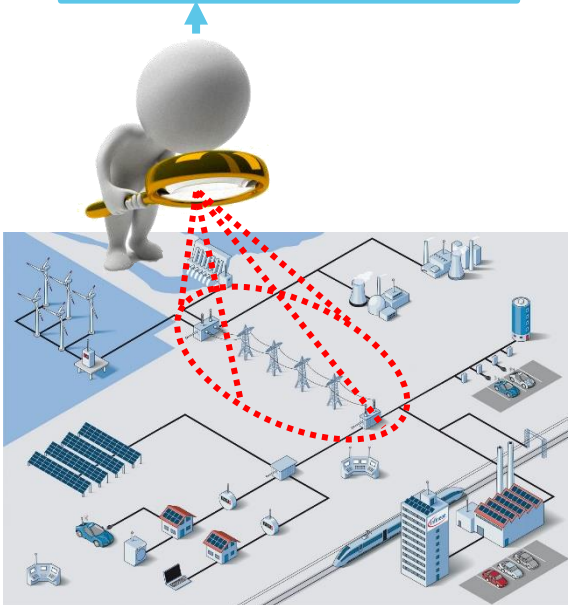
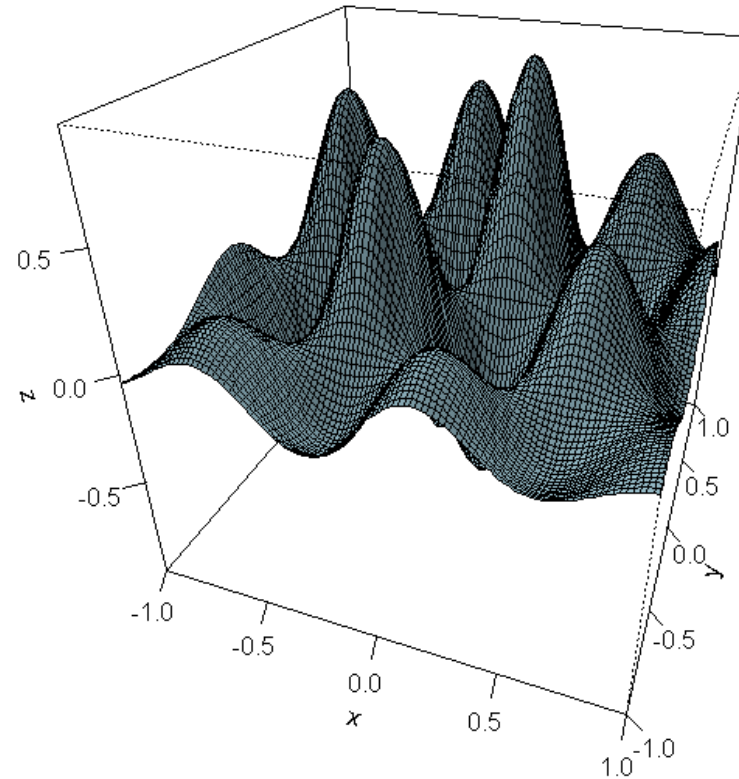


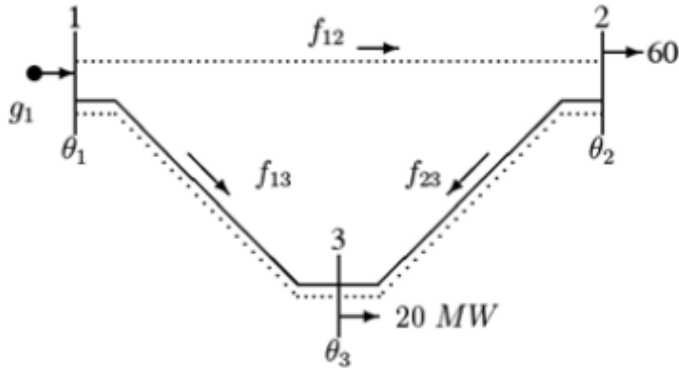
Identificación de:

- Alcance
- Parámetros
- Variables
- Interrelaciones
- Objetivo final
- Incertidumbre



Espacio de búsqueda combinatorial:





Costo de los circuitos (en US\$): $c_{12} = 3$, $c_{13} = 2$ y $c_{23} = 2$.

Susceptancias (en p.u. para una base de 100 MW): $\gamma_{12} = \frac{1}{3}$, $\gamma_{13} = \frac{1}{2}$ y $\gamma_{23} = \frac{1}{2}$.

Generación máxima y carga: $\bar{g} = 80$ MW, $d_2 = 60$ MW y $d_3 = 20$ MW.

Flujo máximo por línea: $\bar{f}_{12} = 35$ MW, $\bar{f}_{13} = 40$ MW y $\bar{f}_{23} = 40$ MW.

Número máximo de adiciones permitida por camino: $\bar{n}_{12} = \bar{n}_{13} = \bar{n}_{23} = 2$.

Red inicial (circuitos existentes): $n_{12}^o = n_{13}^o = n_{23}^o = 1$.

$$\text{mín } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij}$$

s.a.

$$S f + g = d$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^o) \bar{f}_{ij}$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}$$

$$n_{ij} \text{ entero}$$

$$f_{ij} \text{ irrestricto}$$

$$\text{mín } v = 3n_{12} + 2n_{13} + 2n_{23}$$

s.a.

$$-f_{12} - f_{13} + g_1 = 0$$

$$f_{12} - f_{23} = 0, 60$$

$$f_{13} + f_{23} = 0, 20$$

$$|f_{12}| \leq 0, 35n_{12}$$

$$|f_{13}| \leq 0, 40(1 + n_{13})$$

$$|f_{23}| \leq 0, 40n_{23}$$

$$0 \leq g_1 \leq 0, 80$$

$$n_{12}, n_{13}, n_{23} \text{ enteros}$$

$$f_{12}, f_{13}, \text{ y } f_{23} \text{ irrestrictos}$$

$$\text{mín } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij}$$

s.a.

$$S f + g = d$$

$$f_{ij} - (\gamma_{ij}^o + \gamma_{ij}^{eq})(\theta_i - \theta_j) = 0$$

$$|f_{ij}| \leq (\gamma_{ij}^{eq} + \gamma_{ij}^o) \bar{\phi}_{ij}$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}$$

n_{ij} entero

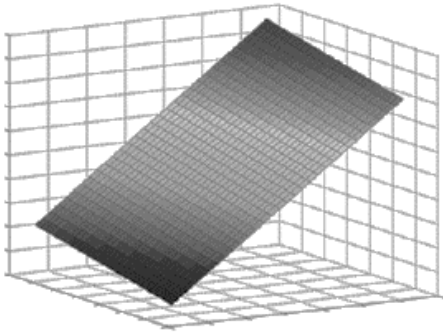
γ_{ij}^{eq} discreto

f_{ij} irrestricto

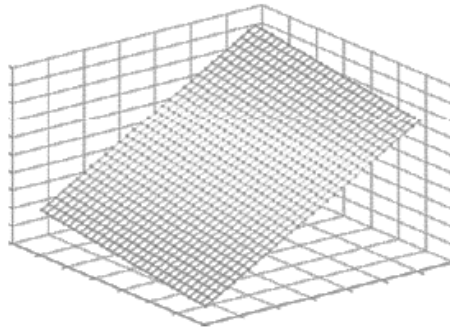
θ_j irrestricto

El flujo de potencia activa está limitado por la capacidad de los equipos de transmisión y la diferencia angular entre los nodos interconectados.

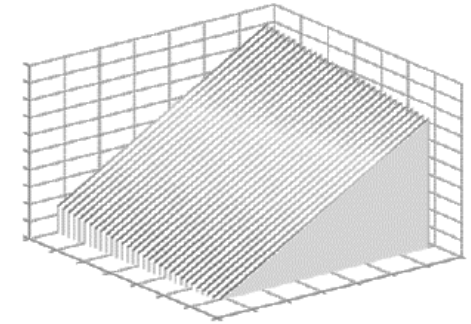
Programación Lineal
(PL)



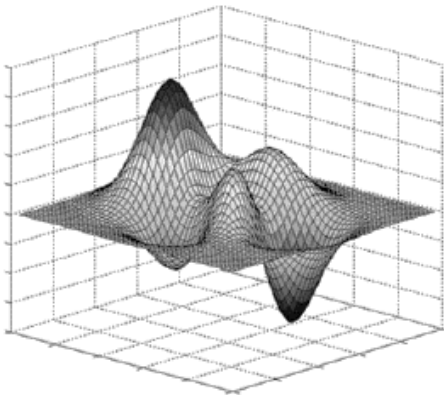
Programación Lineal
Entera (PLE)



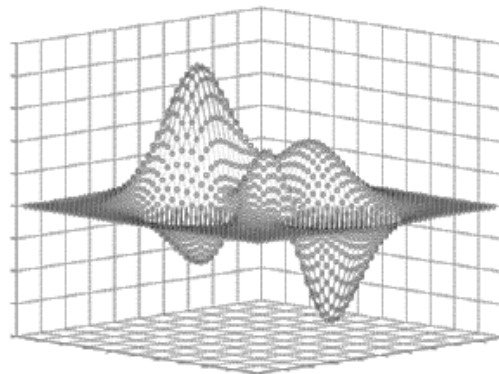
Programación Lineal
Entera Mixta (PLEM)



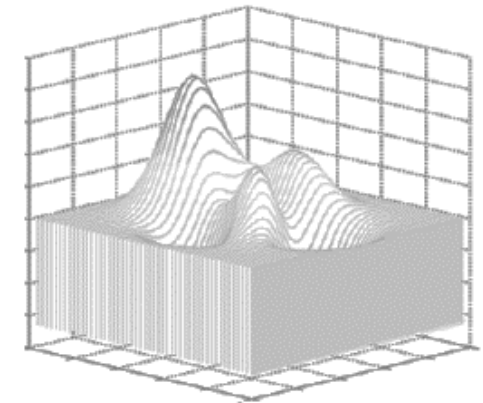
Programación No Lineal
(PNL)



Programación No Lineal
Entera (PNLE)



Programación No Lineal
Entera Mixta (PNLEM)



Optimización Exacta

- Programación Lineal
- Programación No Lineal
- Programación No Lineal Entera
- Programación No Lineal Entera Mixta
- Programación Binaria

Procesos Estocásticos

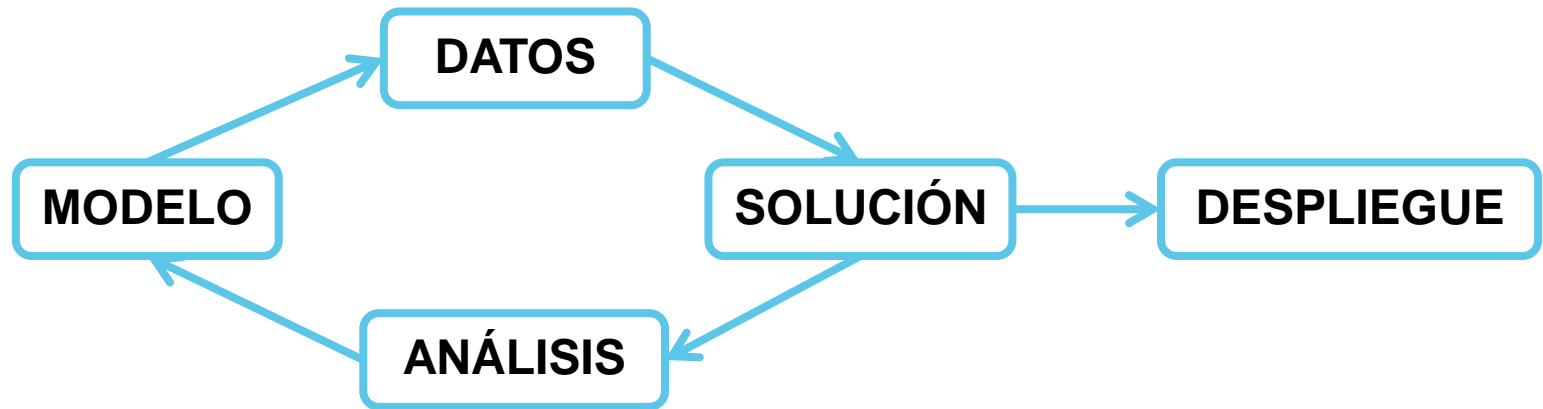
- Probabilidad
- Estadística Clásica
- Estadística Bayesiana
- Series de tiempo
- Estimación de Estado
- Econometría

Técnicas Heurísticas

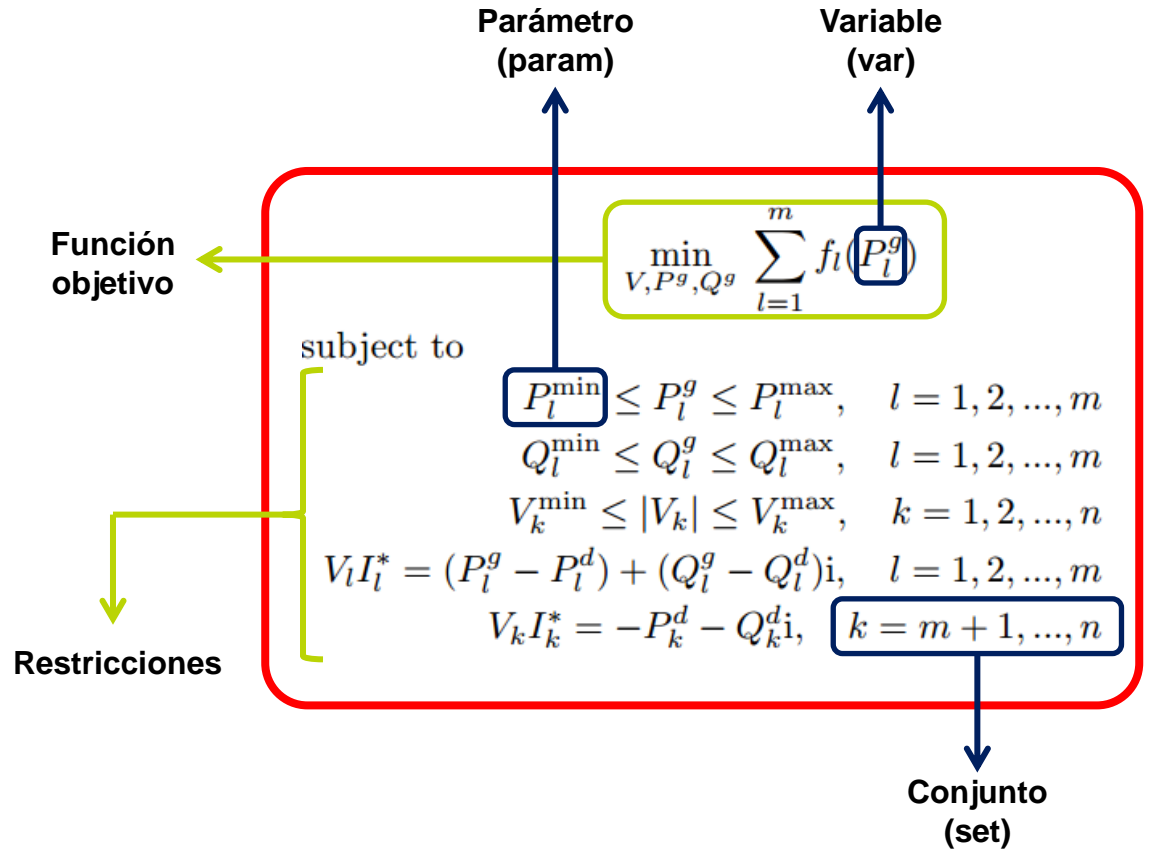
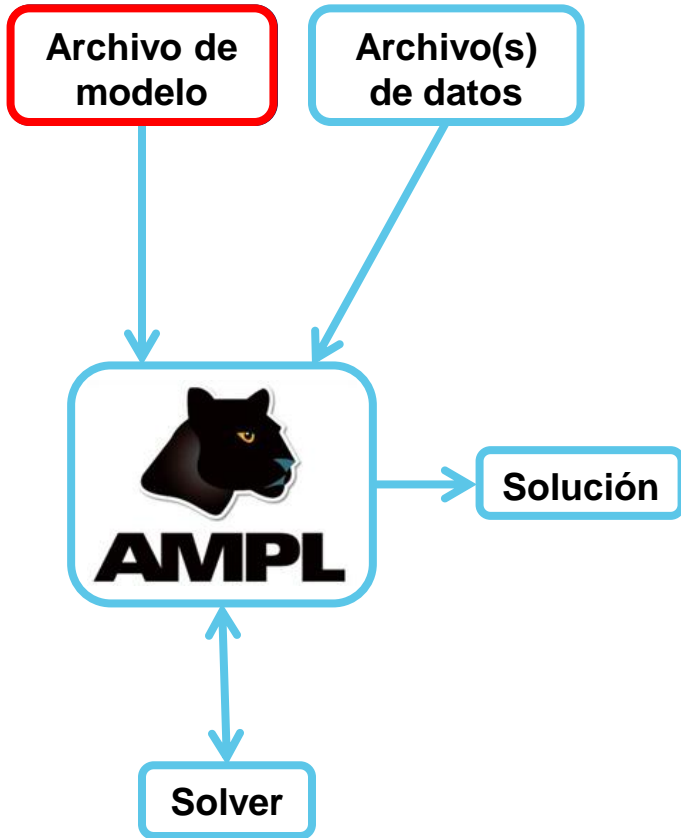
- Estrategias constructivas basadas en índices de sensibilidad

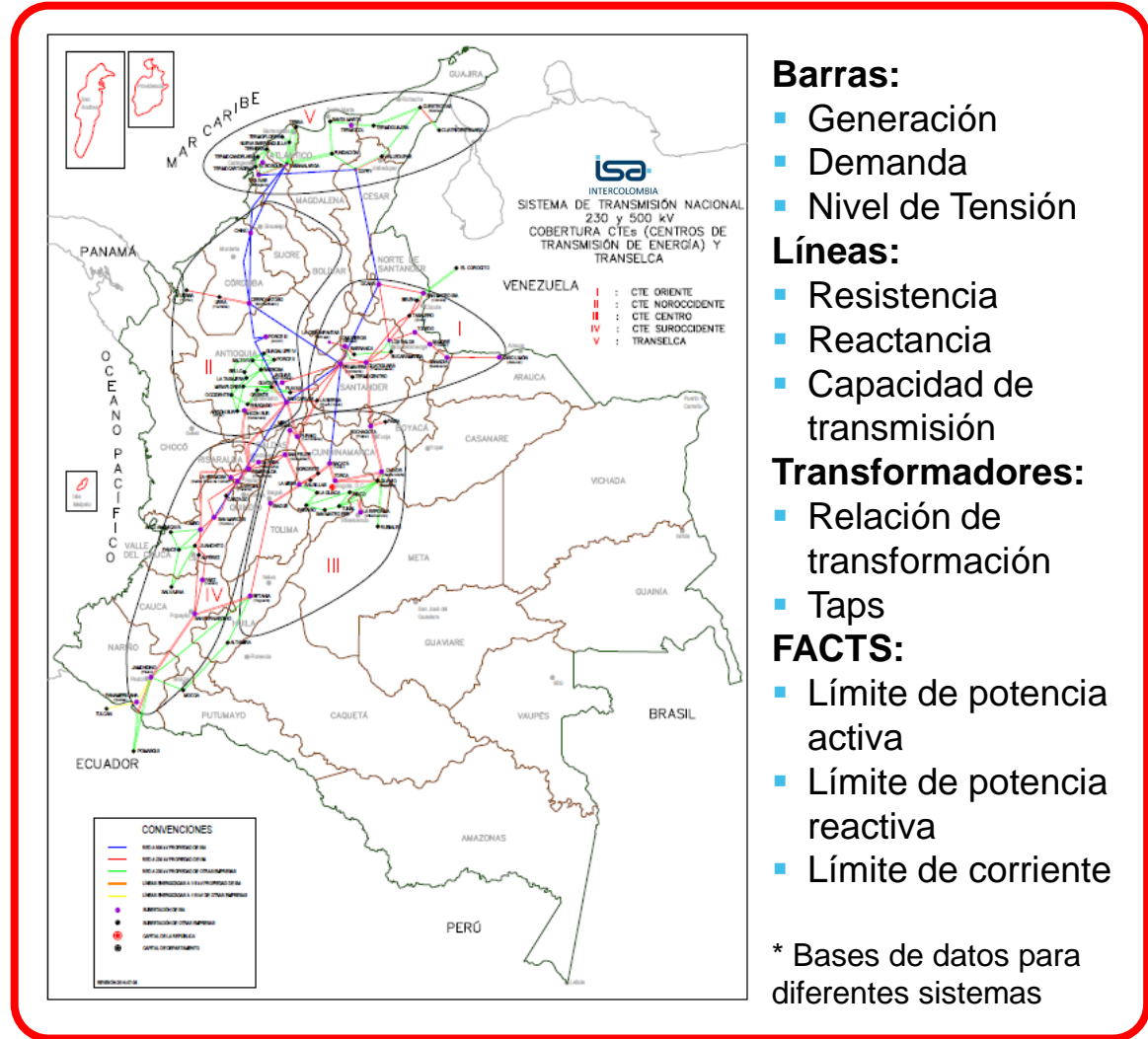
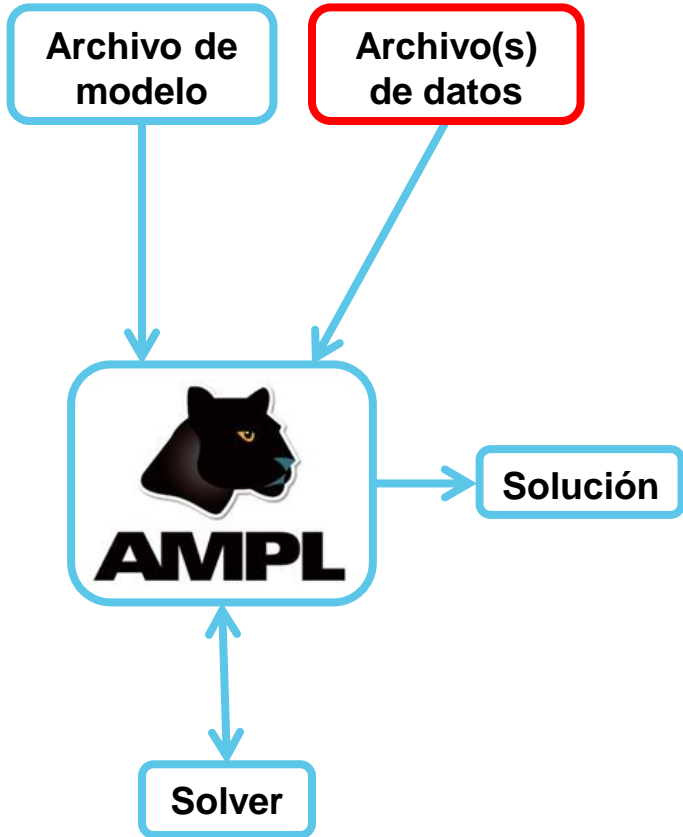
Inteligencia Artificial

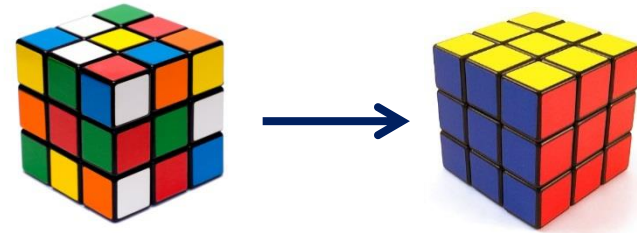
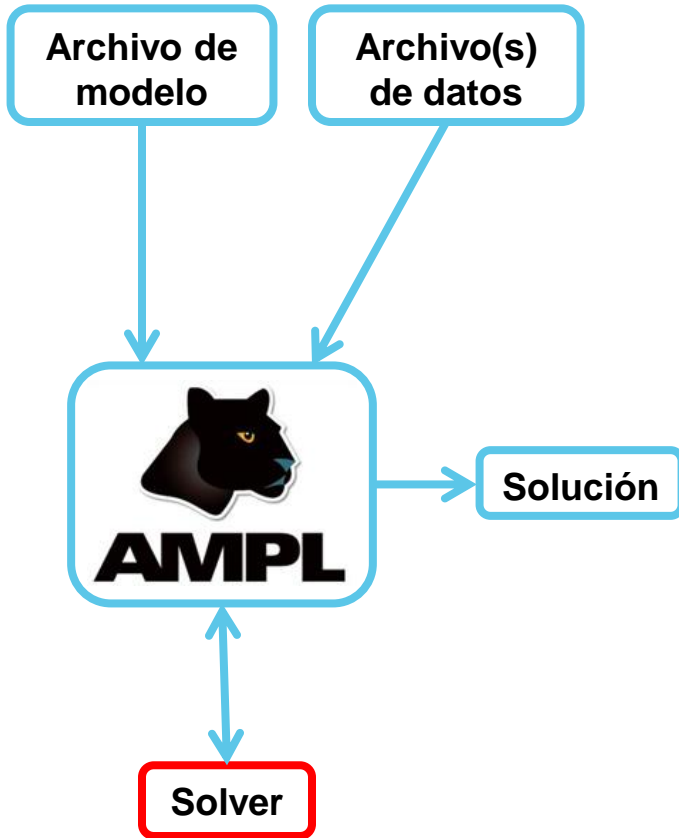
- Redes Neuronales
- Búsqueda Tabú
- Algoritmos Genéticos
- GRASP
- Recocido Simulado
- Colonia de Hormigas
- Búsqueda Dispersa
- Lógica Difusa
- Sistemas Expertos
- Teoría de Juegos
- Técnicas Multiobjetivo



- AMPL permite representar problemas de optimización de la misma forma en que las personas los perciben.
- Lenguaje de modelo para representar el problema de optimización.
- Lenguaje de comandos para explorar el modelo y analizar resultados.
- Lenguaje “script” (guion) para reunir y modificar datos.





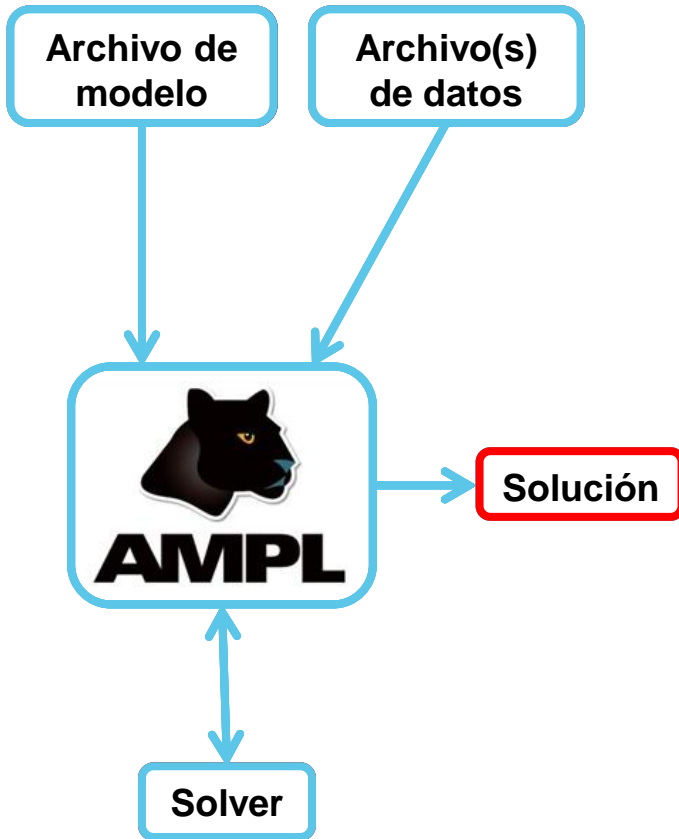


Mientras AMPL construye el modelo de optimización a partir de los datos, y entrega resultados para su análisis, el solver es el algoritmo que computa la solución óptima.

Un mismo modelo desarrollado en AMPL puede ser resuelto con diferentes solvers. Su uso depende de diversos aspectos, entre los que se destacan:

- Naturaleza del modelo matemático (lineal, no lineal...)
- Solver de licencia comercial / open source / desarrollo propio

* El desempeño de un solver no se puede predecir a partir de la complejidad del modelo o el tamaño de la base de datos.

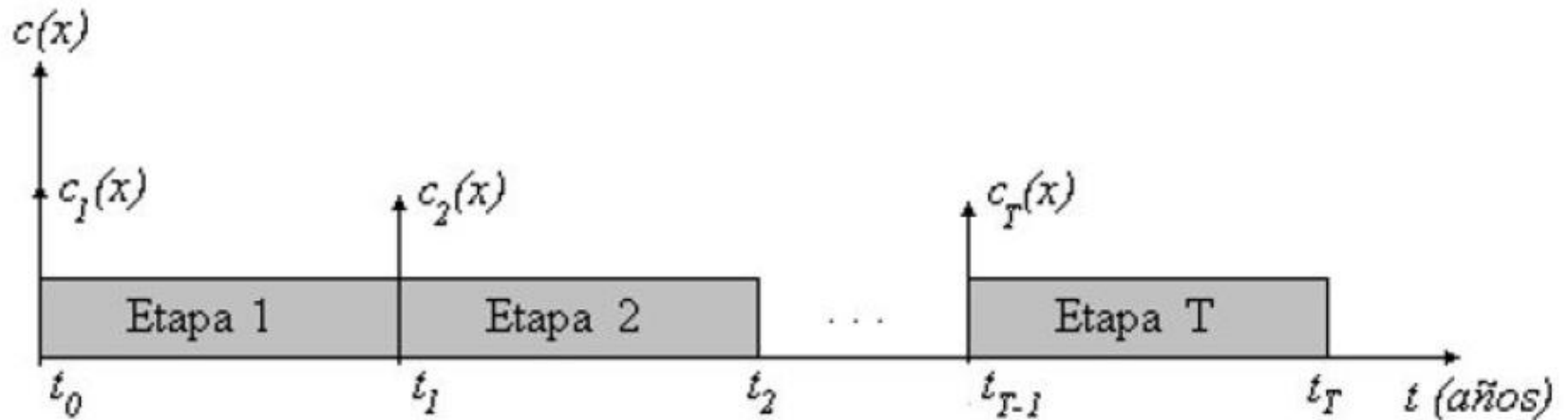


$$P_g, Q_g, V_k, I_k$$

- Solución óptima del problema: Mínimo valor de la función objetivo de acuerdo a las restricciones a las que esta sujeto.
- Satisface las restricciones: Cumple con todas las condiciones (igualdades, desigualdades, condición de las variables) planteadas en las restricciones.
- Análisis detallado de la solución: Estudio de sensibilidad (variables duales, rangos...)

Planeamiento Multietapa de la Expansión de Redes de Transmisión Usando Particiones de Red e Identificación de Variables Principales

$$c(x) = (1 - I)^{t_1 - t_0} c_1(x) + (1 - I)^{t_2 - t_0} c_2(x) + \dots + (1 - I)^{t_T - t_0} c_T(x)$$



$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} \sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k} + \alpha \sum_{i \in \Omega_r} r_i \quad (10)$$

s.a.

$$\sum_{(l,i) \in \Omega} \left(f_{li}^0 + \sum_{k=1}^K f_{li,k} \right) - \sum_{(i,l) \in \Omega} \left(f_{il}^0 + \sum_{k=1}^K f_{il,k} \right) = d_i - g_i - r_i, \quad \forall i \in B \quad (11)$$

$$|f_{ij}^0| - n_{ij}^0 \overline{f_{ij}} \leq 0, \quad \forall ij \in \Omega \quad (12)$$

$$|f_{ij,k}| - (2^{k-1} Y_{ij,k}) \overline{f_{ij}} \leq 0, \quad \forall ij \in \Omega, k \in K \quad (13)$$

$$f_{ij}^0 - (\theta_i - \theta_j) n_{ij}^0 \gamma_{ij} = 0, \quad \forall ij \in \Omega$$

$$-M(1 - Y_{ij,k}) \leq f_{ij,k} - (\theta_i - \theta_j) \gamma_{ij}$$

$$\sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k} \leq \overline{n_{ij}}, \quad \forall ij \in \Omega$$

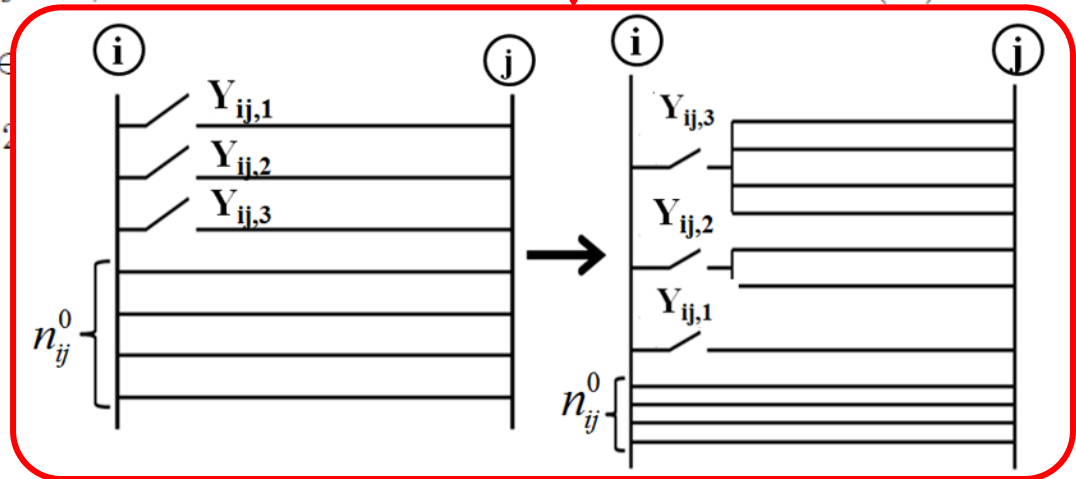
$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i}, \quad \forall i \in B$$

$$0 \leq r_i \leq d_i, \quad \forall i \in \Omega_r$$

$$Y_{ij,k} \rightarrow \text{binario}, \quad \forall ij \in \Omega, k \in K$$

$$f_{ij} \rightarrow \text{irrestringida}, \quad \forall ij \in \Omega$$

$$\theta_i \rightarrow \text{irrestringida}, \quad \forall i \in B$$



$$(19)$$

$$(20)$$

$$(21)$$

$$\text{mín } v = \delta^1 \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} \sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k}^1 + \alpha \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_r} r_i^t + \sum_{t=2}^T \delta^t \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} \left[\sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k}^t - \sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k}^{t-1} \right] \quad (22)$$

s.a.

$$\sum_{(l,i) \in \Omega} \left(f_{li}^{0,t} + \sum_{k=1}^K f_{li,k}^t \right) - \sum_{(i,l) \in \Omega} \left(f_{il}^{0,t} + \sum_{k=1}^K f_{il,k}^t \right) = d_i^t - g_i^t - r_i^t, \quad \forall i \in B, t \in T \quad (23)$$

$$\left| f_{ij}^{0,t} \right| - n_{ij}^0 \overline{f_{ij}} \leq 0, \quad \forall ij \in \Omega, t \in T \quad (24)$$

$$\left| f_{ij,k}^t \right| - (2^{k-1} Y_{ij,k}^t) \overline{f_{ij}} \leq 0, \quad \forall ij \in \Omega, k \in K, t \in T \quad (25)$$

$$f_{ij}^{0,t} - (\theta_i^t - \theta_j^t) n_{ij}^0 \gamma_{ij} = 0, \quad \forall ij \in \Omega, t \in T \quad (26)$$

$$-M(1 - Y_{ij,k}^t) \leq f_{ij,k}^t - (\theta_i^t - \theta_j^t) 2^{k-1} \gamma_{ij} \leq M(1 - Y_{ij,k}^t), \quad \forall ij \in \Omega, k \in K, (t > 1) \in T \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k}^{t-1} \leq \sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k}^t, \quad \forall ij \in \Omega, (t > 1) \in T \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^K 2^{k-1} Y_{ij,k}^t \leq \overline{n_{ij}}, \quad \forall ij \in \Omega, t \in T \quad (29)$$

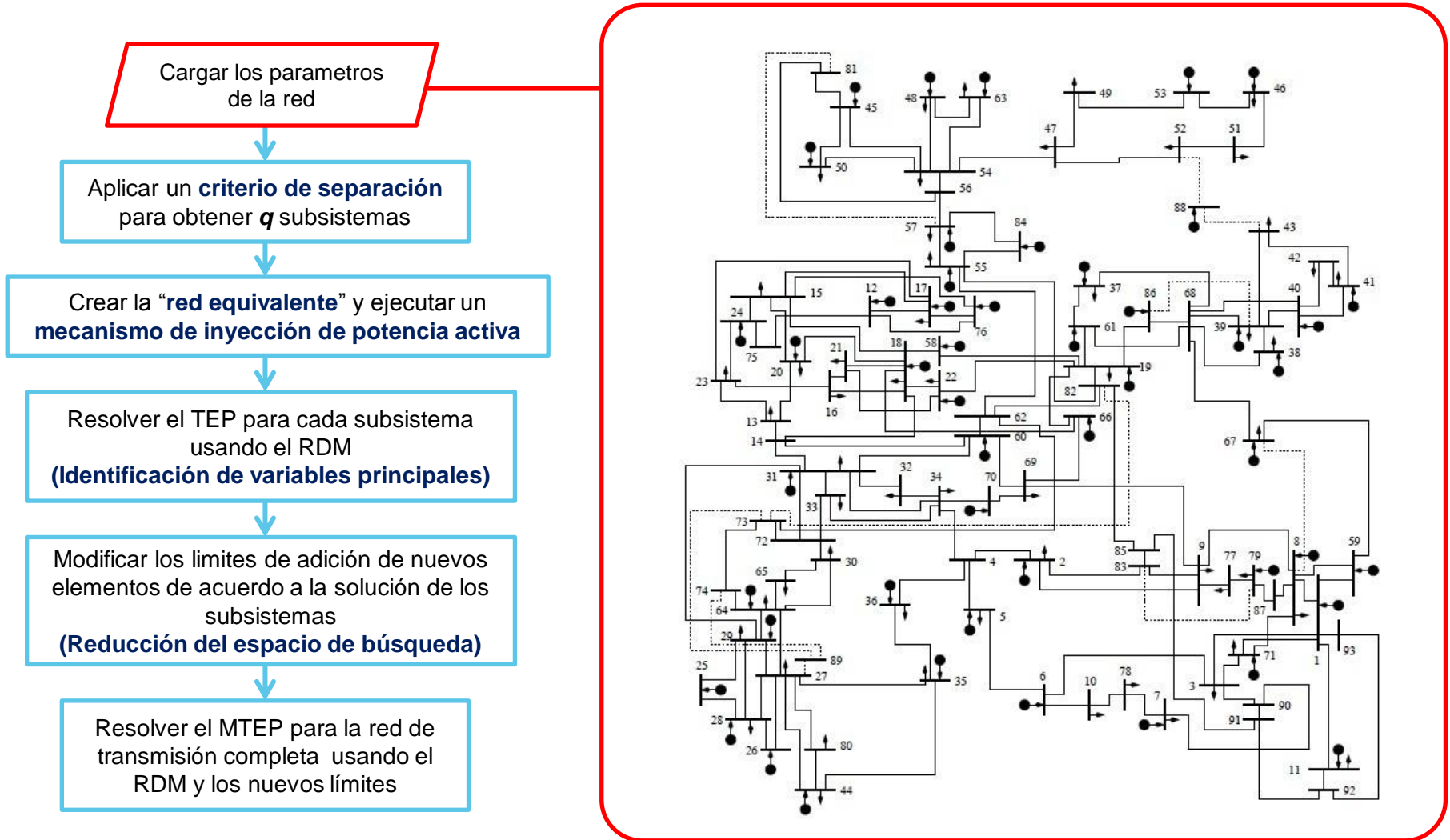
$$0 \leq g_i^t \leq \overline{g_i^t}, \quad \forall i \in B, t \in T \quad (30)$$

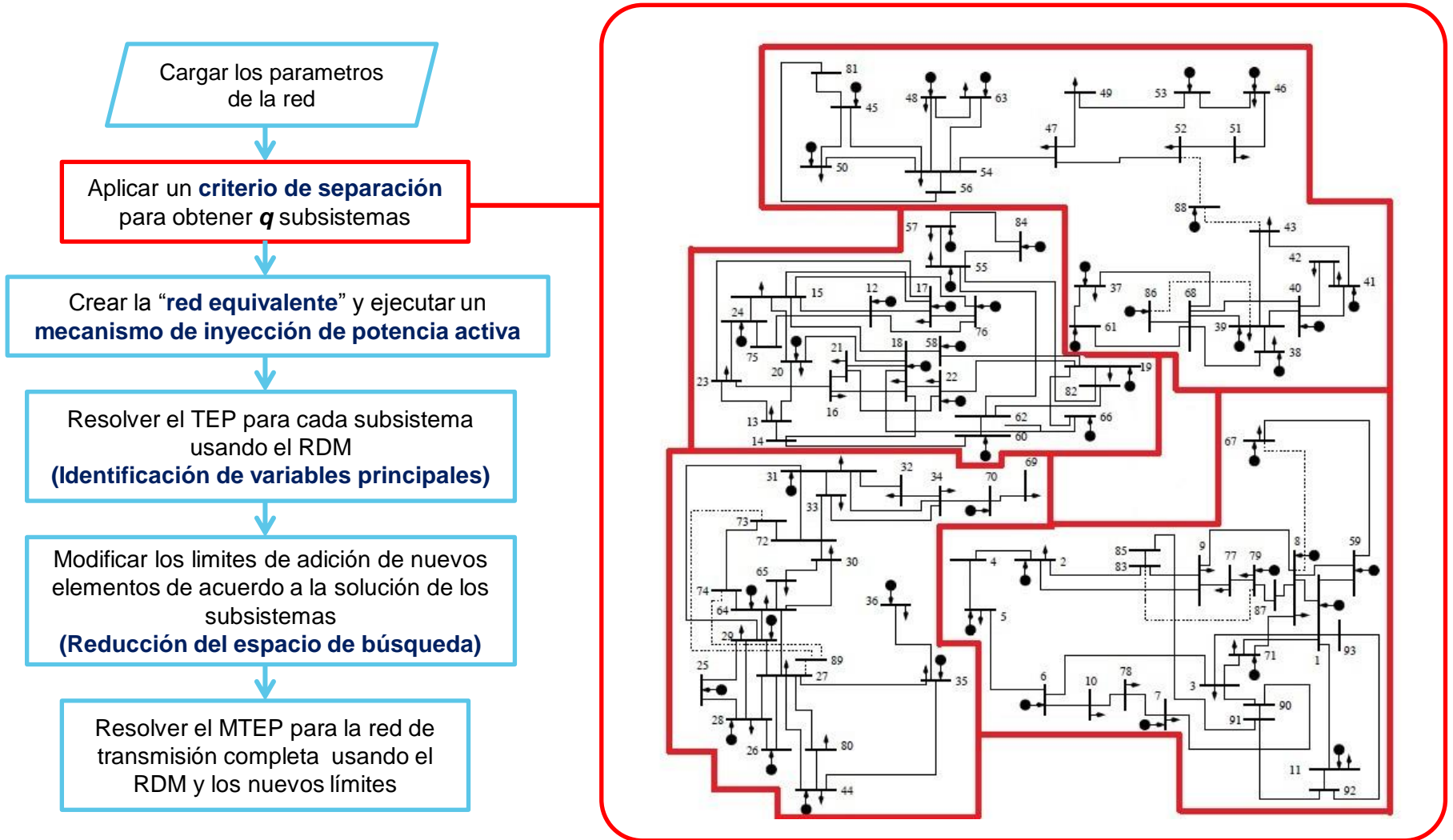
$$0 \leq r_i^t \leq d_i^t, \quad \forall i \in \Omega_r, t \in T \quad (31)$$

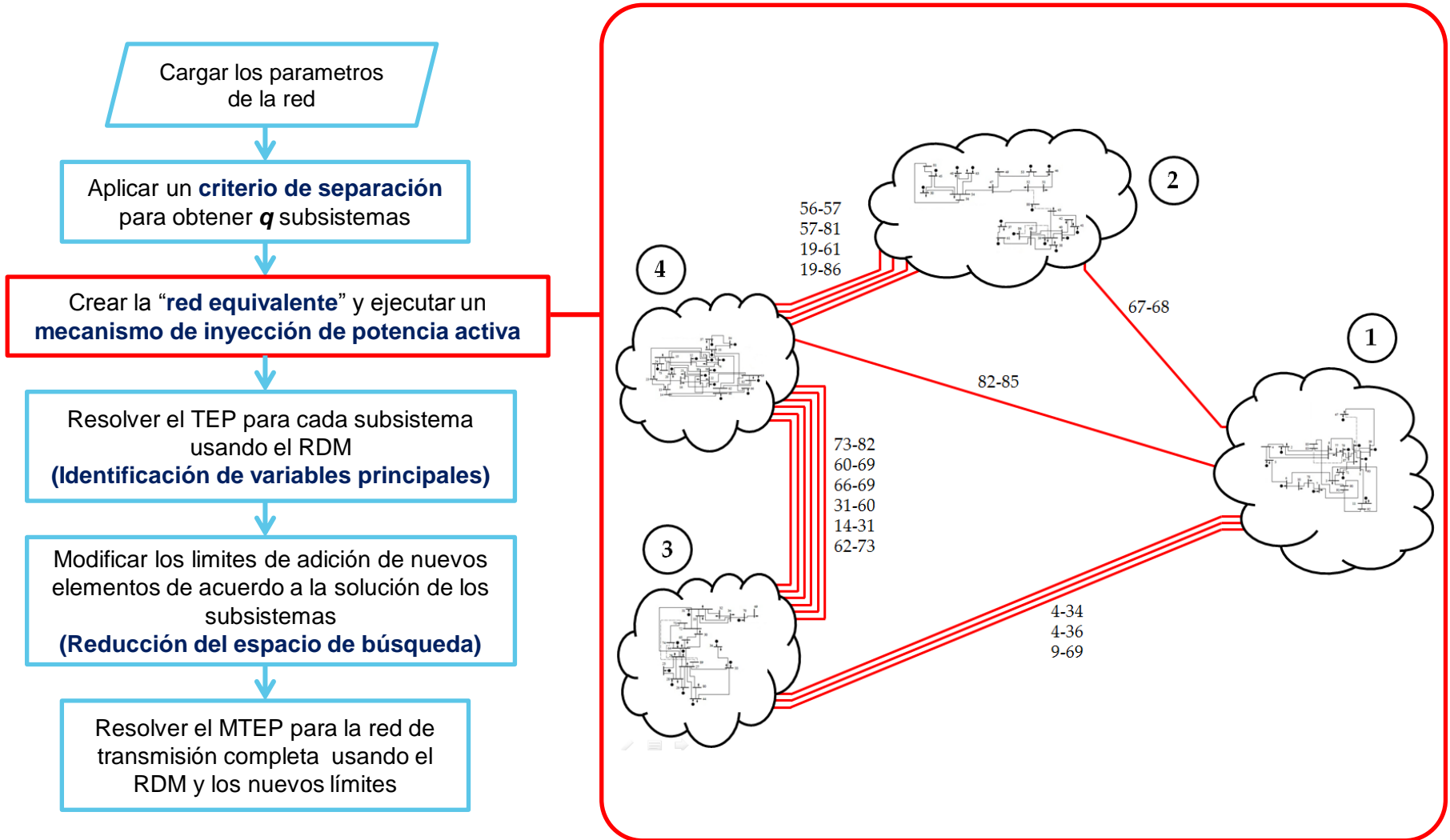
$$Y_{ij,k}^t \rightarrow \text{binaria}, \quad \forall ij \in \Omega, k \in K, t \in T \quad (32)$$

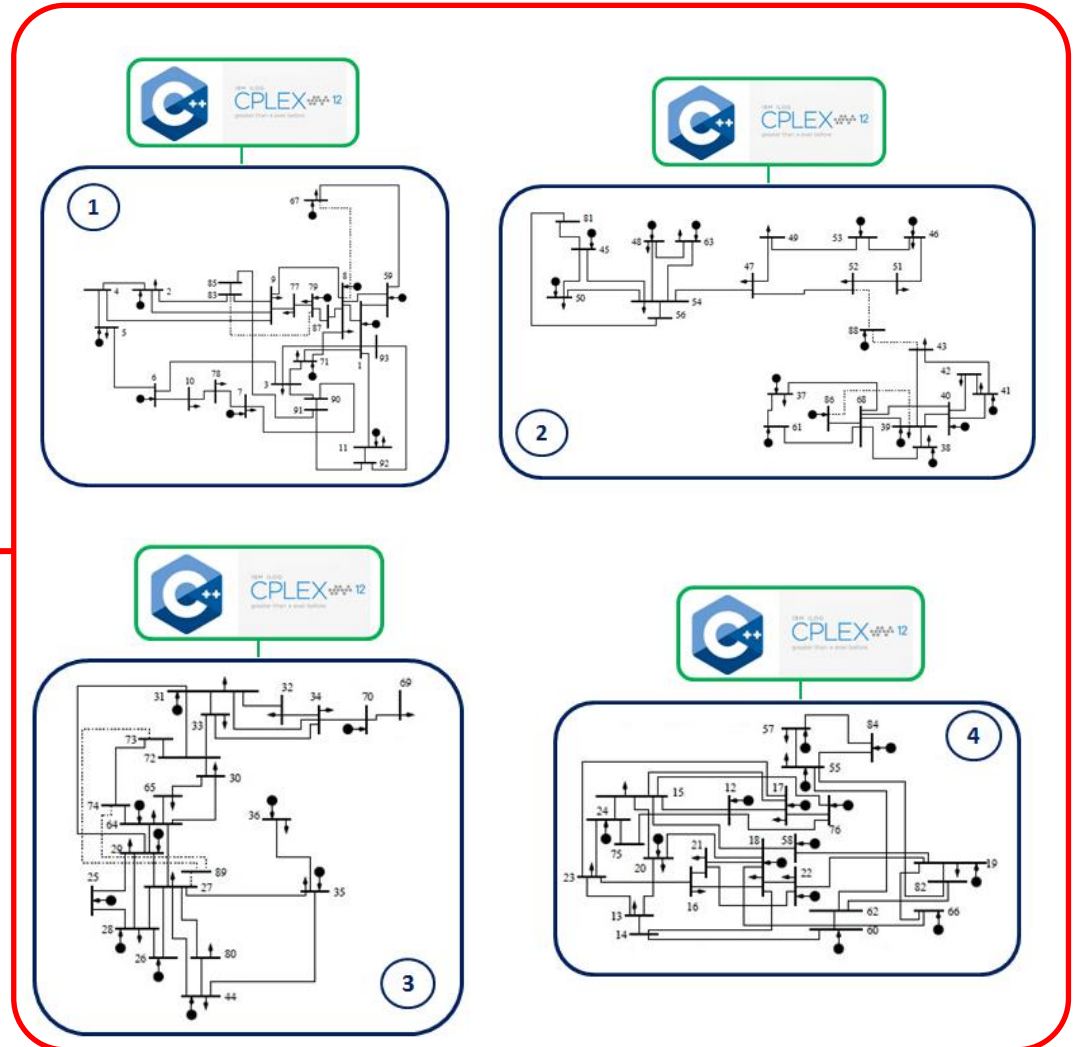
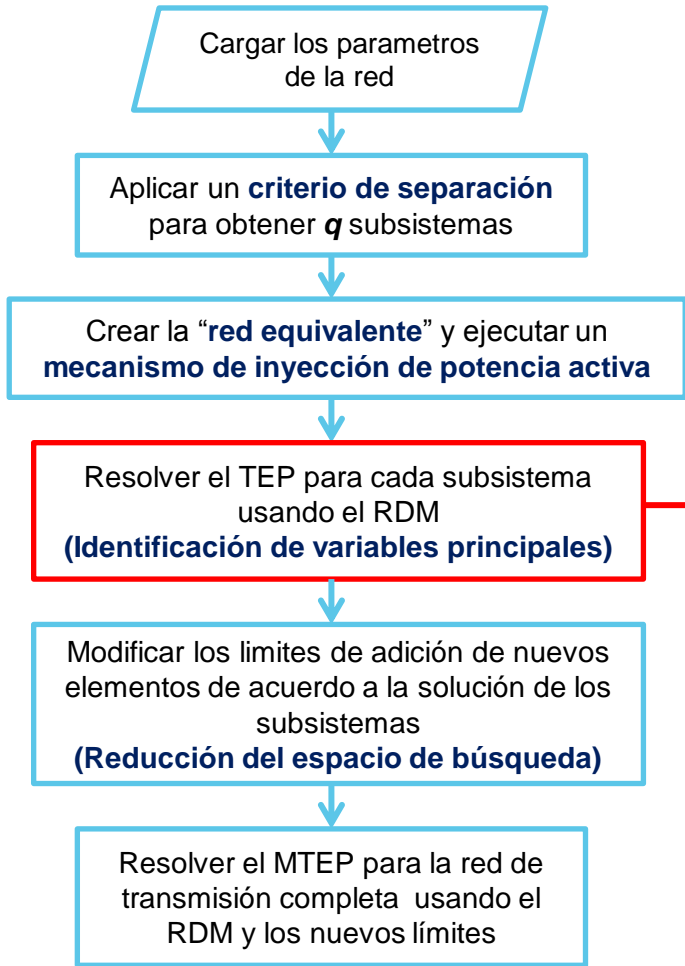
$$f_{ij,k}^t \rightarrow \text{irrestringida}, \quad \forall ij \in \Omega, k \in K, t \in T \quad (33)$$

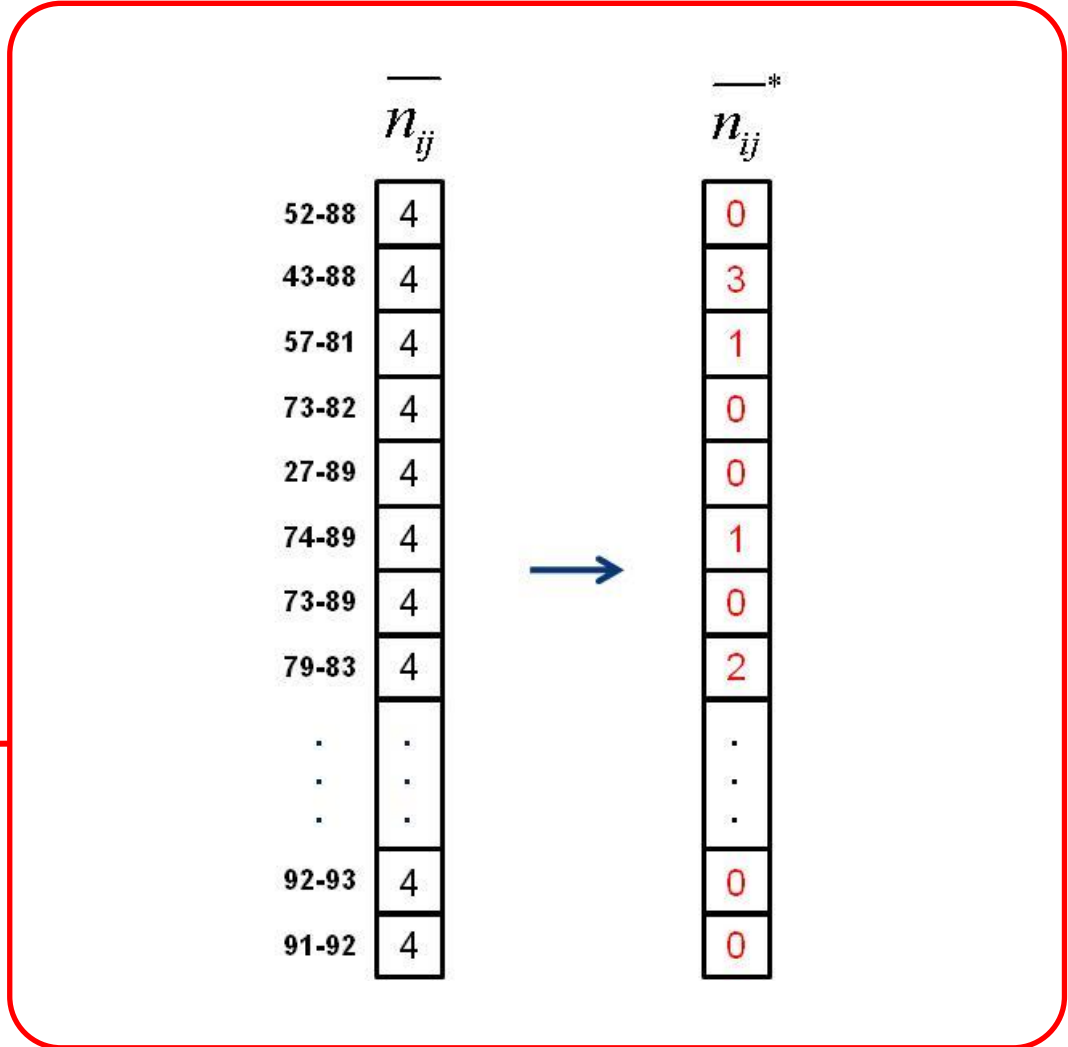
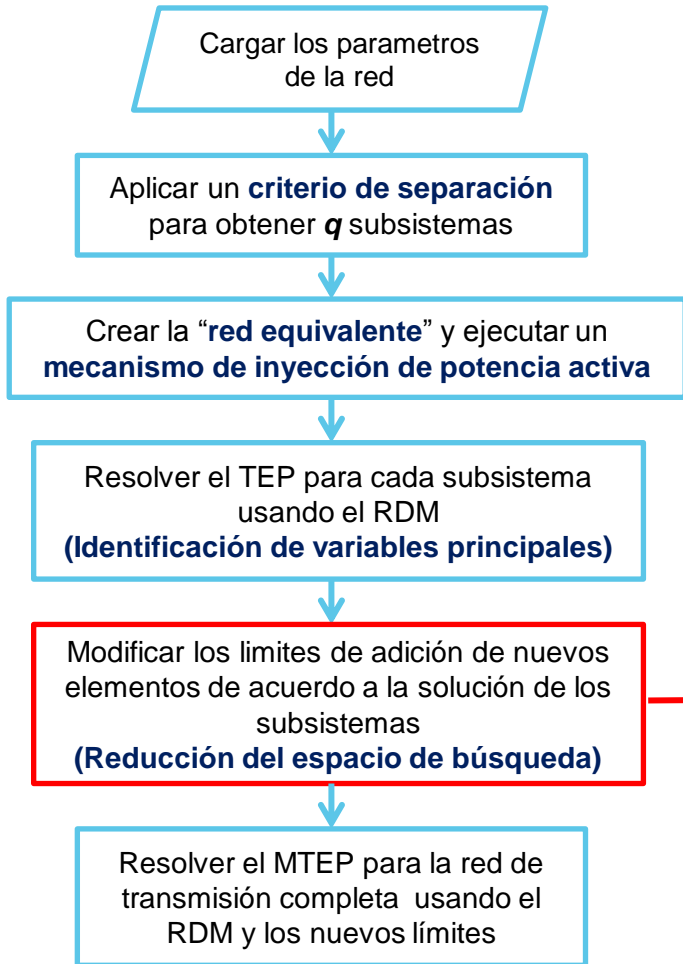
$$\theta_i^t \rightarrow \text{irrestringida}, \quad \forall i \in B, t \in T \quad (34)$$

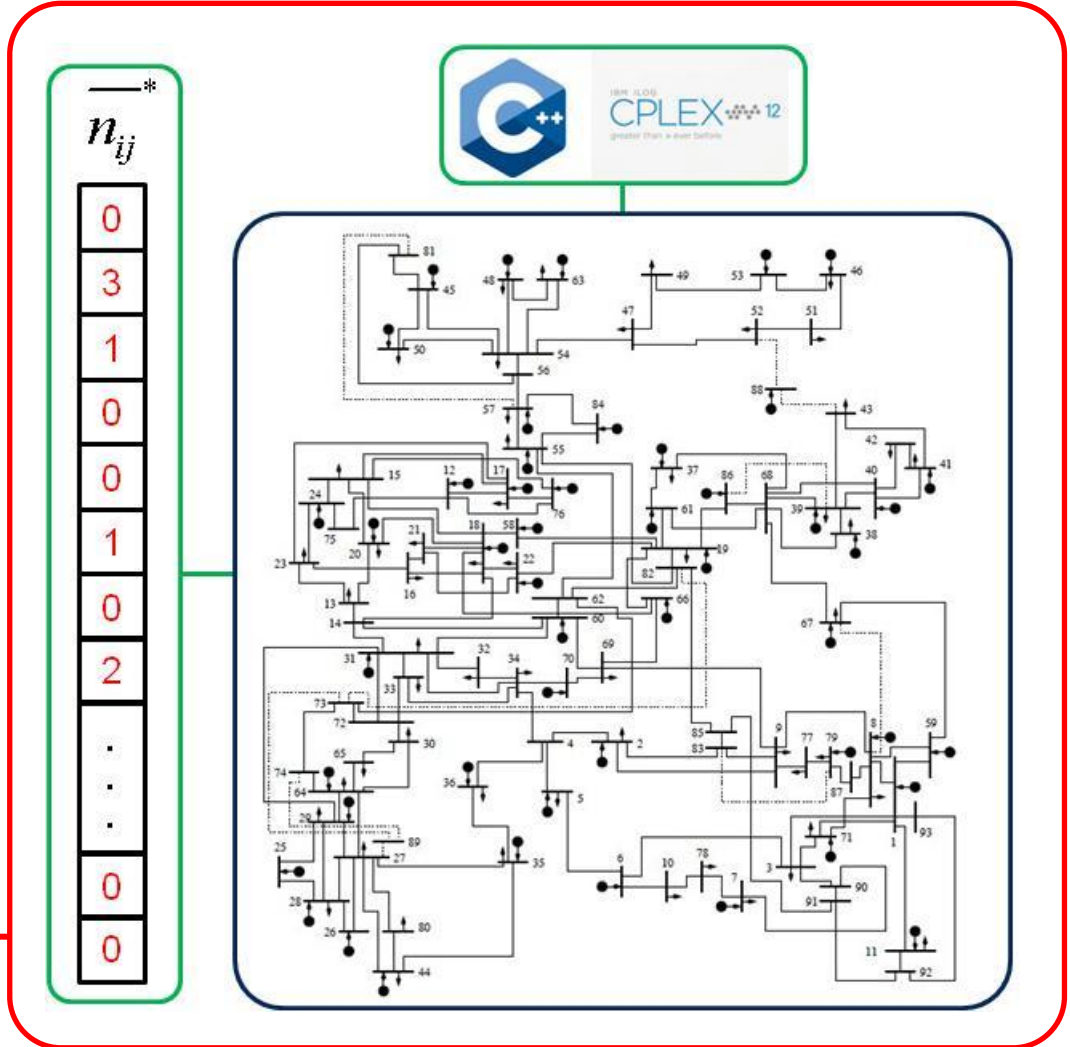
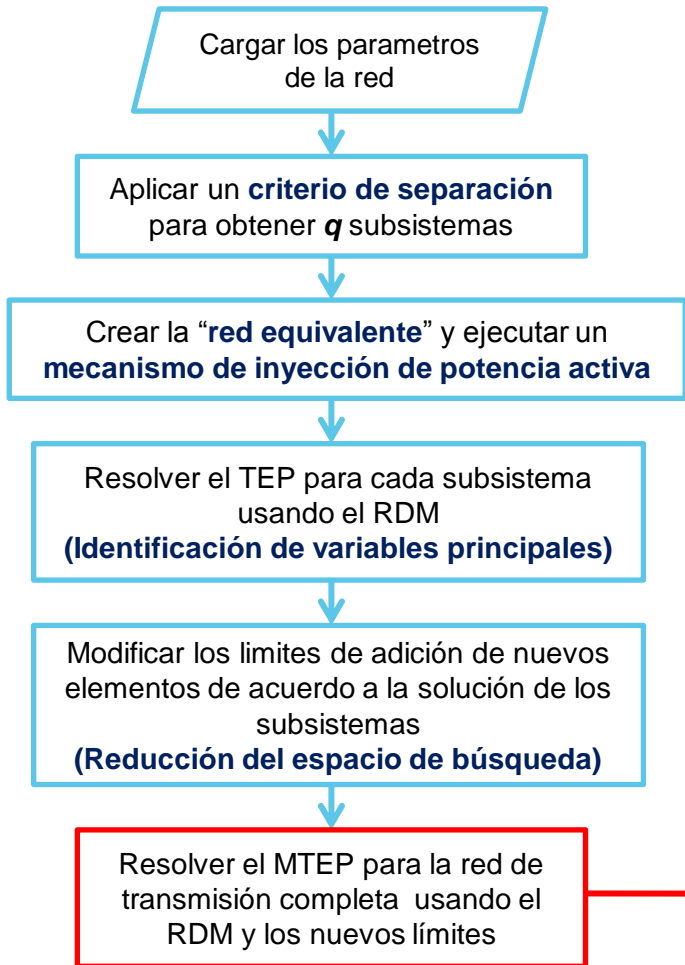














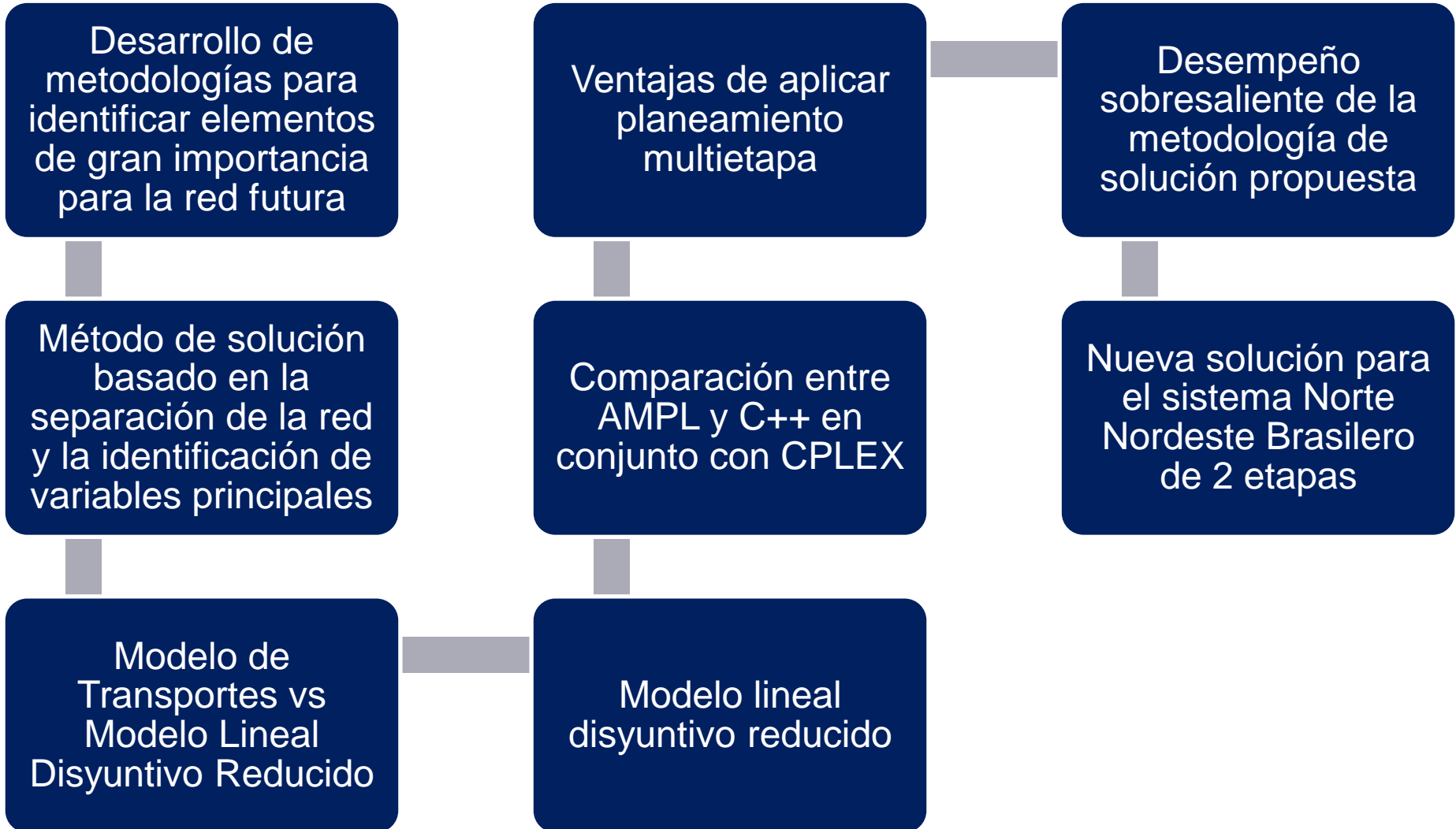
Planeamiento Multietapa – Sistema Colombiano

Criterio de separación	Mecanismo de inyección	Costo de Inversión [10 ⁶ US\$]	Tiempo C++ [s]
Grado de conexión	Capacidad de transmisión	545,59	1555,67
	Flujo de potencia activa	545,56	701,47
	Planeamiento red equivalente	545,56	922,46
	Red mínimo esfuerzo	524,75	190,66
Balance entre generación y demanda	Capacidad de transmisión	536,33	785,32
	Flujo de potencia activa	492,17	111,88
	Planeamiento red equivalente	544,58	1792,69
	Red mínimo esfuerzo	496,83	157,00
Red de mínimo esfuerzo	Capacidad de transmisión	501,40	108,94
	Flujo de potencia activa	492,17	193,32
	Planeamiento red equivalente	492,17	266,84
	Red mínimo esfuerzo	492,17	100,43



Planeamiento Multietapa – Sistema Norte Nordeste Brasileiro

Criterio de separación	Mecan. de inyecc.	Costo de Inversión [10 ⁶ US\$]	Tiempo C++ [s]	Mejor solución reportada [10 ⁶ US\$]	Tiempo reportado [s]
Estrategia: Unificar y filtrar las variables principales identificadas tras combinar cada criterio de separación con cada mecanismo de inyección de potencia activa		2195,28	11256,45 (3,12 horas)	2197,55	70 horas



- El sistema de transmisión de energía eléctrica es de gran importancia para todos los ámbitos de la sociedad moderna y la industria, por lo que es necesario realizar inversiones bien direccionadas a una expansión coherente con las necesidades del sector.
- El problema de planeamiento de la expansión de redes de transmisión ha sido objeto de múltiples investigaciones, con diferentes enfoques y criterios que permiten representarlo como un problema de optimización matemática.
- Existen herramientas y técnicas de solución genéricas y específicas para resolver el problema de planeamiento de la expansión de redes de transmisión, su efectividad está sujeta a la naturaleza del modelo matemático usado para representarlo y la complejidad del sistema bajo estudio.
- La metodología presentada en esta conferencia para resolver el denominado “planeamiento multietapa”, muestra la complejidad del problema y la cantidad de variantes que se deben considerar a la hora de desarrollar una investigación en torno a este problema.

En **INTERCOLOMBIA**
transportamos energía. Por Colombia





INTERCOLOMBIA



En **INTERCOLOMBIA**
transportamos energía. Por Colombia



Conmutador: (574) 325 24 00

Fax: (574) 317 04 17

Línea única de atención: 01 800094 20 01



www.intercolombia.com



intercolombia@intercolombia.com



Calle 12sur #18-168

Bloque 1. Pisos 2 y 3

Medellín, Colombia



© Todos los derechos reservados INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P.